Desenvolvimento do Bloco de Controle de Pressão para Regenerador Barocalórico

Arthur Almeida Leal (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Flávio Clareth Colman (Coorientador), Jean Rodrigo Bocca (Orientador). E-mail: jrbocca@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Engenharia Mecânica/Projeto de Máquinas

Palavras-chave: Barocalorico; Transição energética; Hidráulico.

RESUMO

A transição energética no setor de refrigeração impulsiona a busca por tecnologias sustentáveis capazes de substituir os ciclos de compressão de vapor. Dentre as alternativas, os regeneradores barocalóricos a fluido líquido destacam-se por otimizar a transferência térmica e mitigar a fadiga mecânica intrínseca aos materiais sólidos. Contudo, a aplicação prática dessa tecnologia exige infraestruturas robustas capazes de operar sob pressões extremas cíclicas. Diante disso, este trabalho objetiva desenvolver e dimensionar um bloco de controle de pressão automatizado, estruturado mediante a integração de um multiplicador hidráulico a um sistema microcontrolado. A metodologia fundamentou-se na modelagem tridimensional avançada e na validação estrutural via Análise de Elementos Finitos (FEA), simulando as tensões atuantes no conjunto sob carga máxima. O projeto estabeleceu a utilização do aço-liga AISI 4140, reconhecido por sua altíssima resistência mecânica, e parametrizou um sistema de vedação duplo projetado para suportar os diferenciais operacionais críticos entre 100 bar e 700 bar. Adicionalmente, estruturou-se a lógica de controle das válvulas direcionais visando garantir ciclos precisos de compressão e expansão. Os resultados atestam a consolidação do modelo paramétrico e confirmam, por meio da análise de tensões de von Mises, que as tolerâncias adotadas garantem a integridade estrutural sem deformações plásticas. Conclui-se que a arquitetura dimensionada atende integralmente aos severos requisitos mecânicos, viabilizando a futura manufatura do protótipo e o avanço experimental da refrigeração barocalórica.

INTRODUÇÃO

A mitigação dos impactos ambientais atrelados aos fluidos de compressão de vapor exige a transição para tecnologias de refrigeração sustentáveis, uma vez que os atuais hidrofluorocarbonetos (HFCs) atingiram seu limite físico-químico de eficiência (McLinden et al., 2017). Neste cenário, o efeito barocalórico emerge como uma alternativa promissora. Embora o desenvolvimento inicial tenha focado em materiais sólidos (Lloveras & Tamarit, 2021) estes sofrem fadiga cíclica e

apresentam condutividade térmica criticamente baixa. A utilização de fluidos líquidos contorna tais barreiras térmicas e estruturais, porém impõe um desafio mecânico complexo: a necessidade de infraestruturas projetadas para gerar e conter pressões hidrostáticas cíclicas extremas.

Para atingir as pressões exigidas pelo efeito barocalórico líquido, recorre-se a multiplicadores hidráulicos fundamentados no Princípio de Pascal, onde a pressão primária é amplificada pela razão de áreas de um pistão diferencial. A geração de tensões internas severas exige rigoroso dimensionamento e seleção de materiais de alta resistência, além de geometrias de vedação que isolem o refrigerante do óleo de acionamento. Diante disso, o presente trabalho objetiva desenvolver e dimensionar um bloco de controle de pressão automatizado para regeneradores barocalóricos. A pesquisa engloba a modelagem tridimensional, a validação estrutural via métodos numéricos para pressões de 700 bar e a proposição da lógica de acionamento das válvulas, estabelecendo as bases para a futura manufatura do protótipo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do bloco de controle foi estruturado a partir da parametrização geométrica e da modelagem tridimensional em ambiente CAD (SolidWorks). O dimensionamento das câmaras fluidas operou sob a premissa fundamental do Princípio de Pascal, estabelecendo a geometria interna de um pistão diferencial cujas razões de área transversais garantem a amplificação da pressão primária até a magnitude exigida de 700 bar. Essa etapa assegurou que as transições de seções e as espessuras de parede fossem previamente otimizadas para suportar as severas cargas de expansão impostas pelo fluido barocalórico.

Para assegurar a integridade do multiplicador hidráulico sob o regime extremo de 700 bar, a estrutura foi dimensionada considerando a manufatura em aço-liga AISI 4140. A especificação deste material como base do projeto justifica-se pelo seu perfil mecânico superior em aplicações de vasos de pressão, aliando excelente tratabilidade térmica e elevada tenacidade estrutural. As propriedades mecânicas fundamentais que balizaram a seleção do material e, subsequentemente, alimentaram o modelo numérico, estão sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades aço AISI 4140.

AISI. No	Tratamento Térmico	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Dureza (Bhn)
4140	Normalizado (899 °C)	1020,4	655,0	17,7	46,8	302

Fonte: 27th Edition Machinery's Handbook.

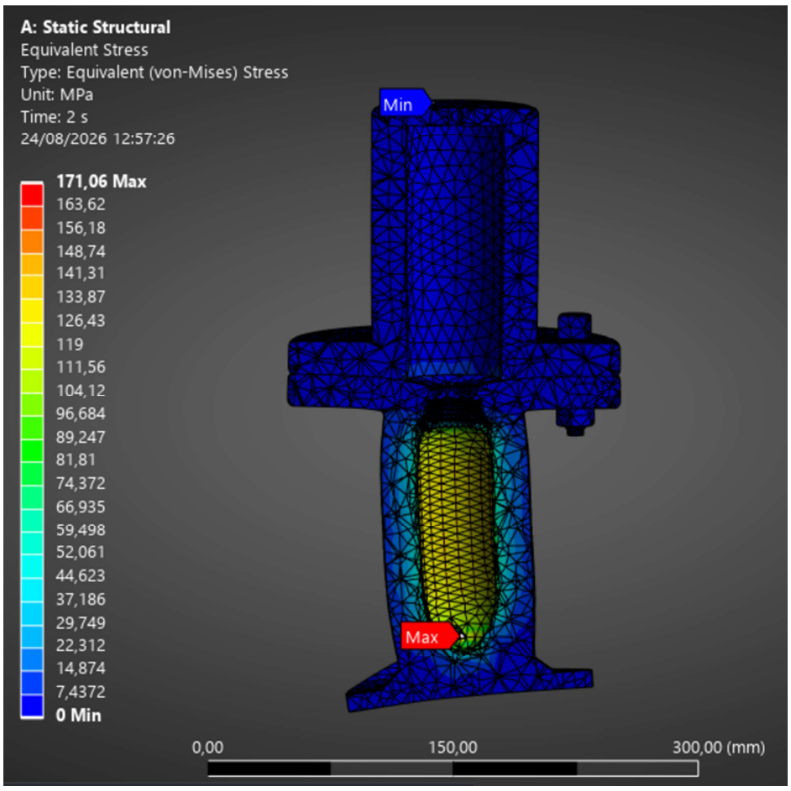
A validação estrutural da geometria foi conduzida via Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software Ansys. Para assegurar a fidelidade do modelo

numérico ao comportamento físico, as condições de contorno englobaram a aplicação da pressão hidrostática de 700 bar nas superfícies internas das câmaras. Adicionalmente, empregou-se o recurso de pré-carga (Bolt Pretension) nos elementos de fixação para representar o torque de aperto real, enquanto as interfaces de fechamento do bloco operaram sob formulação de contato com atrito (Frictional). O critério de resistência adotado para a análise do escoamento e segurança da peça foi a tensão equivalente de von Mises. Paralelamente ao dimensionamento mecânico, a lógica de automação do sistema foi estruturada por meio de diagramas no software FluidSIM. Esse mapeamento definiu a rotina hidráulica de acionamento sequencial das válvulas, estabelecendo a arquitetura de controle a ser futuramente embarcada em um microcontrolador da família Arduino.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação estrutural do multiplicador atestou a viabilidade mecânica da geometria proposta para operações sob alta severidade. A imposição da pressão interna de 700 bar gerou o campo de tensões ilustrado na Figura 1, avaliado sob o critério de resistência de von Mises.

Figura 1 - Distribuição de tensões equivalentes de von Mises no bloco de controle.



Fonte: O autor (2026).

Conforme evidenciado pela análise nodal e pelo gradiente de cores na Figura 1, as tensões máximas concentraram-se na região do furo lateral. Como previsto pela teoria da mecânica dos sólidos, essa descontinuidade geométrica atua como um concentrador de tensões, elevando localmente a magnitude dos esforços para um pico absoluto de 171,06 MPa. Contudo, ao confrontar este valor extremo com o limite de escoamento do aço-liga AISI 4140 (655,0 MPa) estipulado na metodologia, constata-se um coeficiente de segurança de aproximadamente 3,8. O bloco opera de maneira segura e inteiramente contido no regime elástico linear, assegurando a ausência de deformações plásticas mesmo nas áreas de maior solicitação geométrica.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o dimensionamento mecânico e a seleção do aço-liga AISI 4140 validaram a integridade estrutural do bloco multiplicador para operação cíclica a 700 bar. A simulação computacional atestou que as tensões de von Mises permanecem significativamente abaixo do limite de escoamento, garantindo um coeficiente de segurança robusto mesmo nas regiões de concentração de tensão (furo lateral). Adicionalmente, a estruturação da lógica hidráulica consolida a arquitetura de controle exigida. O projeto atende integralmente aos requisitos térmicos e mecânicos, atestando a viabilidade técnica para a etapa de manufatura do protótipo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação Araucária (FA) e à Universidade Estadual de Maringá (UEM) pelo fomento à pesquisa e pela concessão da bolsa de Iniciação Científica que viabilizou este projeto.

REFERÊNCIAS

ANSYS INC. Ansys Workbench User's Guide. Release 2026. Canonsburg: Ansys Inc., 2026.

Lloveras, P., & Tamarit, J. L. (2021). Advances and obstacles in pressure-driven solid-state cooling: A review of barocaloric materials. In MRS Energy and Sustainability (Vol. 8, Number 1, pp. 3–15). Springer Nature. https://doi.org/10.1557/s43581-020-00002-4

McLinden, M. O., Brown, J. S., Brignoli, R., Kazakov, A. F., & Domanski, P. A. (2017). Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. *Nature Communications*, *8*. https://doi.org/10.1038/ncomms14476

OBERG, E.; JONES, F. D.; HORTON, H. L.; RYFFEL, H. H. *Machinery's Handbook*. 27. ed. New York: Industrial Press, 2004.