

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

**Gislaine Hoffmann**

**Sistema de acionamento de eletroválvulas para  
aplicações em refrigeração magnética**

Florianópolis  
2017



**Gislaine Hoffmann**

**Sistema de acionamento de eletroválvulas para aplicações  
em refrigeração magnética**

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Hector Bessa Silveira  
Co-orientador: Dr. Eng. Jaime A. Lozano C.

Florianópolis  
2017



**Gislaine Hoffmann**

# **Sistema de acionamento de eletroválvulas para aplicações em refrigeração magnética**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e aprovada na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis, 04 de Agosto de 2017

## **Banca Examinadora:**

Prof. Jader Riso Barbosa Jr.  
Orientador na Empresa  
Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica - POLO

Dr. Eng. Jaime Andrés Lozano Cadena  
Co-orientador na Empresa  
Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica - POLO

Prof. Hector Bessa Silveira  
Orientador no Curso  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Eng. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Francisco Victor de Souza Lopes  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina

Erich Richard Alves  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina



*Aos meus pais Astério e Irenita,  
meus irmãos Gláucea, Grasiela e Getúlio,  
meu cunhado e padrinho Willian,  
meus sobrinhos Isabeli e Ícaro,  
e minha avó Hermínia (in memoriam).  
Vocês são meu exemplo de coragem,  
determinação e dedicação.*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a vida e por ser quem sou.

Ao professor e meu orientador do curso Hector Bessa Silveira pelos ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor e coordenador do projeto de pesquisa PoloMag, Jader Riso Barbosa Jr., por todas suas contribuições e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Dr. Jaime Andrés Lozano e Prof. Pedro Oliveira Cardoso por terem me dado a oportunidade de trabalhar no projeto PoloMag, pela paciência, pelo apoio, pela experiência, pela orientação e sugestões na confecção deste documento.

Aos meus colegas de sala, Alan, Guilherme, Gusttav, Sergio e Mário, pela partilha de conhecimento, apoio e amizade.

Aos demais membros do grupo PoloMag, Fábio, Manoel, Ricardo, Natália e Mayara, que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Automação e Sistemas que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal ao longo da graduação.

Aos meus pais, Astério e Irenita, pela estrutura familiar, carinho e apoio em momentos de dificuldades.

Aos meus irmãos Gláucea, Grasiela e Getúlio, e cunhado Willian, por sempre me motivarem a seguir o meu caminho.

Aos meus sobrinhos Isabeli e Ícaro por me darem infinitas alegrias e renovar minhas forças todos os finais de semana.

As minhas amigas Daiane, Luana e Thaíse por me escutarem, me apoiarem e estarem comigo diariamente.

A Embraco e EMBRAPII pelo suporte financeiro, e ao POLO pela infraestrutura disponibilizada.

Aos demais companheiros do POLO e a todos os que contribuíram com a realização deste trabalho, direta ou indiretamente.

Muito obrigada.



*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.*  
*(John F. Kennedy)*



## RESUMO

A sincronização entre o circuito hidráulico e o circuito magnético em um refrigerador magnético é fundamental para o seu funcionamento e a eficiência geral do equipamento. A maioria dos protótipos relatados na literatura usam válvulas rotativas com vedação face-a-face, ou outras válvulas acionadas mecanicamente, para realizar a distribuição de escoamentos oscilatórios do fluido de trabalho através dos regeneradores magnéticos ativos. Esses escoamentos ocorrem em sincronia com a variação do campo magnético, permitindo assim, as transferências de calor necessárias para a refrigeração. No entanto, o uso de tais mecanismos em refrigeradores magnéticos demonstrou uma versatilidade limitada na definição dos perfis temporais de escoamento durante a sincronização entre circuitos hidráulicos e magnéticos. Além disso, ele é normalmente o maior contribuinte para o consumo de energia do dispositivo, prejudicando sua eficiência. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um novo sistema responsável pela distribuição de escoamentos oscilatórios, utilizando um conjunto de eletroválvulas no lugar de válvulas de atuação mecânica. Para tanto, uma caracterização de eletroválvulas foi realizada, um sistema de medição de campo magnético foi desenvolvido e um aparato de avaliação de regeneradores foi adaptado e validado com um sistema de acionamento de eletroválvulas. Os resultados mostraram que o uso de tais válvulas permite uma flexibilidade relativamente grande na operação e sincronização de um refrigerador magnético, e com um menor consumo de energia.

**Palavras-chave:** Refrigeração magnética. Eletroválvula. Sincronização.



## ABSTRACT

Synchronization between the hydraulic and the magnetic circuits in a magnetic refrigerator is fundamental to its operation and overall efficiency. Most of the prototypes reported in the literature apply face-to-face sealing (rotary valves) or some other mechanically actuated flow distribution system to allow oscillatory fluid flow through the active magnetic regenerators. However, the use of such mechanisms in magnetic refrigerators has demonstrated limited versatility in controlling the synchronization between the hydraulic and magnetic circuits. Additionally, it is frequently the largest contributor to the energy consumption of the device, compromising its efficiency. Therefore, this work aims to develop and implement a new actuation and control system of a set of electric valves in place of mechanically-actuated valves. For this purpose, a characterization of electric valves was performed, a magnetic field measurement system was developed and an apparatus for evaluation of regenerators was adapted and validated with a new actuation and control system of electric valves. Results indicate that the use of such valves allows for a relatively high flexibility in the operation and synchronization of a magnetic refrigerator as well as a lower energy consumption.

**Key-words:** Magnetic refrigeration. Electric valve. Synchronization.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Processos de um ciclo termomagnético de Brayton aplicado a um regenerador magnético ativo.....	34
Figura 2.2 - Representação da sincronia entre campo magnético e vazão mássica durante o ciclo de refrigeração magnética .....	35
Figura 2.3 - Diagrama hidráulico esquemático da bancada experimental de RMA. Componentes da transmissão e do circuito magnético (CCH) também podem ser visualizados. TCQ e TCF são os trocadores de calor quente e frio, respectivamente. T e P são transdutores de temperatura e pressão. VAP e VBP são, respectivamente, as válvulas rotativas de alta e baixa pressão. Setas indicam sentido do escoamento.....	37
Figura 2.4 - Vista explodida de uma válvula rotativa de alta pressão. ....	38
Figura 2.5 - Magnitude das componentes e resultante da intensidade do fluxo magnético na posição de campo máximo ao longo do eixo z. ....	39
Figura 2.6 - Sistema de transmissão da bancada. ....	39
Figura 2.7 - Perfis de campo magnético, escoamento e posição de um sistema ideal e sincronizado.....	40
Figura 2.8 - Diagrama hidráulico esquemático da bancada experimental de eletroválvulas para RMA. UPH é a unidade de potência hidráulica. T e P são transdutores de temperatura e pressão, respectivamente. AP é o <i>manifold</i> de alta pressão e BP é o <i>manifold</i> de baixa pressão. O banho térmico é o responsável por manter a temperatura do fluido em 20°C na saída da UPH para o sistema. Setas indicam sentido do escoamento.....	41
Figura 2.9 - Circuito para medir potência das válvulas indiretamente.....	43
Figura 2.10 - Estrutura simplificada de um relé. Os terminais 1 e 2 são os terminais da bobina. Os terminais 3 e 4 correspondem aos contatos.....	44
Figura 2.11 - Transistor bipolar NPN operando como chave.....	46
Figura 2.12 - Transistor MOSFET operando como chave .....	46
Figura 4.1 - Válvula solenoide Danfoss .....	53
Figura 4.2 - Válvula solenoide Bürkert .....	55
Figura 4.3 - Simulações de acionamento de eletroválvulas. Na esquerda com um transistor MOSFET IRFZ44N e na direita com um transistor <i>Darlington</i> TIP120. ....	59

Figura 4.4 - Circuito de atuação e medição de potência das eletroválvulas. ....	60
Figura 4.5 - Medições do campo magnético em diferentes posições do eixo z durante um giro completo do ímã.....	62
Figura 4.6 - Sensor de Efeito Hall SS49E. As medidas estão em mm. O pino 1 é para tensão de alimentação, pino 2 é o Ground e pino 3 é a saída.....	63
Figura 4.7 - Curva de saída do sensor de Efeito Hall disponibilizada pelo catálogo.....	63
Figura 4.8 - Diagrama elétrico esquemático da instalação do sensor de Efeito Hall.....	63
Figura 4.9 - Nova configuração hidráulica da bancada experimental de RMA. Componentes da transmissão e do circuito magnético (CCH) podem ser visualizados. TCQ e TCF são os trocadores de calor quente e frio, respectivamente. T e P são transdutores de temperatura e pressão. SEH é o sensor de Efeito Hall. Setas indicam sentido do escoamento. ....	65
Figura 4.10 - Diagramas dos tempos de respostas das válvulas Bürkert a uma pressão de suprimento de 6 bar.....	67
Figura 4.11 - Diagrama de acionamento das válvulas Bürkert considerando os tempos de resposta apresentados no diagrama da Figura 4.10 e o escoamento esperado no RMA.....	67
Figura 4.12 - Sistema de sincronização dividido em 3 módulos. ....	68
Figura 4.13 - Módulo responsável pelo cálculo dos tempos de escoamento e de não escoamento.....	69
Figura 4.14 – Módulo responsável por identificar o momento de iniciar o acionamento das eletroválvulas. ....	70
Figura 4.15 - Módulo responsável por acionar as eletroválvulas, considerando os tempos de escoamentos e tempo de resposta das válvulas. ....	71
Figura 5.1- Curvas de vazão alcançadas na bancada experimental de eletroválvulas. ....	74
Figura 5.2 - Dinâmica da potência consumida pelas válvulas solenoides após serem ligadas	75
Figura 5.3 - Valores da potência consumida pelas válvulas solenoides em diferentes pressões de suprimento .....	75
Figura 5.4 - Estimativa de consumo de válvulas para o protótipo de Lozano .....	76
Figura 5.5 - Sinais de corrente nas válvulas após receberem sinais de comando .....	77
Figura 5.6 - Pressões de suprimento ( <i>PS</i> ), pressões de reservatório ( <i>PT</i> ) e correntes nos pares de válvulas Bürkert em experimentos com diferentes tempos entre fechamento e abertura dos pares.....	78

Figura 5.7 - Pressões de suprimento ( <i>PS</i> ), pressões de reservatório ( <i>PT</i> ) e correntes nos pares de válvulas Danfoss em experimentos com diferentes tempos entre fechamento e abertura dos pares .....	79
Figura 5.8 - Diferença de pressão ( $\Delta P$ ) nos regeneradores durante chaveamento das válvulas Bürkert .....	81
Figura 5.9 - Placa de circuito integrado de acionamento e medição de potência das eletroválvulas .....	83
Figura 5.10 - Conjunto de eletroválvulas da Bürkert instaladas na bancada experimental de RMAs.....	84
Figura 5.11 - Corrente nas válvulas após receberem sinais de comando pelo circuito de acionamento com MOSFET. ....	84
Figura 5.12 - Imagem do sensor de Efeito Hall após sua conexão elétrica.....	85
Figura 5.13 - Calibração do sensor de Efeito Hall. (a) Sinal de saída do sensor antes da calibração. (b) Sinal resultante após a calibração. ....	85
Figura 5.14 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma <i>f</i> RMA de 0,5 Hz e FE de 100%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA. $\Delta P$ positivo indica Escoamento Frio e $\Delta P$ negativo indica Escoamento Quente.....	87
Figura 5.15 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma <i>f</i> RMA de 0,5 Hz e FE de 75%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA. $\Delta P$ positivo indica Escoamento Frio e $\Delta P$ negativo indica Escoamento Quente.....	88
Figura 5.16 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma <i>f</i> RMA de 0,5 Hz e FE de 50%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA. $\Delta P$ positivo indica Escoamento Frio e $\Delta P$ negativo indica Escoamento Quente.....	88
Figura 5.17 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma <i>f</i> RMA de 0,25 Hz e FE de 100%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA. $\Delta P$ positivo indica Escoamento Frio e $\Delta P$ negativo indica Escoamento Quente.....	89
Figura 5.18 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma <i>f</i> RMA de 0,25 Hz e FE de 75%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados.	

Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente. .... 90

Figura 5.19 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,25 Hz e FE de 50%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados.

Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente. .... 90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características de catálogo das válvulas EV310B da Danfoss.....	54
Tabela 4.2 - Características de catálogo das válvulas modelo 6211 da Bürkert .....	55
Tabela 4.3 - Nomenclatura das válvulas e distribuição delas em pares. ....	66
Tabela 5.1 - Tempos de resposta da válvula Bürkert .....	82
Tabela 5.2 - Frequência máxima de operação das válvulas Bürkert. ....	83



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BJT	Transistor de junção bipolar
CCH	Cilindros concêntricos de Halbach
COP	Coeficiente de performance
EMC	Efeito magnetocalórico
FE	Fração de escoamento
MOSFET	Transistor de efeito de campo de semiconductor de óxido metálico
PCI	Placa de circuito integrado
PFC	Projeto de Fim de Curso
POLO	Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica
RMA	Regenerador Magnético Ativo
SEH	Sensor de Efeito Hall
TRP	Testes em regime permanente
TRT	Testes em regime transiente
UPH	Unidade de potência hidráulica
VAP	Válvula de alta pressão
VBP	Válvula de baixa pressão





## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Campo magnético aplicado	T
$\Delta P$	Queda de pressão	bar
$\Delta T_{ad}$	Variação de temperatura adiabática	K
$\Delta T_{span}$	Diferença de temperatura entre os reservatórios térmicos	K
$f_{RMA}$	Frequência dos ciclos de RMA	Hz
Gd	Gadolínio	
$P_S$	Pressão de suprimento	bar
$\dot{Q}_F$	Capacidade de Refrigeração	W
$\dot{Q}_Q$	Calor Rejeitado	W
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg / h
$\dot{W}$	Potência fornecida ao sistema	W
$\tau_{min}$	Tempo mínimo de escoamento	s



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
1.1	Motivação .....	28
1.2	Breve Descrição do Problema .....	29
1.3	Objetivos.....	29
1.4	Técnicas e Métodos Utilizados.....	30
1.5	Organização do Documento .....	31
<b>2</b>	<b>REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA E ACIONAMENTO DE</b>	
<b>ELETRÓVALVULAS .....</b>		<b>33</b>
2.1	Refrigeração Magnética.....	33
2.1.1	Sincronização hidráulico-magnética .....	35
2.2	Bancada experimental de RMA .....	36
2.3	Bancada experimental de eletroválvulas para refrigeração magnética .....	41
2.4	Acionamento de eletroválvulas.....	43
2.4.1	Relés .....	44
2.4.2	Transistores .....	45
2.5	Conclusões.....	47
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E REQUISITOS TÉCNICOS.....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>SOLUÇÃO PROPOSTA E METODOLOGIA UTILIZADA.....</b>	<b>53</b>
4.1	Eletroválvulas testadas.....	53
4.1.1	Válvulas solenoides Danfoss.....	53
4.1.2	Válvulas solenoides Bürkert.....	54
4.1.3	Experimentos na bancada experimental de eletroválvulas para refrigeração magnética .....	56
4.2	Acionamento de eletroválvulas.....	57
4.2.1	Circuito de atuação e medição de potência das válvulas .....	60
4.3	Medição de campo magnético .....	61
4.4	Adaptação da bancada.....	64
4.4.1	Painel elétrico .....	64
4.4.2	Sistema de Aquisição .....	64
4.4.3	Sistema Hidráulico .....	65
4.5	Sistema de sincronização .....	66
4.5.1	Tempo de resposta das válvulas .....	66
4.5.2	Campo magnético.....	68
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
5.1	Caracterização de eletroválvulas .....	73
5.1.1	Perda de Carga .....	73
5.1.2	Potência .....	73
5.1.3	Tempo de Resposta .....	76
5.1.4	Conclusões sobre as eletroválvulas caracterizadas .....	82
5.2	Bancada adaptada .....	83
5.2.1	Circuito de acionamento e instalação das eletroválvulas .....	83
5.2.2	Caracterização da sonda Hall .....	84
5.3	Sincronização dos escoamentos com o campo magnético.....	86
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de refrigeração são desenvolvidas para realizar o controle térmico de um dado ambiente abaixo da temperatura do meio externo. Suas aplicações são vastas e permeiam tanto o âmbito doméstico quanto industrial, mostrando-se de fundamental importância na sociedade moderna. A climatização de ambientes, conservação de alimentos e controle de processos são apenas alguns dos muitos exemplos da utilidade da refrigeração.

Atualmente, a grande maioria dos sistemas de refrigeração emprega a técnica de compressão mecânica de vapor, sendo essa uma forma de refrigeração bem estabelecida, moderna e bem sucedida. No entanto, a utilização de substâncias agressivas ao meio ambiente, como alguns tipos de fluidos refrigerantes, passou a ser questionada devido a seus efeitos sobre o aquecimento global e destruição da camada de ozônio.

Nesse contexto, tecnologias alternativas para refrigeração a temperatura ambiente passaram a ser estudadas em busca de solucionar este problema, sendo uma delas a refrigeração magnética (BROWN, 2014), que substitui o fluido refrigerante por substâncias no estado sólido. O funcionamento deste sistema é baseado no efeito magnetocalórico (EMC), que é a resposta térmica que alguns materiais magnéticos apresentam quando submetidos a uma mudança de campo magnético. Para uma classe particular desses materiais, o EMC se traduz em uma variação positiva na temperatura do material caso o campo magnético seja elevado e o mesmo esteja em condições adiabáticas. Nessas mesmas circunstâncias, a redução do campo magnético produz uma variação negativa da temperatura do material. Desta forma, o EMC pode ser caracterizado em termos de uma variação adiabática de temperatura, e cuja principal vantagem em termos de eficiência térmica é a reversibilidade termodinâmica que apresentam a maioria dos materiais magnetocalóricos conhecidos e em uso atualmente em refrigeradores magnéticos (NIELSEN; BAHL; SMITH, 2010).

Devido a este efeito, o material magnetocalórico é aplicado como uma matriz regeneradora de calor sujeita a ciclos de magnetização e desmagnetização, o qual é conhecido como regenerador magnético ativo (RMA), sendo o componente fundamental de um sistema de refrigeração magnética. Através do RMA, um fluido de trabalho é escoado de forma oscilatória, permitindo uma transferência de calor que será transmitida aos reservatórios térmicos. Esse fluido de trabalho pode ser água com algum aditivo anticorrosivo, de maneira que o refrigerador magnético elimine a possibilidade de contribuir à emissão de gases do efeito estufa, tornando esta tecnologia em uma das mais promissoras a substituir a compressão mecânica de

vapores em aplicações que operem em temperaturas em torno da temperatura ambiente (KITANOVSKI et al., 2015).

Diante dessa realidade, os Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica (POLO), em conjunto com a Empresa Brasileira de Compressores (Embraco), iniciaram um projeto de pesquisa em refrigeração magnética, o qual é chamado PoloMag. Este projeto de pesquisa visa desenvolver uma adega de vinhos doméstica operada por um sistema de refrigeração magnética compacto e silencioso, com um consumo energético análogo ao de uma adega doméstica convencional.

O grupo PoloMag inicialmente era composto apenas por estudantes do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Porém, o surgimento de desafios com a substituição de equipamentos de funcionamento puramente mecânicos por equipamentos de acionamento eletrônico e que necessitam de um controle de acionamento, abriu a oportunidade de participação de estudantes do curso de Engenharia de Controle e Automação no projeto, proporcionando assim o desenvolvimento do presente Projeto de Fim de Curso (PFC).

## 1.1 Motivação

Para promover o escoamento oscilatório requerido na refrigeração magnética são comumente empregadas associações bomba-pistão e válvulas de retenção (TREVIZOLI, 2015; TURA; ROWE, 2011) ou bomba rotativa e válvulas direcionais (ENGELBRECHT et al., 2012; JACOBS et al., 2014; HIRANO et al., 2010; APREA et al., 2014; LOZANO, 2015; NAKASHIMA, 2017) . Dentre os tipos de válvulas direcionais destacam-se as válvulas rotativas, cujo princípio mecânico de acionamento permite que um mesmo sistema de transmissão mecânico promova a rotação (acionamento) sincronizada tanto dos ímãs permanentes quanto das válvulas. No entanto, tem-se demonstrado que o consumo energético das válvulas rotativas pode ser elevado (CAPOVILLA et al. 2016).

Uma outra solução para realizar os escoamentos alternativos num refrigerador magnético foi aquela proposta por Ericksen et al. (2015), que aplicaram válvulas de assento comandadas por cames acionados mecanicamente em sincronia com a rotação dos ímãs permanentes. Apesar de esta solução ter-se mostrado eficiente e de baixo consumo energético, novos desenvolvimentos da tecnologia indicam que a flexibilidade na seleção do perfil de variação temporal do escoamento é um atributo desejado em sistemas de RMA (NAKASHIMA, 2017; TEYBER et al., 2016). Além disso, o sistema hidráulico, composto especialmente pelo conjunto bomba e válvula, deve garantir que a quantidade de massa deslocada em cada etapa seja

a mesma a fim de evitar problemas de balanceamento de massa (NAKASHIMA, 2017; TEYBER et al., 2016).

Nesse sentido, Cardoso et al. (2016) propuseram a utilização de válvulas direcionais solenoides, cujo controle eletrônico permitiria o ajuste da duração de cada etapa de escoamento, flexibilizando assim a seleção do perfil temporal da vazão e permitindo a correção de possíveis desbalanceamentos de massa (NAKASHIMA, 2017).

## 1.2 Breve Descrição do Problema

A substituição de válvulas acionadas mecanicamente por eletroválvulas em um sistema de refrigeração magnética implica na necessidade de um circuito eletrônico e uma lógica de acionamento dessas válvulas capaz de sincronizar os escoamentos com o campo magnético nos RMAs.

Além disso, é preciso dimensionar corretamente as eletroválvulas a serem utilizadas em um sistema de refrigeração magnética, de modo a evitar um consumo elétrico elevado ou uma perda de carga excessiva, e que consigam trabalhar na frequência do ciclo de RMA desejada.

## 1.3 Objetivos

Como parte de um projeto de pesquisa que visa desenvolver um refrigerador magnético compacto no POLO, foi proposto para este PFC substituir o sistema de válvulas rotativas utilizadas em uma bancada experimental de avaliação do desempenho termodinâmico de RMAs, a qual foi desenvolvida por Trevizoli (2015) e Nakashima (2017), por um sistema de eletroválvulas. Para tal, é necessário desenvolver um sistema de acionamento de eletroválvulas que permita realizar os escoamentos alternativos através de um RMA em sincronia com a rotação de um circuito magnético, com baixo consumo energético e com flexibilidade na variação temporal dos escoamentos. Este sistema de sincronização deve ser projetado para operar de forma confiável e com a versatilidade necessária para permitir o estudo de diferentes formas de perfil hidráulico em sincronização com o campo magnético.

Para atingir esse objetivo geral foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar experimentalmente eletroválvulas comerciais e potenciais candidatas para serem adaptadas a um RMA;
- Projetar um circuito de acionamento de eletroválvulas e um sistema de medição de campo magnético confiáveis e de baixo consumo energético;
- Adaptar um *manifold* de eletroválvulas e seu respectivo sistema de acionamento à uma bancada de avaliação de RMA;

- Implementar a lógica de acionamento desse *manifold* de eletroválvulas para permitir a sincronização do escoamento com o campo magnético e a flexibilidade na variação do tempo dos escoamentos.

#### 1.4 Técnicas e Métodos Utilizados

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira delas foi realizada a caracterização experimental de duas eletroválvulas comerciais e possíveis candidatas a serem adaptadas na bancada experimental do RMA. Numa segunda etapa foi realizada a instalação de um *manifold* de eletroválvulas, que substituiu as válvulas rotativas, além do desenvolvimento de um sistema de controle de acionamento de baixo consumo energético e alta versatilidade para realizar os escoamentos alternativos pelo RMA em sincronia com o campo magnético.

Primeiramente, baseado no trabalho de Cardoso et al. (2016), foi planejada a avaliação de diferentes tipos de eletroválvulas para o sistema protótipo. Para isso, uma bancada de avaliação de válvulas foi desenvolvida por Cardoso et al. (publicação em preparação) para o teste de diferentes tipos de eletroválvulas e para a validação de um modelo matemático que permite simular o sistema hidráulico de um refrigerador magnético. Através dessa bancada experimental é possível caracterizar o comportamento hidráulico e elétrico de diferentes tipos de eletroválvulas sob diversas condições de operação. Portanto, numa etapa inicial deste trabalho foi realizada neste aparato uma caracterização experimental de eletroválvulas comerciais em termos dos tempos de resposta, perda de carga e o consumo energético. Esta bancada experimental já contava com um circuito de acionamento de válvulas do tipo relés que garantia a operação das eletroválvulas, porém, devido à ausência do circuito magnético, não era necessário o desenvolvimento de uma lógica de acionamento em sincronia com a variação de campo magnético sobre o RMA.

A diferença da etapa inicial, a adaptação de um RMA, que conta com a presença de um circuito magnético, requer um controle do acionamento das eletroválvulas através da medição de posições relativas do campo magnético no ciclo. Para o desenvolvimento do sistema de medição do campo magnético, foram investigados no presente trabalho os possíveis sensores de campo disponíveis no mercado, e selecionado um sensor de Efeito Hall. A lógica de controle do acionamento das eletroválvulas foi implementada via *software* LabVIEW 2010 e se assemelha a um controle em malha aberta, tendo como variáveis de entrada a medição do campo magnético e a fração de escoamento, e como variáveis de saída os tempos de escoamentos. Já para o desenvolvimento do circuito de acionamento das eletroválvulas, além do



estudo dos possíveis componentes eletrônicos capazes de chavear as válvulas, foram implementadas simulações no software Proteus 7 para obter informações sobre os possíveis circuitos, e assim poder optar pelo que obteve o melhor desempenho.

Os resultados mostraram que o uso de eletroválvulas permite uma grande flexibilidade na operação e sincronização de um refrigerador magnético, e com um menor consumo de energia. Para o grupo PoloMag essas características alcançadas facilitarão estudos futuros e proporcionarão uma melhor eficiência para o refrigerador magnético em desenvolvimento.

### **1.5 Organização do Documento**

Esta monografia está dividida da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta a tecnologia de refrigeração magnética, as bancadas utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho e os possíveis componentes eletrônicos para o acionamento das eletroválvulas. No Capítulo 3 é feita a descrição do problema a ser tratado no presente trabalho e os requisitos técnicos a serem atendidos pelo sistema proposto. No Capítulo 4 a solução proposta é descrita e a metodologia utilizada é apresentada. O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados obtidos. E, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.



## 2 REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA E ACIONAMENTO DE ELETROVÁLVULAS

Este capítulo tem por finalidade apresentar a tecnologia de refrigeração magnética na qual este trabalho está inserido, as bancadas experimentais utilizadas e as alternativas de componentes eletrônicos atualmente existentes no mercado para o acionamento de eletroválvulas. Na Seção 2.1, serão fornecidos os conhecimentos teóricos fundamentais de funcionamento de um refrigerador magnético, com o objetivo de o leitor entender os requisitos que um novo sistema de controle de eletroválvulas deve atender para permitir um aumento na eficiência e na flexibilidade de sistemas já desenvolvidos com esta tecnologia. Nas Seções 2.2 e 2.3, serão apresentadas em detalhe as bancadas experimentais de RMAs e de eletroválvulas, respectivamente, trazendo seus objetivos, funcionamento e componentes. Por último, na Seção 2.4, são apresentados dois tipos de circuito de acionamento de eletroválvulas que podem ser construídos para operar um refrigerador magnético, com destaque para suas vantagens e desvantagens na prática.

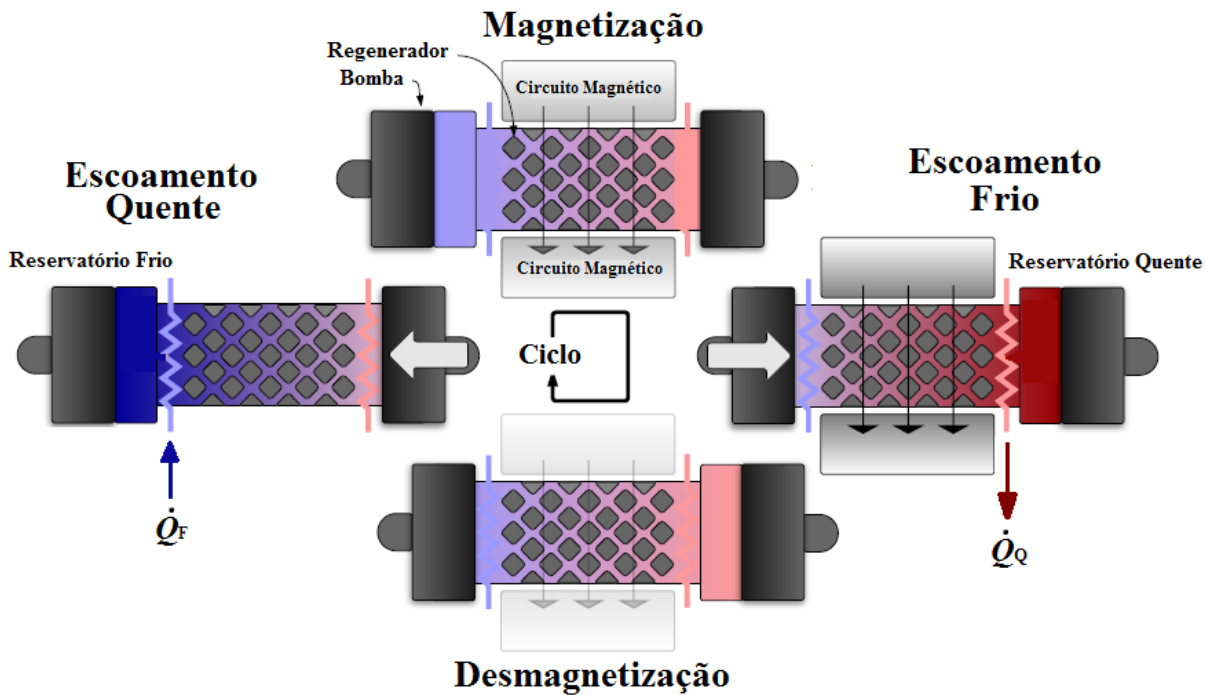
### 2.1 Refrigeração Magnética

O principal desafio da refrigeração magnética é a limitação da diferença de temperatura que pode ser estabelecida entre os reservatórios térmicos ( $\Delta T_{\text{span}}$ ) devido às baixas amplitudes da variação adiabática de temperatura ( $\Delta T_{\text{ad}}$ ) no material sólido refrigerante, proporcionada pelo efeito magnetocalórico (EMC). Para um material de referência como o Gadolínio (Gd), a  $\Delta T_{\text{ad}}$  é de cerca de 2 a 3 K para uma variação de 1 T de campo magnético (BAHL; NIELSEN, 2009). Para superar essa restrição, o material magnetocalórico é aplicado como uma matriz regeneradora de calor conhecida como regenerador magnético-ativo (RMA).

Para compreender o modo de funcionamento de um sistema de refrigeração magnética baseado em RMAs, a Figura 2.1 apresenta o diagrama esquemático dos principais componentes e do ciclo de refrigeração magnética padrão. Nesta figura, é representado o regenerador que contém o material magnetocalórico que será magnetizado e desmagnetizado pelo circuito magnético, alterando sua temperatura interna, indicada por meio da variação de cor das imagens entre as etapas do ciclo. Além disso, é representado o circuito magnético e como ele atuará entre as etapas. A bomba hidráulica proporciona os escoamentos frio e quente através do RMA em direção aos reservatórios quente e frio, respectivamente, conforme indicado pelas setas brancas da Figura 2.1. No reservatório quente é realizada a rejeição de calor sensível a uma taxa  $\dot{Q}_Q$  e no reservatório frio é realizada a absorção de calor sensível a uma taxa  $\dot{Q}_F$ .<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ao longo do trabalho, o símbolo "  $\dot{\phantom{x}}$  " significa derivada em relação ao tempo.

Figura 2.1 - Processos de um ciclo termomagnético de Brayton aplicado a um regenerador magnético ativo.



Fonte: Adaptado de Trevizoli (2015).

O ciclo de refrigeração magnética padrão, apresentado na Figura 2.1, é baseado no chamado ciclo termomagnético de Brayton, cujas etapas são (ROWE et al., 2005):

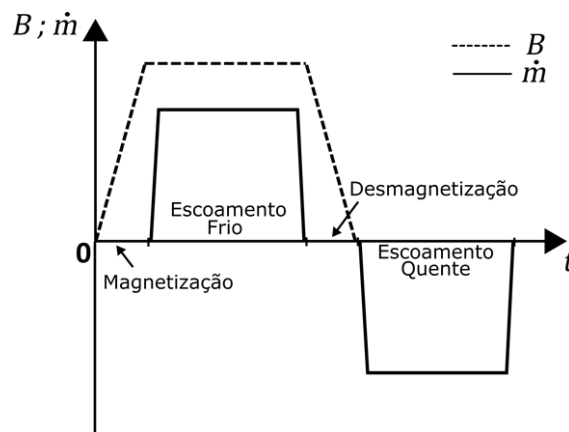
- *Magnetização adiabática*: etapa na qual o material magnetocalórico, inicialmente a uma determinada temperatura e mantido em condição adiabática, é submetido a uma variação instantânea e positiva do campo magnético externo, induzindo assim um aumento de temperatura do refrigerante sólido de  $\Delta T_{ad}$  devido ao EMC;
- *Escoamento frio*: Após o aquecimento do material magnetocalórico, um fluido de trabalho auxiliar, em geral uma mistura de água e anti-congelante, de massa  $m$  e proveniente do reservatório frio, é bombeado através do regenerador. A matriz sólida é resfriada ao ceder calor ao fluido, que é aquecido a uma temperatura maior que a do reservatório quente, possibilitando a interação térmica entre eles e a rejeição de calor sensível a uma taxa  $\dot{Q}_Q$ . Assim, nesse sistema, o refrigerante sólido não entra em contato direto com os reservatórios térmicos;
- *Desmagnetização adiabática*: novamente em condições adiabáticas, o refrigerante sofre uma redução na sua temperatura de  $\Delta T_{ad}$ , resultado da variação instantânea e negativa do campo magnético externo;
- *Escoamento quente*: o fluido de trabalho proveniente do reservatório quente é bombeado através do regenerador no sentido oposto ao da etapa de escoamento frio. A matriz regene-

rativa mais fria é aquecida ao absorver e armazenar calor do fluido. Como consequência, o fluido de trabalho é resfriado a uma temperatura abaixo da temperatura da fonte fria, possibilitando a absorção de calor sensível, sendo esta a capacidade de refrigeração  $\dot{Q}_F$  do sistema.

### 2.1.1 Sincronização hidráulico-magnética

Em termos temporais, a variação de campo magnético aplicado  $B$  e a vazão mássica  $\dot{m}$  do fluido de trabalho através do regenerador nas quatro etapas do ciclo de um RMA, são apresentadas na Figura 2.2. Os períodos de magnetização / desmagnetização da figura, correspondem a magnetização e desmagnetização ilustradas na Figura 2.1. O escoamento frio é sincronizado para que ocorra durante o período de magnetização, permitindo a absorção de calor sensível do regenerador e a rejeição de calor no reservatório quente. Já o escoamento quente, é sincronizado para que ocorra durante o período de desmagnetização, permitindo a rejeição de calor sensível com o regenerador e a absorção de calor no reservatório frio. Sinais opostos da vazão indicam escoamentos em sentidos opostos na Figura 2.2. O inverso do período de duração desse ciclo representa a frequência do ciclo, que juntamente com a vazão mássica é um dos principais parâmetros de operação de um RMA.

Figura 2.2 - Representação da sincronia entre campo magnético e vazão mássica durante o ciclo de refrigeração magnética



Fonte: Elaborado pela Autora.

Os componentes básicos empregados para a realização dessas variações temporais são o circuito hidráulico formado por uma bomba e um conjunto de válvulas, que garantem a vazão de fluido nos RMAs no sentido requerido para cada etapa de escoamento, e o circuito magnético, composto por um arranjo de ímãs permanentes que garantem um valor fixo de campo magnético em sua seção útil, denominada de vão magnético. Desta forma, para que o RMA

experimente uma variação de campo magnético, como a apresentada na Figura 2.2, é necessário que exista um movimento relativo entre ímãs e regenerador. A solução mais adotada é manter o regenerador fixo dentro do vão magnético enquanto a rotação dos ímãs modifica o valor de campo magnético aplicado ao RMA (TREVIZOLI, 2015).

A sincronização entre o circuito hidráulico e o circuito magnético em um refrigerador magnético é fundamental para o seu funcionamento e eficiência geral do equipamento. Na próxima seção, é apresentada uma bancada experimental que foi modificada durante este trabalho com o objetivo de realizar essa sincronização por meio do uso de eletroválvulas.

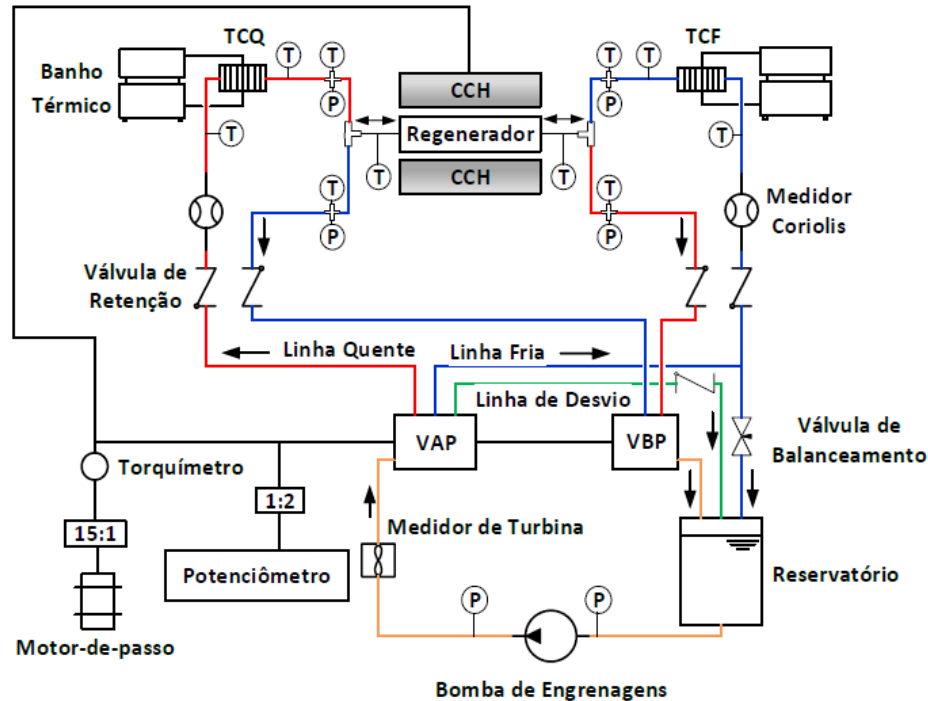
## 2.2 Bancada experimental de RMA

A bancada experimental de RMA foi desenvolvida por Trevizoli (2015) e adaptada por Nakashima (2017). O objetivo da bancada é possibilitar a obtenção de dados de calor transferido aos reservatórios e potências fornecidas ao sistema durante o seu funcionamento, para assim avaliar seu desempenho. A Figura 2.3 mostra esquematicamente os principais componentes da bancada operando ainda com as válvulas rotativas e antes de ser alterada neste trabalho para sua operação com eletroválvulas.

O funcionamento da bancada inicia-se quando a bomba de engrenagens é ligada e começa a bombear fluido (20% de etileno-glicol e 80% de água destilada em volume) alternativamente por meio das válvulas rotativas através da linha quente, da linha fria ou da linha de desvio – essa última é utilizada nos momentos em que não se deseja escoamento no regenerador. Em seguida o motor de passo é ativado, rotacionando o conjunto de cilindros concêntricos de Halbach (CCH) – responsável por garantir as variações de campo magnético sobre o RMA – e o conjunto de válvulas rotativas – responsável por alternar os escoamentos. Devido à essa sincronia entre as válvulas e o CCH, quando este último fornece valores de campo magnético ( $B$ ) altos sobre o RMA, o escoamento se dá no sentido do reservatório frio para o quente (escoamento frio), e quando  $B$  é baixo o escoamento se dá no sentido contrário (escoamento quente).

O regenerador magnético ativo utilizado nesta bancada é um meio poroso composto por esferas de Gd, com diâmetros na faixa de 0,5 a 0,6 mm, compactadas em uma carcaça cilíndrica de fibra de vidro (G10) com 22,22 mm de diâmetro interno, 100 mm de comprimento e 1,65 mm de espessura de parede. Ele ocupa quase integralmente o vão magnético criado no centro do circuito magnético. O RMA é atravessado por um escoamento oscilatório que permite a transferência de calor entre sólido e fluido.

Figura 2.3 - Diagrama hidráulico esquemático da bancada experimental de RMA. Componentes da transmissão e do circuito magnético (CCH) também podem ser visualizados. TCQ e TCF são os trocadores de calor quente e frio, respectivamente. T e P são transdutores de temperatura e pressão. VAP e VBP são, respectivamente, as válvulas rotativas de alta e baixa pressão. Setas indicam sentido do escoamento.

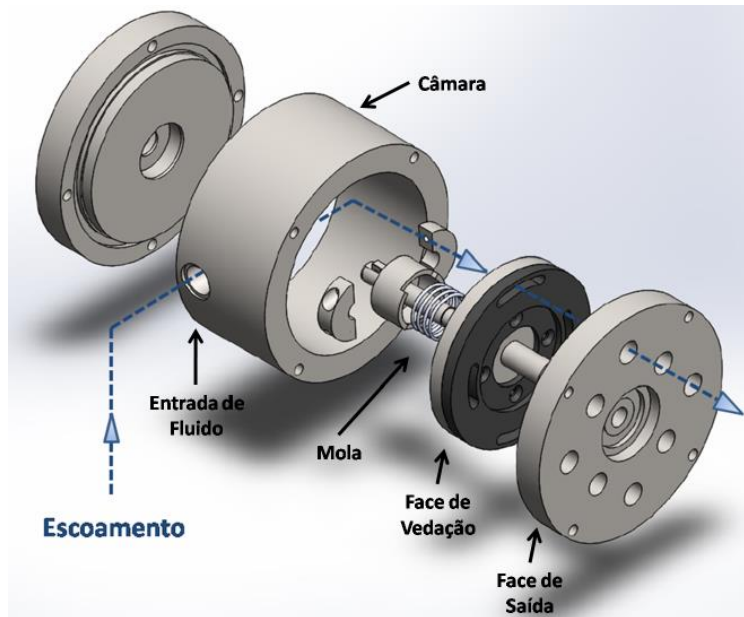


Fonte: Nakashima (2017).

O circuito hidráulico empregado na bancada possui um conjunto bomba-motor que garante escoamento pelo sistema. O escoamento é direcionado pelas linhas hidráulicas através da válvula rotativa de alta pressão e de baixa pressão. A válvula de alta pressão (VAP) é responsável por receber fluido proveniente da bomba e definir qual das linhas do regenerador ou se a linha de desvio será ativada, habilitando assim a entrada desejada e vedando as demais. Já a válvula de baixa pressão (VBP) recebe o fluido vindo do regenerador e o retorna para o reservatório. A VAP é composta por uma câmara, faces de vedação e de saída e uma mola de compressão, conforme apresentado na Figura 2.4. Caso deseja-se mudar o padrão de escoamento entre as linhas, é necessária a desmontagem da válvula VAP para a troca da face de vedação, pois é através dos oblongos nela existentes que é determinada a fração de escoamento pela linha principal.

A bancada experimental de RMA possui um circuito magnético formado por um arranjo de cilindros concêntricos de Halbach, projetado seguindo a metodologia de otimização apresentada em (TREVIZOLI et al., 2015). A associação de dois cilindros de Halbach em uma configuração concêntrica permite que o campo magnético gerado pelos ímãs varie entre um valor mínimo e máximo, de acordo com a contra-rotação dos cilindros. O campo máximo e o

Figura 2.4 - Vista explodida de uma válvula rotativa de alta pressão.



Fonte: Nakashima (2017).

campo mínimo gerado pelo ímã são os momentos de magnetização do ciclo de um RMA, ou seja, em um giro de  $360^\circ$  do ímã ocorrem dois ciclos completos de RMA.

A Figura 2.5 mostra o perfil da intensidade máxima das componentes do campo magnético e a resultante sobre o RMA. A região cinza escura representa o arranjo do cilindro externo com o interno, e a região cinza clara é a estrutura de suporte. Na região do regenerador ( $-50 \leq z \leq 50$  mm), a intensidade do campo magnético é maior do que 1,3 T. Após o término do arranjo de ímãs, o campo magnético diminui continuamente até 0 T em aproximadamente  $z = 137,5$  mm. As limitações que essa distribuição do campo magnético ao longo do eixo  $z$  pode trazer ao presente projeto serão apresentadas em detalhe no próximo capítulo.

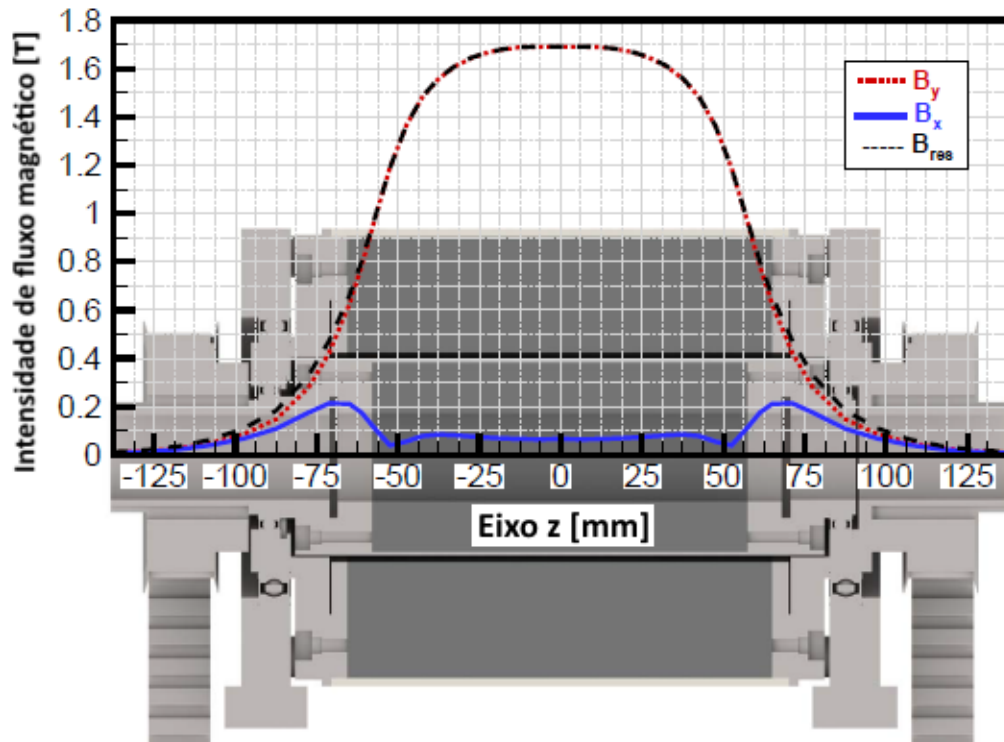
A sincronização entre o circuito magnético e o circuito hidráulico é realizada através de um motor de passo acoplado a uma caixa de engrenagem de redução 15:1 que move tanto o CCH como a VAP e a VBP, conforme apresentado na Figura 2.6. Além disso, um terceiro eixo de saída dessa caixa de engrenagem é utilizado para acionar um potenciômetro linear. A resistência variável do potenciômetro juntamente com um divisor de tensão proporciona um valor de tensão proporcional ao campo magnético aplicado ao RMA ao longo do tempo, podendo assim calcular a frequência de operação do RMA. O controle de frequência de rotação do motor é garantido pelo uso de um driver Applied Motion modelo ST10.

O posicionamento relativo entre o CCH e as válvulas rotativas foi ajustado tendo como base a posição de campo magnético máximo. O potenciômetro, por sua vez, foi posicionado na metade de seu curso, tendo em vista que cada curso realizado representa uma etapa de es-



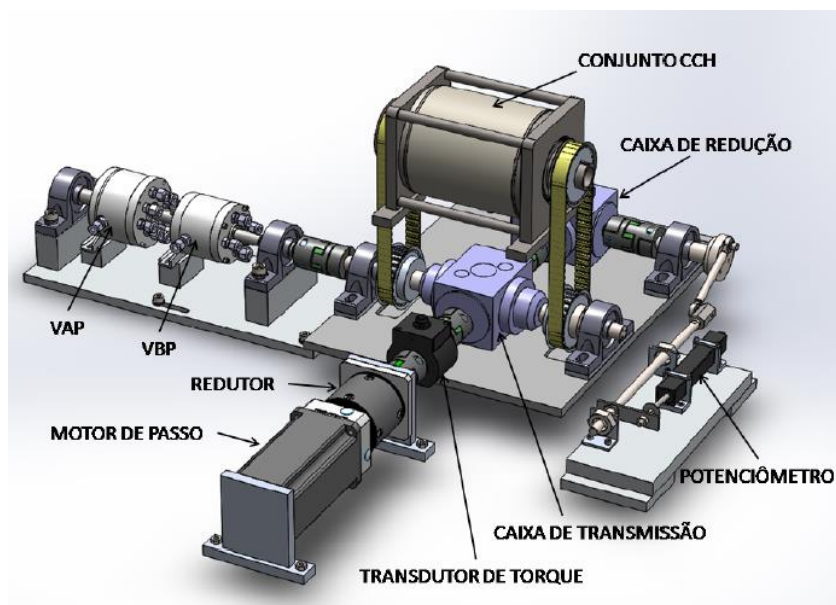
coamento. Ambos retornam uma relação 2:1 entre o número de ciclos magnéticos realizados e a frequência de rotação do eixo motriz. A Figura 2.7 apresenta o sincronismo de projeto entre campo magnético, vazão mássica e posição do potenciômetro.

Figura 2.5 - Magnitude das componentes e resultante da intensidade do fluxo magnético na posição de campo máximo ao longo do eixo z.



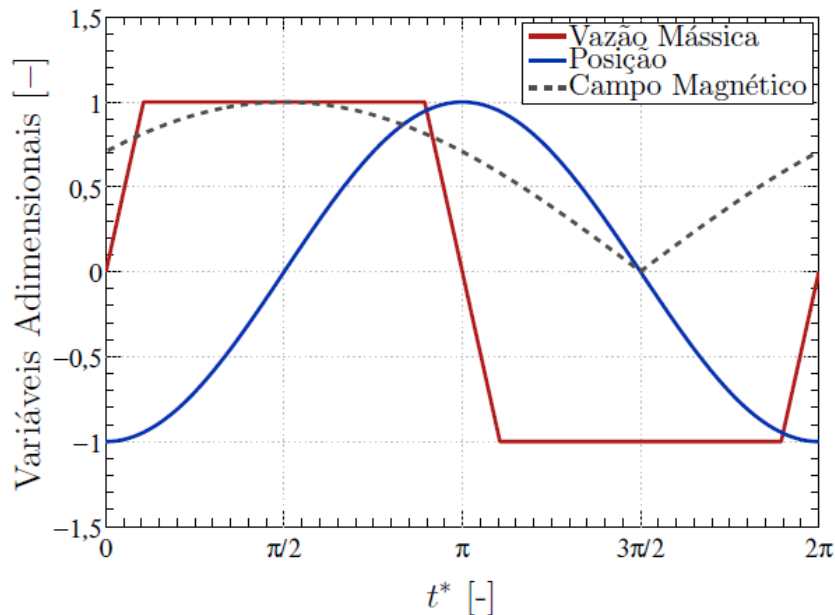
Fonte: Adaptada de Trevizoli (2015).

Figura 2.6 - Sistema de transmissão da bancada.



Fonte: Nakashima (2017).

Figura 2.7 - Perfis de campo magnético, escoamento e posição de um sistema ideal e sincronizado.



Fonte: Nakashima (2017).

O sistema de aquisição utilizado para obter as informações necessárias para avaliar o desempenho do RMA é composto pelos transdutores, os quais são representados no esquemático da Figura 2.3, um sistema de aquisição de dados da National Instruments e um computador equipado com um *software* elaborado através do LabVIEW 2009.

A temperatura do fluido é adquirida por 10 termopares Omega, localizados principalmente nas entradas e saídas do regenerador e próximos aos trocadores de calor, que foram calibrados com um termômetro de referência. A vazão do sistema durante os diferentes escoamentos é medida através de dois medidores de vazão Coriolis da Kronel, que não precisaram ser calibrados. O medidor de vazão turbina Sponsler é utilizado para medir a vazão fornecida pela bomba-motor e a sua calibração foi realizada por meio dos medidores de vazão do tipo Coriolis devido à sua baixa incerteza. As pressões na entrada e na saída dos regeneradores e na bomba são medidas por transdutores de pressão Omega, que foram calibrados com o auxílio de um testador de peso morto DH Bundenberg.

Os equipamentos de aquisição de dados da National Instruments utilizados na bancada experimental RMA são o Chassi SCXI-1001, a placa NI PCI-6289, um adaptador SCXI 1349, dois módulos de temperatura SCXI-1112, um módulo de tensão SCXI-1102 e um bloco terminal SCXI-1303.

Durante os experimentos já realizados na bancada experimental de RMA com válvulas rotativas, foi notado um grande consumo energético e dificuldade na seleção de frações de

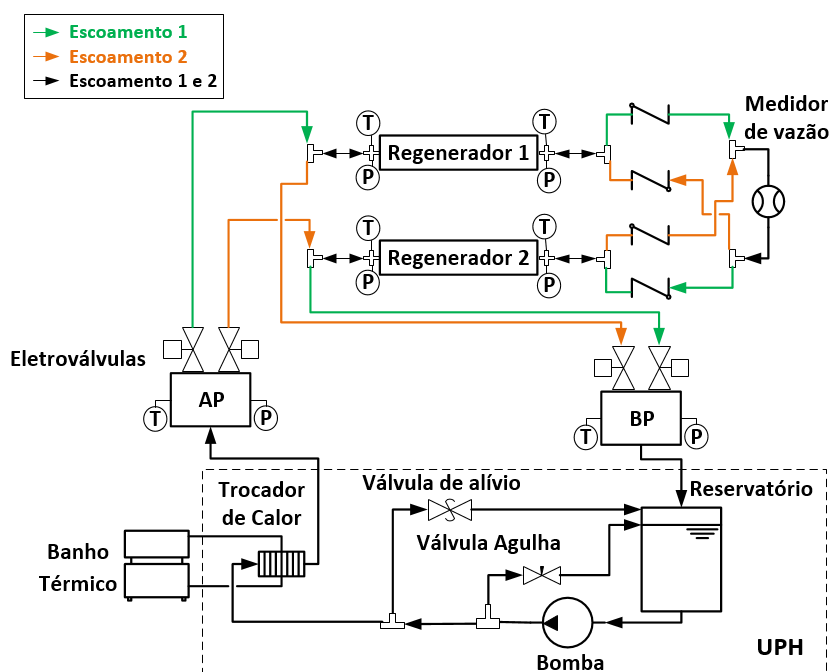
escoamentos por parte das válvulas. Além disso, devido ao acoplamento mecânico entre válvulas e o ímã, a transmissão do torque oscilatório do circuito magnético resulta em alterações nos períodos de escoamento, causando desbalanceamento de massa entre escoamentos (NAKASHIMA, 2017). Diante dessa situação, a substituição das válvulas rotativas por eletroválvulas buscará melhorar esses pontos elencados.

Na próxima seção será apresentada a bancada experimental utilizada durante esse trabalho para obter características de algumas eletroválvulas, possibilitando a escolha de um conjunto de eletroválvulas para substituir as válvulas rotativas na bancada experimental de RMA.

### 2.3 Bancada experimental de eletroválvulas para refrigeração magnética

A bancada experimental para teste de eletroválvulas para refrigeração magnética foi desenvolvida por Cardoso (2017) durante seu trabalho de mestrado. Ela é considerada uma bancada unitária e passiva por conter só um par de regeneradores, que é o número mínimo para permitir escoamentos unidirecionais pelos trocadores de calor, e por não ser equipada com um circuito magnético. O objetivo desta bancada é possibilitar a avaliação do desempenho hidráulico de diferentes tipos de eletroválvulas visando sua aplicação em um sistema com RMAs e a validação de um modelo matemático do sistema hidráulico de um RMA. A Figura 2.8 mostra esquematicamente os principais componentes hidráulicos da bancada e do modelo.

Figura 2.8 - Diagrama hidráulico esquemático da bancada experimental de eletroválvulas para RMA. UPH é a unidade de potência hidráulica. T e P são transdutores de temperatura e pressão, respectivamente. AP é o *manifold* de alta pressão e BP é o *manifold* de baixa pressão. O banho térmico é o responsável por manter a temperatura do fluido em 20°C na saída da UPH para o sistema. Setas indicam sentido do escoamento.



Fonte: Adaptada de Cardoso et al. (publicação em preparação).

O funcionamento da bancada inicia-se quando a unidade de potência hidráulica (UPH) é ligada, fornecendo vazão do fluido de trabalho, neste caso água destilada, a uma pressão de suprimento ( $P_S$ ) constante para o *manifold* de válvulas de alta pressão (AP), e a uma temperatura constante devido ao banho térmico. Esses valores podem ser alterados ao ajustar uma válvula agulha ou a frequência do motor que aciona a bomba hidráulica. Em seguida é realizado o acionamento das válvulas via *software*, onde um dos pares de válvulas é aberto, permitindo o escoamento entre os regeneradores em um sentido e, ao realizar a troca de abertura entre os pares, o escoamento ocorre no sentido oposto. Os dois possíveis escoamentos são ilustrados na Figura 2.8.

A bancada está instrumentada com transdutores de pressão, temperatura, potência e vazão, conforme indicado na Figura 2.8. A partir do aferimento através destes transdutores, operando em regime permanente e transiente (chaveando as eletroválvulas), são obtidas informações das eletroválvulas tais como: coeficiente de vazão, tempos de respostas para abertura e fechamento, potência consumida, vazão proporcionada em um circuito RMA, entre outras características.

Por ter como foco a avaliação hidráulica, esta bancada não possui um circuito magnético e os regeneradores são empacotados com esferas de aço inoxidável de 0,5 mm de diâmetro, que emulam a perda de carga que ocorreria em RMAs preenchidos comumente por esferas de Gd.

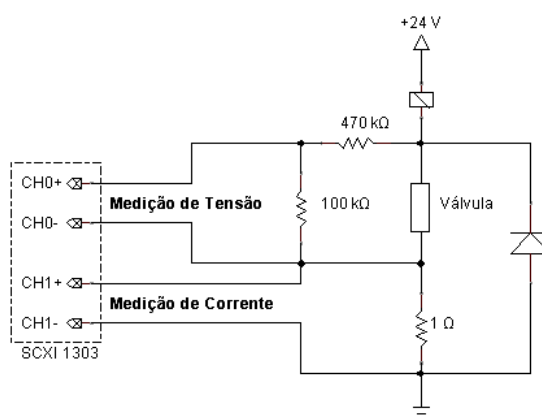
A UPH mostrada na Figura 2.8 possui uma bomba hidráulica acionada por um motor da WEG, no qual é possível ajustar sua frequência de operação, permitindo definir a vazão e pressão de suprimento do sistema. O escoamento é direcionado por eletroválvulas posicionadas no bloco *manifold*. Este bloco divide as válvulas em dois conjuntos – duas válvulas de alta pressão e duas válvulas de baixa pressão. O acionamento dessas válvulas nesta bancada ocorre em pares associados a cada regenerador, sendo os pares formados por uma válvula de alta pressão (AP) e outra de baixa pressão (BP). Caso deseje-se alterar o tempo de duração dos escoamentos, apenas é necessário alterar o tempo em que as válvulas permanecem abertas via *software*. O acionamento elétrico das válvulas nesta bancada experimental é realizado por meio do módulo de relés da National Instruments (SCXI 1161).

O sistema de aquisição utilizado para obter as informações necessárias para avaliar o desempenho hidráulico e eletrônico das eletroválvulas através dos transdutores é um sistema de aquisição de dados da National Instruments e um computador equipado com um software elaborado através do LabVIEW 2009. O sistema de aquisição de dados desta bancada é equi-

pado com um chassi SCXI-1000, uma placa NI PCI-6259, um cabo SHC68-68-EPM, um adaptador SCXI-1349, um módulo de tensão SCXI-1102B e um bloco terminal SCXI-1303.

A temperatura do fluido é adquirida por 8 (oito) termopares tipo T da Omega, que foram calibrados com um termômetro de referência. A vazão do sistema é medida através de um medidor de vazão do tipo Coriolis da Siemens, que não houve necessidade de ser calibrado. As pressões na entrada e saída de cada regenerador, pressão de suprimento e pressão de reservatório são medidas através de transdutores de pressão da Omega, que não necessitaram de calibração. A potência consumida pelas eletroválvulas é medida de forma indireta através de um circuito que mede a tensão e a corrente aplicada sobre elas. Este circuito é apresentado na Figura 2.9 e foi calibrado com uma fonte regulada de tensão de alta precisão. Mais detalhes sobre o circuito serão apresentados na Seção 4.2.1.

Figura 2.9 - Circuito para medir potência das válvulas indiretamente



Fonte: Elaborada pela Autora.

Para a utilização de eletroválvulas necessita-se um sistema de acionamento capaz de ligar e desligá-las nos momentos adequados. Na próxima seção serão apresentados alguns componentes eletrônicos que permitem realizar esses chaveamentos.

## 2.4 Acionamento de eletroválvulas

As eletroválvulas são geralmente acionadas por um circuito eletrônico capaz de interromper, estabelecer e conduzir corrente elétrica pelo circuito interno das válvulas de acordo com determinados sinais de controle. Para isso, se faz necessário o uso de componentes que funcionam como chaves. Idealmente, estas chaves, ao serem disparadas, chaveiam quase instantaneamente do estado ligado para desligado e vice-versa, requerendo uma potência de consumo do circuito de controle muito baixa e quase desprezível. Naturalmente, tais dispositivos possuem na prática certas limitações. Sendo assim, para o desenvolvimento deste trabalho foi

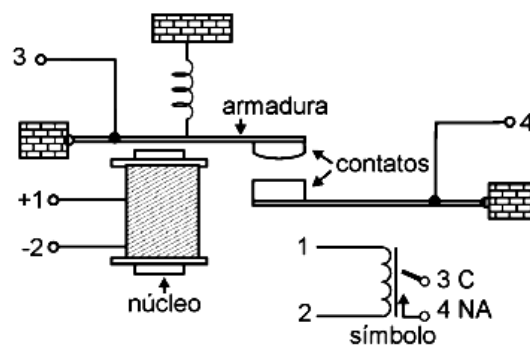
realizado o estudo de dois possíveis tipos de chaves que podem ser empregadas para o acionamento das eletroválvulas: relés e transistores, os quais são apresentados a seguir.

### 2.4.1 Relés

O relé é um dispositivo eletromecânico, formado basicamente por uma armadura móvel de metal ferroso, uma bobina, dois contatos metálicos e uma mola, como pode ser visto na Figura 2.10. Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica, um campo magnético é criado, o que provoca a atração da armadura, deslocando-a e unindo os contatos metálicos. Quando a corrente deixa de circular pela bobina do relé, o campo magnético criado desaparece e com isso a armadura volta à sua posição inicial pela ação da mola (BRAGA, 2012).

O propósito de um relé é o controle de um circuito externo, funcionando como uma chave, ligando-o ou desligando-o. Através dele é possível controlar circuitos de correntes alternadas ou de altos valores a partir de baixas correntes no circuito de controle. Este circuito de controle muitas vezes necessita de outros componentes, como transistores, para conseguir acionar o relé. Outra característica importante dos relés é a segurança dada pelo isolamento do circuito, já que não existe contato elétrico entre o circuito da bobina e os circuitos de contato do relé.

Figura 2.10 - Estrutura simplificada de um relé. Os terminais 1 e 2 são os terminais da bobina. Os terminais 3 e 4 correspondem aos contatos.



Fonte: Braga (2012).

Uma especificação importante em certas aplicações é o tempo que o relé demora para abrir e fechar seus contatos, sendo tipicamente da ordem de milissegundos. Estes tempos determinam a frequência máxima em que o relé pode operar (BRAGA, 2012). Além disso, por ser um componente mecânico, o relé produz ruído sonoro e possui uma vida útil que está atrelada à quantidade de operações, ou seja, quanto maior sua frequência de operação, maior será seu desgaste. Devido a essas características, os relés são indicados para controle de circuitos independentes com tensão e correntes mais altas, e velocidade de comutação baixa.

### 2.4.2 Transistores

O transistor é um componente eletrônico capaz de funcionar como um comutador (chave eletrônica) ou como um dispositivo linear. Dentre diversos tipos de transistores que há no mercado, aqui são apresentados brevemente dois deles: o transistor de junção bipolar (BJT) e o transistor de campo metal-óxido-semicondutor, conhecido como MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*). Diferentemente dos relés, os transistores não são capazes de controlar correntes alternadas.

O transistor de junção bipolar é um dispositivo semicondutor composto por três regiões de semicondutores dopados (Base, Coletor e Emissor), separadas por duas junções p-n. O princípio do BJT é poder controlar a passagem de corrente entre as regiões coletor e emissor por meio da região chamada de base. Existem dois tipos de BJTs: NPN e PNP. A diferença entre eles consiste na polarização, onde o NPN é acionado por um sinal positivo e o PNP é acionado por um sinal negativo. Eles operam como chave quando se encontram na região de corte (chave aberta) ou na região de saturação (chave fechada). Normalmente, o transistor bipolar é encontrado funcionando como chave na configuração apresentada na Figura 2.11. O que controla a posição da chave desses transistores é a corrente de base. Se a corrente de base ( $I_B$ ) for zero, o transistor está em corte, não permitindo a passagem de corrente pelo coletor ( $I_C$ ) e por consequência a carga ( $R_C$ ) não é acionada. Por outro lado, se  $I_B$  for maior ou igual à corrente de base de saturação, o transistor satura permitindo a passagem da corrente  $I_C$ .

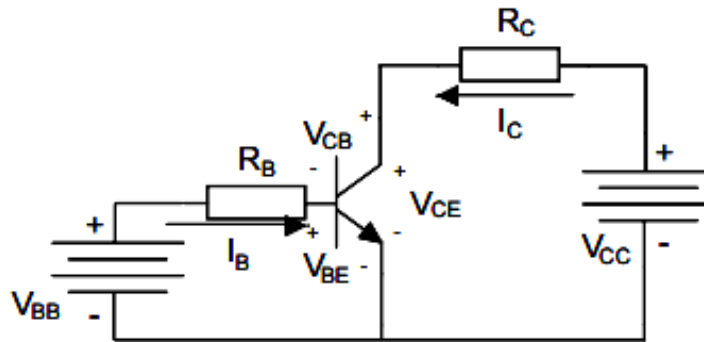
Portanto, a potência total dissipada ( $P_{BJT}$ ) por um transistor bipolar, como aquele apresentado na Figura 2.11, é dada por:

$$P_{BJT} = V_{BE} \cdot I_B + V_{CE} \cdot I_C, \quad (2.1)$$

onde  $V_{BE}$  é a tensão entre a base e o emissor, e  $V_{CE}$  é a tensão entre o coletor e o emissor. Porém, os parâmetros do BJT são sensíveis à temperatura de junção, podendo afetar a potência dissipada. Portanto, a temperatura ambiente e as resistências térmicas devem ser consideradas quando é realizada a interpretação das especificações dos dispositivos (RASHID, 2015).

Uma das principais limitações dos transistores bipolares é o baixo valor do ganho de corrente, o que coloca problemas ao circuito de comando da base, dificultando a passagem de corrente pelo coletor. O método clássico para contornar esse problema é a utilização de transistores *Darlington*, que são constituídos pela ligação de dois transistores NPN. Porém, essa configuração possui uma queda de tensão direta  $V_{CE}$  superior a de um só transistor, e a velocidade de chaveamento é mais reduzida.

Figura 2.11 - Transistor bipolar NPN operando como chave



Fonte: Rashid (2015).

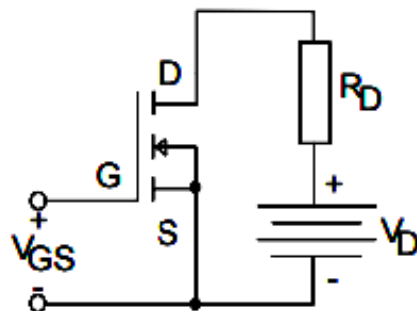
O transistor de potência MOSFET é composto de um canal de material semiconductor. Quando uma tensão é aplicada entre os terminais gate (G) e source (S), o campo elétrico gerado cria um condutor através do qual a corrente elétrica pode passar do dreno (D) para o source. Em consequência disso, o MOSFET é um dispositivo de tensão controlada que requer apenas uma pequena corrente de entrada. Uma vez ligado, sempre que uma tensão de disparo ( $V_{GS}$ ) for aplicada pelo circuito de controle, o MOSFET fechará o circuito de potência no sentido D-S. Ao fazer  $V_{GS}$  igual a zero, a chave abre-se e o acionamento da carga é interrompido. Isto é ilustrado na Figura 2.12.

A potência total dissipada por um transistor MOSFET ( $P_{MOSFET}$ ) pode ser resumida em:

$$P_{MOSFET} = D_{ciclo} \cdot R_{DS(ON)} \cdot I_{DS}^2, \quad (2.2)$$

onde  $D_{ciclo}$  é o ciclo de trabalho (adimensional e está compreendido entre 0 e 1),  $R_{DS(ON)}$  é a resistência entre o D e S quando o MOSFET está acionado (obtida por meio da folha de dados do fabricante), e  $I_{DS}$  é a corrente que passa pelos terminais D-S.

Figura 2.12 - Transistor MOSFET operando como chave



Fonte: Rashid (2015).



Para avaliar corretamente a escolha do tipo de chave que será usada para acionar uma eletroválvula, deve-se ter em mente que há um compromisso entre a frequência de chaveamento e a potência elétrica conduzida. Os transistores BJT possuem velocidade de chaveamento na casa dos microssegundos, os MOSFETs conseguem chavear na ordem de nanossegundos e os relés chaveiam em milissegundos. A energia necessária para controlar um relé pode ser bastante grande quando comparada àquela requerida por um transistor. Essas características devem ser levadas em conta no momento de decidir o acionamento de cargas. No presente trabalho, elas influenciarão a escolha do acionamento das eletroválvulas.

## **2.5 Conclusões**

A refrigeração magnética necessita de um sistema capaz de sincronizar o escoamento hidráulico com o campo magnético. O sincronismo utilizado na bancada experimental de RMA é baseado em válvulas rotativas que apresentam alguns pontos negativos, como alto consumo energético, baixa flexibilidade, e tendência ao desbalanceamento de massa entre escoamentos. Através de experimentos na bancada experimental de eletroválvulas será possível analisar diferentes tipos de eletroválvulas e determinar quais apresentam melhor desempenho para realizar o sincronismo de um RMA. Porém, para acionar essas eletroválvulas é preciso um circuito eletrônico que realize essa função, podendo empregar relés ou transistores.

Para realizar a substituição das válvulas rotativas por eletroválvulas na bancada experimental de RMA é necessário levar em conta certos requisitos e condições do sistema, os quais serão apresentados no próximo capítulo.



### 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E REQUISITOS TÉCNICOS

O presente capítulo tem como objetivo detalhar algumas características e considerações importantes referentes ao sistema que influenciarão os procedimentos para alcançar o objetivo geral do presente trabalho.

A sincronização do circuito hidráulico com o circuito magnético é indispensável para o funcionamento e eficiência da refrigeração magnética. O grupo PoloMag realiza estudos variando os perfis hidráulicos por meio do tempo de duração dos escoamentos, em busca de melhores desempenhos para o sistema. Desenvolver um sistema de acionamento de eletroválvulas proporcionará maior flexibilidade e facilidade para esses estudos. Além disso, deseja-se obter menores consumos quando comparado às válvulas rotativas.

A substituição de válvulas acionadas mecanicamente por eletroválvulas em um sistema de refrigeração magnética implica na necessidade de um circuito eletrônico e uma lógica de acionamento dessas válvulas capaz de realizar a sincronização.

O coeficiente de performance (COP) é um parâmetro fundamental na análise de sistemas de refrigeração, pois indica o desempenho do sistema. Define-se COP através da seguinte relação:

$$COP = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}}, \quad (3.1)$$

onde  $\dot{Q}_F$  é a capacidade de refrigeração do sistema e  $\dot{W}$  é a potência fornecida ao sistema. Ou seja, o COP é a capacidade de um sistema para retirar calor sobre a potência necessária para realizar tal função. Quanto maior o COP, melhor é o desempenho do sistema de refrigeração para uma determinada diferença de temperaturas entre as fontes quente e fria. Dada a importância disto, deseja-se obter um sistema de acionamento de eletroválvulas com o menor consumo possível e que mantenha a mesma ou aumente a capacidade de retirar calor.

A definição de quais eletroválvulas e qual circuito de acionamento usar na substituição das válvulas rotativas está diretamente relacionada ao COP. Para tal, se faz necessário conhecer as características das eletroválvulas, como perda de carga, potência consumida e tempo de resposta de abertura e fechamento, podendo assim, determinar qual daquelas disponíveis é a melhor para operar um RMA. Devido às desvantagens de operar um RMA com válvulas rotativas, o melhor ponto de operação do RMA não está definido, aguardando ainda a adaptação do sistema operando com eletroválvulas para se definir qual é a melhor frequência de operação de um RMA. Portanto, existe a necessidade de se conhecer a potência de consumo das eletroválvulas em função da frequência de operação. Além disso, o circuito de acionamento

das eletroválvulas deve possuir o melhor desempenho possível, seja em questão de consumo, tempo de resposta ou ruído.

Na sincronização dos escoamentos através do regenerador com o campo magnético aplicado nele, quando usadas eletroválvulas, é necessário um sistema capaz de medir o campo magnético em cada instante de tempo. O potenciômetro utilizado na bancada RMA, como mencionado no capítulo 2, permite detectar o perfil do campo magnético de forma indireta por meio da transmissão do movimento rotativo do sistema. No entanto, a sincronização entre a resposta do potenciômetro e a variação do campo magnético está sujeita a imprecisões no posicionamento de referência (calibração) e pode ser influenciada ao longo do tempo devido a desgastes do acoplamento mecânico. Nessa perspectiva, um estudo de sensores para medir diretamente o campo que está sendo aplicado ao RMA deve ser realizado.

O perfil da intensidade do campo magnético aplicado sobre o regenerador da bancada experimental de RMA, apresentado na Figura 2.5, traz certas limitações ao projeto do sistema de medição de campo. Como o regenerador e as conexões que permitem o escoamento através do mesmo ocupam aproximadamente o volume do vão magnético (de -75 a 75 mm no eixo  $z$ ), um sensor capaz de medir o campo magnético só poderá ser posicionado fora do vão magnético (acima de 75 mm no eixo  $z$ ). Deste modo, a magnitude do fluxo magnético captada pelo sensor será menor àquela que está atuando no RMA. Contudo, essa diferença de magnitude não é problema para o sistema de controle desde que o perfil medido seja o mesmo ao que o RMA está submetido. De acordo com a Figura 2.5, se o sensor for capaz de medir a componente  $B_y$  do campo nessa região (aquela paralela à direção do campo magnético aplicado no regenerador), ele obterá o mesmo perfil do campo magnético resultante, pois na região central eles possuem o mesmo comportamento. Diante dessas considerações, o sensor do sistema de medição de campo deve ser bem posicionado de modo a detectar apenas a componente  $B_y$ . Além disso, o sensor deve ser capaz de medir a intensidade do campo magnético na posição acima de 75 mm (campos menores a 0,4 T) sem atingir a saturação.

Alterar as válvulas rotativas por eletroválvulas na bancada de RMA implica também em alterações hidráulicas, elétricas, e no sistema de aquisição e controle da bancada. Essas alterações devem ser realizadas ao longo deste trabalho para alcançar os objetivos desejados.

A lógica de acionamento das eletroválvulas que permitirá a sincronização do perfil hidráulico com o campo magnético deve considerar os requisitos do projeto, entre eles: o usuário da bancada pode selecionar a fração de escoamento (FE) que ele gostaria que ocorresse durante o ciclo de RMA. Isso quer dizer, por exemplo, que caso o usuário selecione uma FE

de 50%, deverá ocorrer escoamento pelo regenerador durante 50% do período de magnetização e durante 50% do período de desmagnetização, centralizando esses escoamentos nos momentos de máxima magnetização e máxima desmagnetização. Como variáveis, o sistema de sincronização possui a FE, a intensidade do campo magnético e o tempo de resposta de abertura e fechamento das válvulas. Os tempos de respostas serão definidos através dos estudos das eletroválvulas e a FE será definida pelo usuário da bancada. Além disso, o *software* do controle deverá também apresentar os sinais dos transdutores na tela do computador e ser capaz de salvar esses dados para pós-processamentos.

Em resumo, os requisitos técnicos a serem atendidos para alcançar o objetivo geral, são:

- O sistema de eletroválvulas deve ser capaz de manter a mesma ou aumentar a capacidade de retirar calor quando comparado ao sistema com válvulas rotativas.
- É preciso conhecer a potência de consumo das eletroválvulas em função da frequência de operação.
- O circuito de acionamento das eletroválvulas deve ter um baixo consumo, rápido tempo de resposta e ruído inexistente.
- É preciso desenvolver um sistema capaz de medir diretamente o campo magnético em cada instante de tempo.
- O sensor de medição de campo deve ser bem posicionado de modo que detecte apenas a componente  $B_y$  do campo magnético aplicado ao RMA.
- O sensor de medição de campo deve ser capaz de medir a intensidade do campo magnético na posição acima de 75 mm do centro do ímã (intensidade de campo menor a 0,4 T) sem atingir a saturação.
- A lógica de acionamento deve considerar a fração de escoamento selecionada pelo usuário.
- O sistema de acionamento deve sincronizar os perfis hidráulicos com o campo magnético, ajustando os escoamentos para que sejam centralizados nos pontos máximos de magnetização e desmagnetização do ciclo de RMA.
- Os atrasos provocados pelos tempos de abertura e fechamento das eletroválvulas devem ser considerados na lógica de acionamento das eletroválvulas.

Dispondo dessas descrições e requisitos técnicos, no próximo capítulo serão apresentadas as etapas necessárias para alcançar o resultado esperado e como foram realizadas.



## 4 SOLUÇÃO PROPOSTA E METODOLOGIA UTILIZADA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os estudos, materiais e métodos utilizados para desenvolver um sistema de sincronização de escoamentos com o campo magnético em um RMA. Na Seção 4.1, serão apresentadas as possíveis eletroválvulas a serem instaladas na bancada experimental de RMA e os experimentos para a escolha e caracterização dessas válvulas. Já na Seção 4.2 será apresentado o estudo e escolha do circuito de acionamento das eletroválvulas. Na Seção 4.3, será detalhada como foi realizada a seleção do sensor capaz de medir o campo magnético. Para inserir na bancada experimental de RMA as eletroválvulas, o circuito de acionamento e o sensor de campo, foi necessário realizar adaptações e essas serão apresentadas na Seção 4.4. Por fim, na Seção 4.5, será apresentado o desenvolvimento da lógica de acionamento das eletroválvulas que proporcionará a sincronização dos escoamentos com a variação do campo magnético.

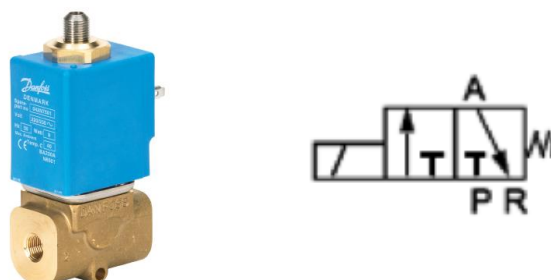
### 4.1 Eletroválvulas testadas

Para a substituição das válvulas rotativas por eletroválvulas na bancada experimental de RMAs são exigidas quatro válvulas, sendo duas para permitir o escoamento frio e duas para o escoamento quente. Desse modo, é necessário determinar quais válvulas serão utilizadas e quais são as suas características para poder realizar o controle de acionamento das mesmas. Nesta seção serão apresentadas as válvulas disponíveis no laboratório e os experimentos que foram realizados na bancada hidráulica para obter suas características reais.

#### 4.1.1 Válvulas solenoides Danfoss

As quatro válvulas solenoides da empresa dinamarquesa Danfoss disponíveis no laboratório são as do modelo EV310B de 3/2 vias com operação direta e normalmente fechadas. Na Figura 4.1 é apresentada uma foto dessa válvula Danfoss e a simbologia que representa seu funcionamento. As informações do catálogo apontam que essas válvulas são robustas, com alto desempenho e podem ser utilizadas em todos os tipos e condições de trabalho severas.

Figura 4.1 - Válvula solenoide Danfoss



Fonte: DANFOSS.

Por serem válvulas 3/2 vias e a bancada necessitar de válvulas 2/2, a via de retorno para o reservatório foi fechada com um tampão para a realização dos testes. Na Tabela 4.1 são apresentadas algumas das características de catálogo das válvulas e das bobinas Danfoss, que devem ser consideradas.

Tabela 4.1 - Características de catálogo das válvulas EV310B da Danfoss.

Características	Valores
Fluido de trabalho	Água, óleo, ar comprimido e fluidos neutros semelhantes
Tipo de válvula	3/2 vias
Acionamento	Operação direta
Estado inicial	Normalmente fechada
Diâmetro do orifício	2 mm
Coefficiente de Vazão (Kv)	0,15 m <sup>3</sup> /h
Faixa de pressão	0 - 16 bar
Faixa de temperatura	-10 - 100 °C
Tempo de resposta - Abertura	10 - 20 ms
Tempo de resposta - Fechamento	10 - 20 ms
Peso	0,395 kg
Tensão de alimentação	24 V
Potência consumida	15 W
Frequência de operação	--

Fonte: DANFOSS.

Por meio desses dados, é oportuno dizer que as válvulas EV310B da Danfoss possuem um tempo de resposta muito bom e uma boa faixa de pressão e temperatura do fluido de trabalho. Porém, o seu coeficiente de vazão é considerado baixo, indicando uma alta perda de carga, e seu consumo é considerado elevado para a aplicação.

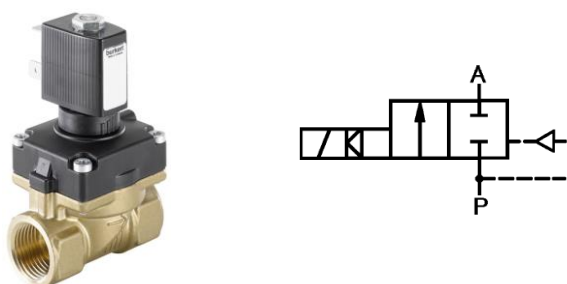
#### 4.1.2 Válvulas solenoides Bürkert

As quatro válvulas solenoides da empresa Bürkert disponíveis no laboratório (modelo 6211) são servo-assistidas de 2/2 vias com um servo-diafragma de separação, ou seja, são pilotadas. Essas válvulas são normalmente fechadas. A Figura 4.2 apresenta uma das válvulas Bürkert e sua simbologia que mostra o seu princípio de funcionamento.

Na Tabela 4.2 são apresentadas algumas das características de catálogo das válvulas e das bobinas Bürkert, que devem ser consideradas.



Figura 4.2 - Válvula solenoide Bürkert



Fonte: BÜRKERT.

Tabela 4.2 - Características de catálogo das válvulas modelo 6211 da Bürkert

Características	Valores
Fluido de trabalho	Água, óleo, ar comprimido e fluidos neutros semelhantes
Tipo de válvula	2/2 vias
Acionamento	Pilotada
Estado inicial	Normalmente fechada
Diâmetro do orifício	10 mm
Coefficiente de Vazão (Kv)	1,9 m <sup>3</sup> /h
Faixa de pressão	0,5 - 10 bar
Faixa de temperatura	0 - 70 °C
Tempo de resposta - Abertura	20 ms
Tempo de resposta - Fechamento	130 ms
Peso	0,31 kg
Tensão de alimentação	24 V
Potência consumida	4 W
Frequência de operação	0,25 Hz

Fonte: BÜRKERT.

Através dos dados expostos na tabela, é pertinente dizer que as válvulas de modelo 6211 da Bürkert possuem um baixo consumo energético quando comparadas as válvulas da Danfoss e seu coeficiente de vazão indica uma perda de carga menor do que as outras. Porém, a faixa de pressão e temperatura do fluido de trabalho é mais restrita, e o tempo de resposta ao fechar a válvula é maior. É importante destacar que a frequência de operação das válvulas Bürkert fornecida pelo fabricante é de 0,25 Hz, podendo ser um grande limitante da válvula para o uso em refrigeradores magnéticos.

#### 4.1.3 Experimentos na bancada experimental de eletroválvulas para refrigeração magnética

Apesar das informações de catálogo das válvulas Danfoss e Bürkert, a caracterização delas por meio da bancada experimental de Cardoso (2017) permitirá determinar quais válvulas apresentam melhor desempenho para o uso na bancada experimental de RMAs. Sendo assim, uma bateria de experimentos foi realizada para os dois conjuntos de válvulas. A seguir, são apresentados os objetivos e como foram realizados esses experimentos.

Os experimentos realizados na bancada hidráulica foram classificados e chamados do seguinte modo: Testes em Regime Permanente (TRP) e Testes em Regime Transiente (TRT). Os TRP são experimentos onde um par de válvulas era mantido aberto enquanto o outro permanecia fechado ao longo do tempo. Já os TRT são experimentos onde ocorria o chaveamento entre os pares de válvulas (ora um par estava aberto, ora o outro). No total, 84 condições de testes foram previstas para cada conjunto de válvulas, resultantes da combinação dos seguintes parâmetros:

- TRP:
  - Dois pares de válvulas: Par 1 e Par 2.
  - Dez valores de pressão de suprimento ( $P_S$ ): 2,5 bar, 3 bar, 3,5 bar, 4 bar, 4,5 bar, 5 bar, 5,5 bar, 6 bar, 6,5 bar e 7 bar.
- TRT:
  - Quatro valores de frequência de chaveamento das válvulas: 0,2 Hz, 0,6 Hz, 1 Hz e 1,4 Hz.
  - Quatro valores de  $P_S$ : 3 bar, 4,5 bar, 6 bar e 7,5 bar.
  - Quatro períodos de tempo em que ambos os pares de válvulas permanecem fechados durante o início de cada escoamento: 0 ms, 100 ms, 150 ms e o tempo que representa 90% do escoamento resultante do experimento.

Todos os experimentos foram realizados para o conjunto de quatro válvulas Danfoss e o conjunto de quatro válvulas Bürkert.

Os experimentos TRP foram realizados para cada par de válvulas do sistema. Após selecionar um par para realizar o experimento, o primeiro passo era ajustar a  $P_S$  que chega à válvula de alta pressão aberta, através da válvula agulha reguladora da bancada. Determinada a pressão, o sistema se estabiliza com uma vazão constante e perdas de cargas em cada componente constantes. Com os TRP foi possível verificar a vazão que o sistema consegue alcançar com diferentes tipos de válvulas, o comportamento da potência dessas válvulas ao longo do tempo, entre outras características que não serão abordadas no presente trabalho.

Conhecer o comportamento de cada conjunto de eletroválvulas e do escoamento proporcionado durante um chaveamento entre os pares é extremamente importante para o uso delas na sincronização dos escoamentos com o campo magnético em um RMA. Para isso foram realizados os experimentos TRT que simulam o chaveamento que deverá acontecer durante os ciclos de magnetização e desmagnetização de um RMA. Os TRT foram realizados para diferentes frequências de chaveamento, diferentes pressões e diferentes períodos de tempo em que os dois pares de válvulas permanecem fechados. Esse tempo em que ambos os pares estão fechados representa uma fração do ciclo de um RMA em que não haverá escoamento. Por meio desses experimentos era desejável obter como resultado o tempo de resposta de cada válvula, como elas funcionam em diferentes frequências de ciclo e pressões de suprimento, entre outras características que não serão abordadas neste trabalho.

Deve-se salientar que todos os experimentos foram realizados com uma mesma potência de bombeamento, buscando fornecer assim sempre o mesmo potencial de vazão na entrada do circuito hidráulico. Além disso, para poder iniciar a aquisição dos experimentos era preciso que o sistema estivesse em um regime permanente, ou seja, que não mudasse suas características ao longo do tempo. Analisando as variáveis do sistema percebeu-se que o valor que levava mais tempo para estabilizar era a potência dissipada pelas válvulas. Sendo assim, foi determinado que a aquisição de um experimento só pudesse iniciar após o valor da potência das válvulas estivesse estabilizado.

Os resultados obtidos por meio desses experimentos e que são de interesse para o presente trabalho encontram-se apresentados no próximo capítulo. Através desses resultados será possível determinar e selecionar quais eletroválvulas proporcionará melhor desempenho para a bancada experimental de RMA.

Na próxima seção será apresentado o estudo e desenvolvimento do circuito de acionamento necessário para acionar as eletroválvulas.

## **4.2 Acionamento de eletroválvulas**

O consumo de um circuito de acionamento das eletroválvulas pode não influenciar muito o consumo de energia total do sistema quando comparado aos demais equipamentos. No entanto, a constante busca por melhores condições de operação levou ao estudo de como acionar as eletroválvulas com o menor consumo possível e um ótimo desempenho em questão de tempo de resposta e ruído sonoro.

Os relés, transistores BJT e transistores MOSFETs, como apresentado no capítulo 2, são componentes eletrônicos capazes de chavearem correntes que permitem o acionamento de

cargas. A análise do uso desses componentes para acionar as eletroválvulas do projeto foi feita levando em consideração a válvula de maior potência elétrica entre as disponíveis no laboratório, o que indica o máximo de corrente que os componentes precisariam chavear. Desse modo, considerando a válvula Danfoss de 15 W e tensão de alimentação de 24 V (valores fornecidos em catálogo), e de acordo com a equação

$$P_V = V_V \cdot I_V, \quad (4.1)$$

onde  $P_V$  é a potência,  $V_V$  é a tensão e  $I_V$  é a corrente na eletroválvula, os componentes em estudo devem ser capazes de chavear corrente de 0,625 A.

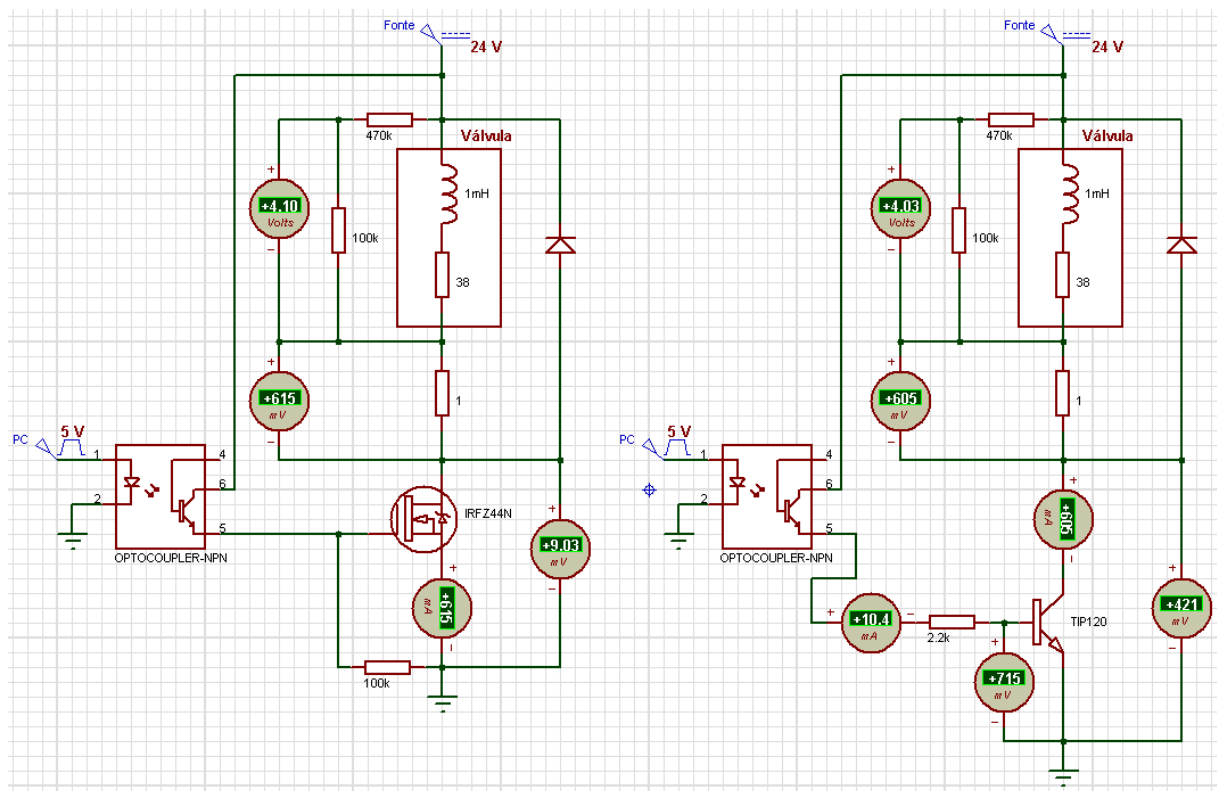
Os relés analisados, e que são aptos para alcançar esse objetivo, foram os do módulo SCXI-1161 da National Instruments empregados na bancada experimental de eletroválvulas, que possuem a capacidade de chavear no máximo 5 A em 30 V. Através desse módulo foi possível perceber o ruído sonoro produzido pelo acionamento eletromecânico dos relés, sendo uma grande desvantagem desse componente. Além disso, o tempo de resposta dos relés fornecido pelo catálogo do módulo é de 15 ms. Sendo assim, o ruído sonoro e o tempo de resposta na ordem de milissegundos indicam que a utilização de transistores para acionar as eletroválvulas é mais promissora.

Os transistores BJTs encontrados comercialmente aptos para chavear correntes de 0,625A normalmente requerem correntes de base  $I_B$  mais elevadas do que as saídas analógicas do sistema de aquisição é capaz de fornecer (de 0 a 20 mA). Em consequência disso, para acionar as eletroválvulas com esses transistores é necessário utilizá-los em configuração *Darlington*, o que exigirá uma  $I_B$  dentro da faixa de corrente das saídas analógicas. O TIP120 é um transistor com essa configuração embutida, vendido comercialmente e que ganhou destaque durante as pesquisas. Esse transistor permite chavear correntes de até 5 A e tensão na carga de 60 V. A análise do consumo desse transistor foi realizada via simulação e será explicada ainda nesta seção.

Os transistores MOSFETs são mais facilmente acionados pelas saídas analógicas, pois são controlados pela tensão e requerem uma pequena corrente. Entre esses transistores procurou-se um que tivesse o menor consumo energético, ganhando destaque o IRFZ44N devido à sua resistência entre dreno e fonte extremamente baixa ao estar acionado ( $R_{DS(ON)} = 17,5 \text{ m}\Omega$ ). O valor dessa resistência influencia diretamente no consumo como representado na equação (2.2). Esse MOSFET permite chavear correntes de até 49 A e tensão de 55 V, e o tempo de reposta é por volta de 100 ns.

O consumo do transistor TIP120 e do IRFZ44N durante o acionamento de uma eletroválvula de 0,625 A foi analisado por meio de simulações desses acionamentos com o *software* Proteus 7. Devido ao *software* não possuir uma válvula solenoide como componente de simulação, foi utilizado uma associação de um indutor e uma resistência que requerem uma corrente de 0,625 A para representar essa válvula. Nas simulações apresentadas na Figura 4.3 estão inseridos os componentes do circuito para medição de potência da eletroválvula que foi apresentado na Figura 2.9. Além disso, foi inserido um optoacoplador que permitirá um isolamento entre a porta de saída analógica do sistema de aquisição e o circuito de acionamento, garantindo maior segurança para a porta.

Figura 4.3 - Simulações de acionamento de eletroválvulas. Na esquerda com um transistor MOSFET IRFZ44N e na direita com um transistor *Darlington* TIP120.



Fonte: Elaborada pela Autora.

No circuito de acionamento com o MOSFET foi inserido um resistor de *pull down* para garantir que o transistor abra a chave, ao ser enviado um sinal analógico de 0 V, não permitindo a passagem de corrente pela válvula. Na Figura 4.3 está sendo representado o momento em que o sinal enviado pela saída analógica é de 5 V, fechando a chave do MOSFET e permitindo a passagem de corrente pela válvula. A simulação aponta que neste momento, o valor de  $V_{GS}$  é 5 V,  $V_{DS}$  é 9,03 mV e  $I_{DS}$  é 0,615 A. Segundo o valor de  $R_{DS(ON)}$  do IRFZ44N e a equação (2.2), a potência dissipada pelo transistor nessa situação é de aproximadamente 6,6 mW.

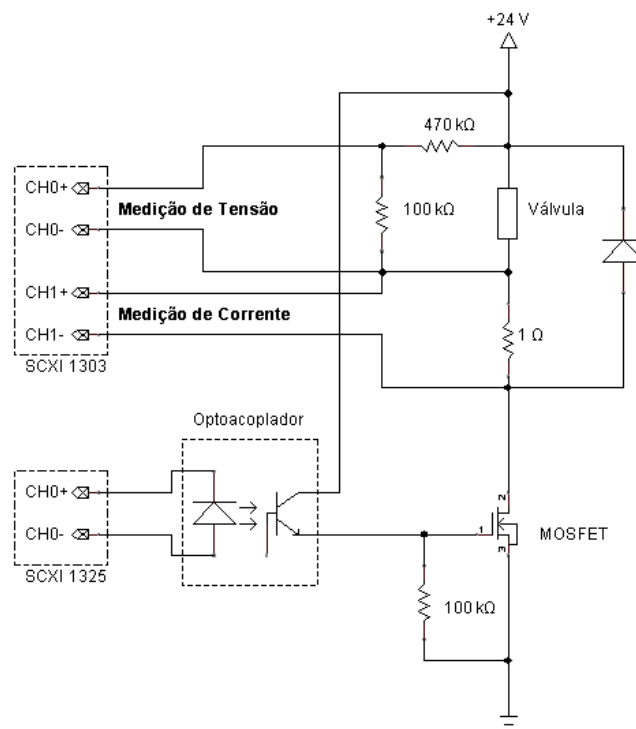
Na simulação do circuito de acionamento com o TIP120 foi inserido um resistor de 2,2k $\Omega$  para limitar a corrente de base do transistor. A Figura 4.3 apresenta também a simulação do chaveamento com o TIP120 quando o sinal enviado pela porta de saída analógica é de 5 V. Os valores obtidos nessa situação são de  $V_{BE} = 0,715$  V,  $I_B = 10,4$  mA,  $V_{CE} = 0,421$  V e  $I_C = 0,605$  A, e podem ser visualizados na figura. Com esses valores e a equação (2.1), a potência dissipada obtida por simulação para esse transistor é de aproximadamente 262 mW, indicando um consumo energético maior do que o MOSFET IRFZ44N.

Os valores de potências obtidos por meio das simulações e as demais características citadas neste tópico e no capítulo 2 levaram à escolha do acionamento das eletroválvulas por meio de transistores MOSFETs do tipo IRFZ44N.

#### 4.2.1 Circuito de atuação e medição de potência das válvulas

Após a definição do componente responsável pelo chaveamento das eletroválvulas, uma placa de circuito integrado (PCI) foi projetada via *software* Proteus 7 e confeccionada com resistores de precisão. Esta placa contém os circuitos de acionamento, medição de tensão e corrente para cada válvula que será utilizada. Na Figura 4.4 é mostrado o diagrama elétrico dos circuitos de uma eletroválvula e o resultado final da confecção da PCI é apresentado no próximo capítulo.

Figura 4.4 - Circuito de atuação e medição de potência das eletroválvulas.



A medição da tensão sobre a válvula é realizada por meio de um divisor de tensão que reduz o valor de 24 V para aproximadamente 4,21 V, visto que o sistema de aquisição só lê valores entre -10 e 10 V. Esta calibração foi realizada utilizando uma fonte controlada de alta precisão. Já a medição de corrente é realizada por meio da medição de tensão em um resistor de 1  $\Omega$  em série com a válvula. O cálculo de potência resultante é realizado durante o pós-processamento dos dados.

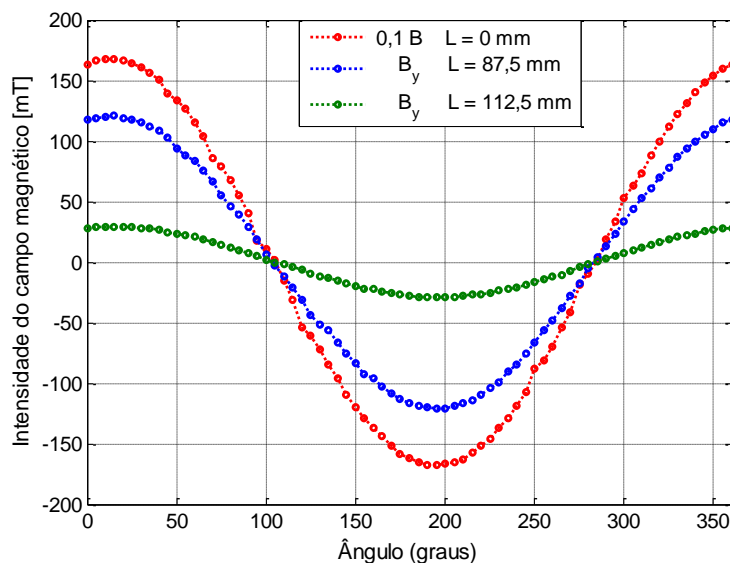
Além das válvulas e do circuito de acionamento, para a sincronização dos escoamentos com o campo magnético é necessário um sistema capaz de medir o campo aplicado ao RMA. Na próxima seção será apresentado o sensor selecionado para esse propósito.

### 4.3 Medição de campo magnético

A sincronização do escoamento com o campo magnético através de eletroválvulas exige uma medição do campo precisa para que o controle possa atuar no acionamento das válvulas no momento adequado. Portanto, em busca de um sensor capaz de atender esse objetivo, destacou-se o sensor de Efeito Hall (SEH), que é um dispositivo semicondutor próprio para detecção de campos magnéticos. Ele é um transdutor que funciona pelo princípio do Efeito Hall, o qual é uma propriedade que se manifesta em um condutor quando um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente é aplicado sobre ele, resultando em uma variação na sua tensão de saída.

O sinal de tensão de saída dos sensores analógicos de Efeito Hall é linear e diretamente proporcional ao campo magnético que passa pelo sensor. Normalmente, a saída com o valor da metade da tensão de alimentação representa o campo nulo, e esta tensão varia para mais ou menos em relação a este valor, conforme o campo magnético medido. À medida que a força do campo magnético aumenta, o sinal de saída também irá aumentar até que sature devido aos limites físicos do sensor. Essa saturação é indicada pela faixa de operação desses sensores, fornecida nos catálogos dos fabricantes.

Segundo a análise do perfil do campo magnético através da Figura 2.5 e as restrições impostas pelo comprimento do regenerador, é pertinente afirmar que o SEH só poderá ser posicionado acima da distância de 75 mm do centro do ímã, onde deverá captar no máximo a intensidade de 0,4 T. Através da Figura 4.5 são apresentadas as medições do campo no centro do ímã e em mais duas posições do eixo  $z$ , realizadas por meio de um gaussímetro da Lake Shore Cryotronics Inc., que provam que a componente  $B_y$  na região mais externa do eixo  $z$  segue o perfil do campo no centro do ímã e pode ser utilizada para representá-la. Além disso, o sensor deve ser pequeno a ponto de caber no espaço restrito.

Figura 4.5 - Medições do campo magnético em diferentes posições do eixo  $z$  durante um giro completo do ímã

Fonte: Elaborada pela Autora.

Partindo dessas restrições, foi realizada uma busca por SEHs comerciais capazes de medir essa intensidade de campo magnético. Entre os sensores encontrados, apenas um deles possui a capacidade de medir campos de 0,4 T, sendo o seu limite máximo de 2 T. Esse sensor, da empresa GlobalMag®, é vendido como um transdutor de campo magnético com um equipamento de tratamento de sinal. Apesar de os demais sensores medirem campo máximo por volta de 100 mT e não possuírem tratamento de sinal, convém ressaltar que para o projeto eles foram mais atrativos por serem mais viáveis economicamente, custando em média R\$16,00, enquanto o preço do sensor da GlobalMag® é R\$1600,00.

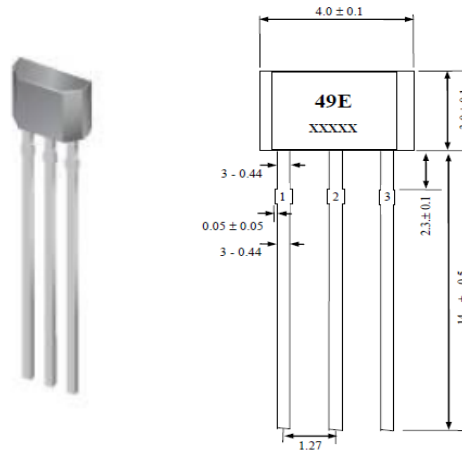
Diante dessa realidade, o sensor selecionado para o projeto é o SS49E da Sec Electronics Inc., cuja aparência e dimensões são apresentadas na Figura 4.6 e a curva de saída é apresentada na Figura 4.7. Segundo o catálogo, com uma tensão de alimentação de 5 V ele deve medir até 100 mT e deverá ser posicionado perpendicular a componente que deseja-se medir, neste caso  $B_y$ . Além disso, o sensor SS49E possui como característica baixo ruído de saída, portanto eliminando a necessidade de um filtro externo.

Para a alimentação do SEH foi comprada e instalada uma fonte de corrente contínua de 5 V, e o sinal de saída resultante do sensor foi medido através de uma porta de entrada analógica do módulo SCXI 1102C da National Instruments. O cabo que transmite os sinais é blindado para evitar interferência. Um diagrama simplificado das conexões do sensor pode ser visualizado através da Figura 4.8. Para validação do sensor, a calibração foi realizada utilizando um gaussímetro 425 da Lake Shore como referência. Ao girar o ímã 360° foram obtidos



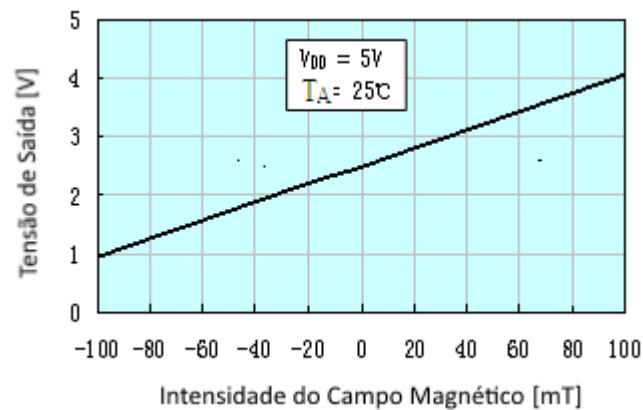
vários pontos ao longo do percurso, de modo que o sensor estivesse medindo o máximo campo possível sem saturar. O resultado obtido dessa calibração será apresentado no próximo capítulo.

Figura 4.6 - Sensor de Efeito Hall SS49E. As medidas estão em mm. O pino 1 é para tensão de alimentação, pino 2 é o Ground e pino 3 é a saída.



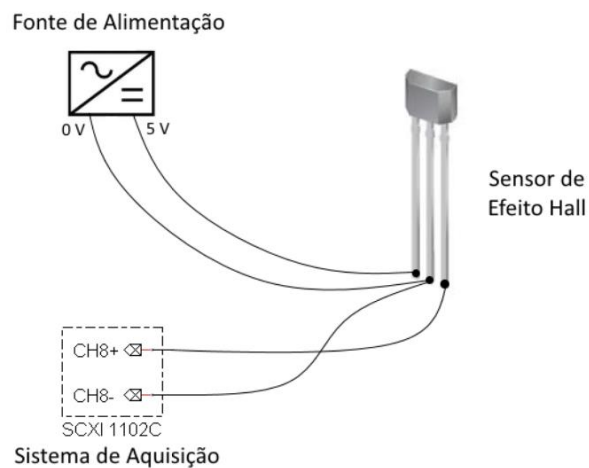
Fonte: SEC ELETRONICS INC.

Figura 4.7 - Curva de saída do sensor de Efeito Hall disponibilizada pelo catálogo



Fonte: Adaptada de SEC ELETRONICS INC.

Figura 4.8 - Diagrama elétrico esquemático da instalação do sensor de Efeito Hall.



Fonte: Elaborada pela Autora.

#### 4.4 Adaptação da bancada

A implementação da sincronização por meio de eletroválvulas na bancada experimental de RMA exigiu alterações no painel elétrico, no sistema de aquisição e no sistema hidráulico. As adaptações realizadas serão apresentadas a seguir.

##### 4.4.1 Painel elétrico

O painel da bancada experimental de RMAs possui diversas fontes DC necessárias para alimentar os sensores, além de disjuntores, fusíveis e outros componentes eletrônicos.

Para o sistema de acionamento das eletroválvulas é necessária uma nova fonte DC de 24V. Essa fonte deve ser capaz de fornecer corrente suficiente para todas as válvulas. Em função disso, foi considerado o cálculo para acionar quatro válvulas Danfoss, o que no total exigiriam 2,5 A ( $4 \times 0,625A$ ). Considerando uma boa margem de segurança, uma fonte de 6,25A foi instalada no painel. Essa fonte requer 220VAC e 1,3 A de entrada, e por esse motivo foi inserido um disjuntor de proteção de 2A antes da fonte.

Para o sistema de medição de campo magnético é necessária uma fonte DC de 5V para alimentar o sensor de Efeito Hall. Apesar da corrente requerida pelo sensor não ultrapassar 8mA, foi comprada e instalada uma fonte capaz de fornecer até 5A. Como a corrente necessária de entrada da fonte é de apenas 0,33A, ela foi adicionada junto a um disjuntor já existente na bancada que estava sobredimensionado.

Havendo a necessidade de obter espaço no painel elétrico da bancada para serem instaladas as novas fontes e a PCI de acionamento das válvulas, foram retiradas algumas Pontes-H que estavam presentes no painel e que não estavam mais sendo utilizadas, e suas conexões foram reaproveitadas para fazer o acionamento das eletroválvulas.

Toda a fiação elétrica de medição de potência das eletroválvulas e medição de campo foi realizada com cabos manga blindados para evitar interferências externas.

##### 4.4.2 Sistema de Aquisição

O acréscimo de quatro eletroválvulas na bancada experimental de RMA exige um sistema de leitura de 8 sinais de tensão analógicos (tensão e corrente de cada válvula) e 4 saídas analógicas para envio do sinal de acionamento das válvulas (um sinal de tensão para cada uma). Além disso, será necessária a leitura do sinal de tensão emitido pelo sensor de Efeito Hall.

Entre os componentes do sistema de aquisição da National Instruments empregados na bancada experimental de RMA, o módulo de leitura de tensões SCXI-1102 possui portas de

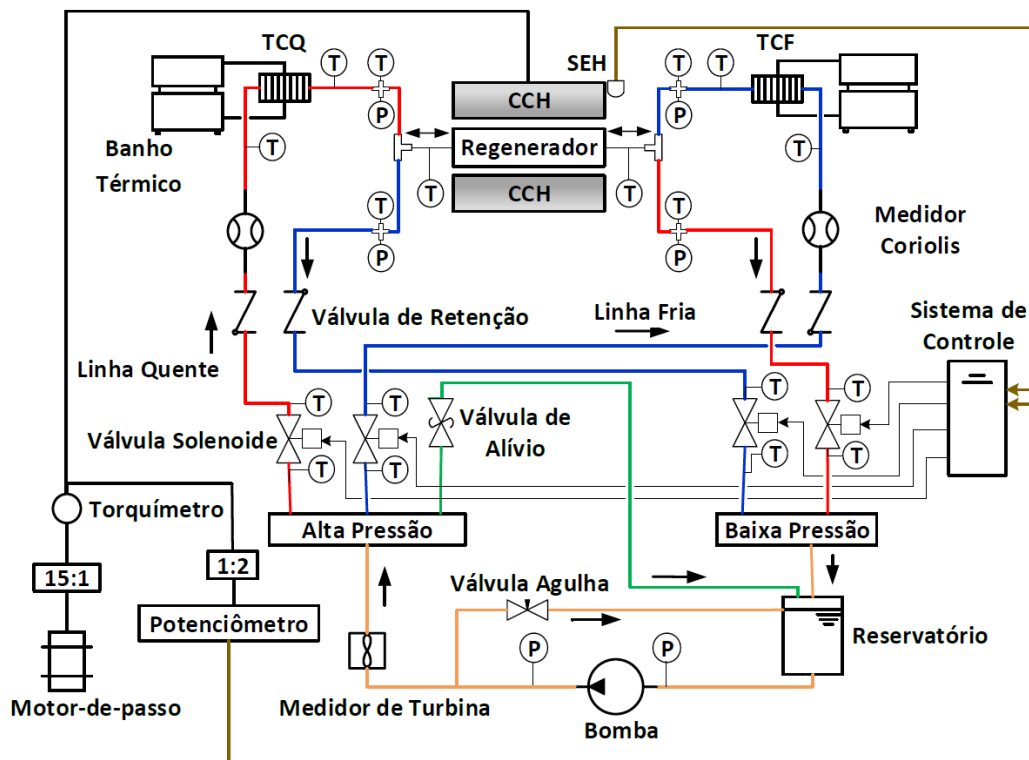
entrada analógicas disponíveis para realizar essas medições. Porém, esse módulo possui um filtro passa-baixa com frequência de corte de 2 Hz, impossibilitando a medição de dinâmicas rápidas. Como os sinais de tensões e correntes das válvulas e o perfil do campo magnético possuem dinâmicas rápidas que devem ser analisadas, foi acrescentado ao sistema de medição o módulo SCXI-1102C para realizar essas aquisições, com frequência de corte de 10 kHz.

Para emitir os sinais de controle de acionamento das eletroválvulas foi acrescentado o módulo de saídas analógicas SCXI-1124 com o seu respectivo bloco de terminais SCXI-1325.

#### 4.4.3 Sistema Hidráulico

A substituição das válvulas rotativas por eletroválvulas exigiu alterações no circuito hidráulico. Uma válvula de alívio foi comprada e acrescentada ao circuito, e a válvula agulha foi mudada de posição. Além disso, novas tubulações foram compradas e os *manifolds* foram produzidos. Na Figura 4.9 pode ser visualizada a nova configuração hidráulica da bancada.

Figura 4.9 - Nova configuração hidráulica da bancada experimental de RMA. Componentes da transmissão e do circuito magnético (CCH) podem ser visualizados. TCQ e TCF são os trocadores de calor quente e frio, respectivamente. T e P são transdutores de temperatura e pressão. SEH é o sensor de Efeito Hall. Setas indicam sentido do escoamento.



Fonte: Adaptada de Dutra et al. (2017).

A próxima seção apresentará a lógica de controle implementada para realizar a sincronização dos escoamentos com o campo magnético por meio de eletroválvulas.

## 4.5 Sistema de sincronização

Para a realização da sincronização dos escoamentos com campo magnético através do RMA na bancada experimental, foi necessário desenvolver a lógica de controle do acionamento das eletroválvulas, a qual será apresentada nessa seção.

O primeiro passo para realizar a sincronização foi conhecer como as válvulas foram dispostas nos *manifolds*, identificando os escoamentos que serão proporcionados por via delas. As quatro eletroválvulas foram nomeadas e estão instaladas na bancada experimental de RMA de acordo com o que é apresentado na Tabela 4.3. Sendo assim, quando o RMA estiver desmagnetizado, o par de válvulas  $V_1$  e  $V_2$  (Par 1) deverá estar aberto enquanto o outro permanece fechado. No momento em que o RMA estiver magnetizado, o par  $V_3$  e  $V_4$  (Par 2) estará aberto e o Par 1 fechado.

Tabela 4.3 - Nomenclatura das válvulas e distribuição delas em pares.

Válvulas	Função
$V_1$ e $V_3$	Alta Pressão
$V_2$ e $V_4$	Baixa Pressão
Válvulas Acionadas	Objetivo
$V_1$ e $V_2$	Permitir o Escoamento Quente
$V_3$ e $V_4$	Permitir o Escoamento Frio

Fonte: Elaborada pela Autora.

Uma das etapas do controle de acionamento das eletroválvulas é considerar o atraso proporcionado pelo tempo de resposta de abertura e fechamento das eletroválvulas. Durante a sincronização, caso esse atraso não seja considerado, o acionamento das válvulas fará com que os escoamentos não ocorram dentro do período esperado, e assim o sistema não atingirá seus melhores resultados. A análise desses tempos e como serão considerados na lógica de acionamento das eletroválvulas são apresentados no tópico a seguir.

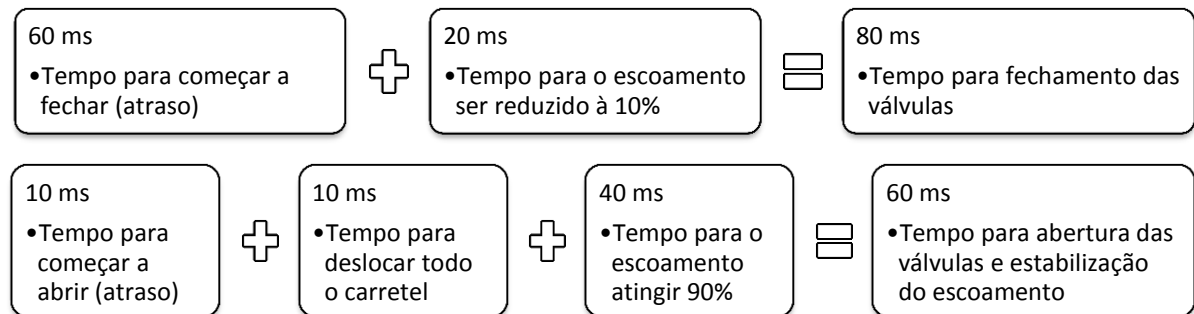
### 4.5.1 Tempo de resposta das válvulas

Na Seção 5.1 do capítulo de resultados, será apresentada a caracterização de eletroválvulas que levou à decisão do conjunto de válvulas instaladas na bancada experimental de RMA. Por meio de tais informações foram obtidos os tempos de respostas e que serão considerados na implementação da sincronização apresentada neste tópico.

Levando em consideração a operação da bancada a uma pressão de suprimento por volta de 6 bar e os resultados apresentados na Seção 5.1, foi possível representar os tempos de resposta das válvulas como apresentado nos diagramas da Figura 4.10. Esses valores foram

obtidos por meio da média dos experimentos com pressão de suprimento por volta de 6 bar. Para o tempo de fechamento das válvulas, foram considerados o tempo que levou para começar a ter uma mudança no escoamento após ser enviado o sinal de tensão para o par de válvulas fechar, mais o tempo que levou até o escoamento ser reduzido a 10% ou menos do seu valor quando as eletroválvulas estão abertas. Já para o tempo de abertura das válvulas, foram considerados o tempo que levou para começar a ter uma mudança no escoamento após ser enviado o sinal de tensão para o par de válvulas abrir, mais o tempo que o carretel da válvula solenoide leva para deslocar, permitindo a passagem do fluido, e mais o tempo que levou até o escoamento atingir 90% ou mais do seu valor quando as eletroválvulas estão abertas.

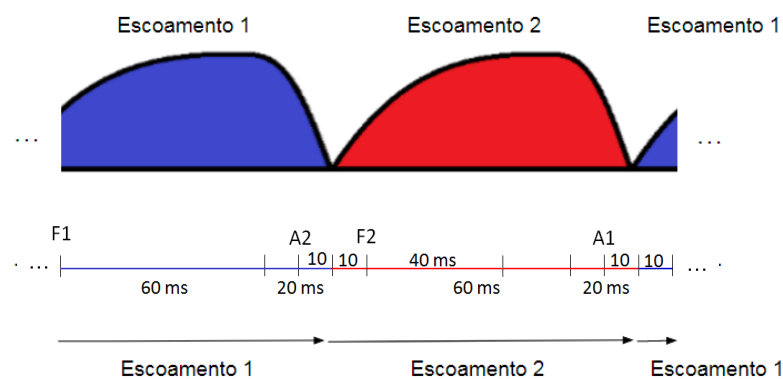
Figura 4.10 - Diagramas dos tempos de respostas das válvulas Bürkert a uma pressão de suprimento de 6 bar.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Através da informação desses tempos é possível planejar o acionamento das válvulas para que não ocorra a abertura das quatro válvulas ao mesmo tempo, de modo que finalize um escoamento antes de iniciar o próximo no sentido oposto. O diagrama da Figura 4.11 apresenta uma lógica cronológica de acionamento das válvulas para evitar esse problema. Nessa lógica são considerados apenas os tempos de resposta, o que resulta no tempo mínimo de escoamento possível em um RMA com o uso das válvulas Bürkert, sendo este valor de aproximadamente 90 ms.

Figura 4.11 - Diagrama de acionamento das válvulas Bürkert considerando os tempos de resposta apresentados no diagrama da Figura 4.10 e o escoamento esperado no RMA.



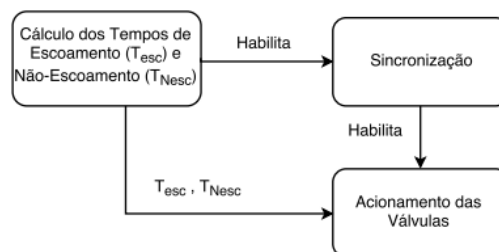
Fonte: Elaborada pela Autora.

Após o envio do sinal de fechamento de um par de válvulas, o tempo para ocorrer de fato o fechamento é de aproximadamente 80 ms. Porém, como as válvulas levam em torno de 10 ms para começar a abrir, o próximo par de válvulas poderá receber o sinal de abertura 10 ms antes de finalizar o escoamento do primeiro par, totalizando assim, 70 ms o intervalo entre o envio dos sinais para fechar um par e abrir o outro em um FE de 100%. O sinal de fechamento de um par de válvulas só poderá ocorrer após o seu carretel estar totalmente aberto, garantindo que haja escoamento mínimo. Esse sinal deve ser enviado no mínimo 20 ms após ser enviado o sinal de abertura do par. Acionando as válvulas deste modo, será obtido o escoamento mínimo de fração de escoamento de 100%. Observando o diagrama da Figura 4.11 e as informações apresentadas, é possível concluir que após a abertura de um par de válvulas, é preciso esperar o tempo de escoamento desejado ( $\tau_{esc}$ ) subtraído de 70 ms antes de ser fechado novamente. Já após enviar o sinal para fechar um par de válvulas, deve-se esperar o tempo de não escoamento desejado ( $\tau_{Nesc}$ ) somado a 70 ms para então enviar o sinal para abrir o outro par de válvulas. Esses são os valores implementados para que o atraso do tempo de resposta das válvulas não afete no resultado final. A implementação de tal lógica será vista na sequência.

#### 4.5.2 Campo magnético

A sincronização do escoamento com o campo magnético só é possível através da medição do campo aplicado sobre o RMA. A lógica de sincronização foi dividida em três módulos e estão interligados, como mostrado no diagrama da Figura 4.12. Cada módulo será descrito a seguir.

Figura 4.12 - Sistema de sincronização dividido em 3 módulos.



Fonte: Elaborada pela Autora.

O primeiro passo para a sincronização é saber o tempo de escoamento e de não escoamento que devem ocorrer pelo RMA. Para isso, o usuário da bancada deve informar qual o FE que ele deseja. Além disso, como o sistema sofre perturbações paramétricas ao longo do tempo até ele atingir regime permanente (por exemplo, a frequência do ciclo do RMA), existe

a necessidade desses valores serem atualizados periodicamente. Esses valores serão atualizados após uma janela de tempo ( $T_{aq}$ ) determinada pelo usuário e que deverá durar tempo suficiente para medir o campo magnético durante dois ciclos de RMA.

O módulo de cálculo dos tempos de escoamentos é mostrado no diagrama da Figura 4.13. Ele iniciará medindo o campo magnético  $B$  durante uma janela de tempo, obtendo uma curva com um perfil senoidal. Após medir o campo, os valores obtidos serão utilizados para determinar a amplitude do campo  $B$  ( $A_B$ ), e a frequência dos ciclos de RMA ( $f_{RMA}$ ) do seguinte modo:

$$f_{RMA} = \frac{f_B}{2}, \quad (4.2)$$

onde  $f_B$  é a frequência do campo  $B$ . Com esse valor será possível determinar os tempos de escoamento ( $T_{esc}$ ),

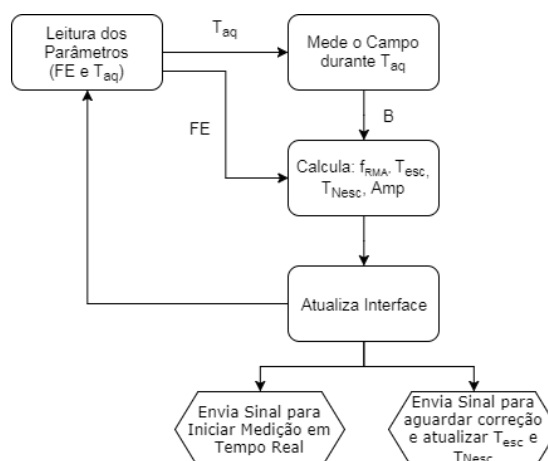
$$T_{esc} = FE \times \frac{1}{2f_{RMA}} \quad (4.3)$$

e o tempo de não escoamento ( $T_{Nesc}$ )

$$T_{Nesc} = \frac{1}{2f_{RMA}} - T_{esc}. \quad (4.3)$$

Esses valores devem ser atualizados na interface gráfica com o usuário e informados para o módulo de acionamento das eletroválvulas, descrito na sequência. Concluído essas etapas, inicia-se o módulo de sincronização enquanto reinicia-se a aquisição do campo durante uma nova janela de tempo.

Figura 4.13 - Módulo responsável pelo cálculo dos tempos de escoamento e de não escoamento.



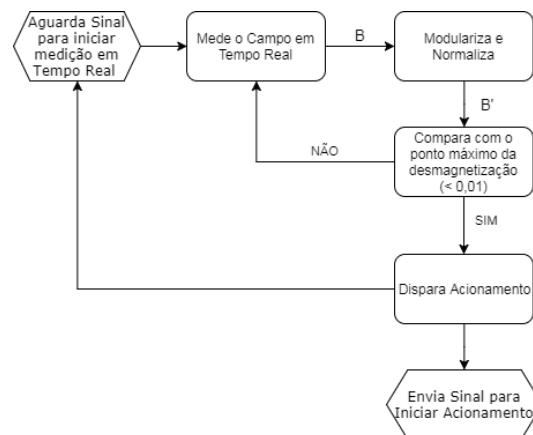
Fonte: Elaborada pela Autora.

O módulo de sincronização é mostrado no diagrama da Figura 4.14. Ele é responsável por medir o campo magnético em tempo real, disparando o acionamento das eletroválvulas quando o campo  $B$  atingir o valor de disparo esperado. Os valores obtidos pelo SEH são nor-

malizados e modularizados para que fiquem de 0 a 1, obtendo-se uma curva senoidal retificada ao longo do tempo. Quando essa curva chega a 0, quer dizer que é o momento de máxima desmagnetização do RMA, e esse será o ponto de disparo do módulo de acionamento das eletroválvulas, permitindo assim a sincronização durante uma janela de tempo. Ao executar outra vez o módulo de sincronização, será disparado novamente o módulo de acionamento, permitindo assim a correção dos tempos e a melhoria da sincronização.

O módulo de acionamento das eletroválvulas, apresentado na Figura 4.15, é responsável por enviar os sinais de acionamento para as válvulas nos momentos adequados. Ao receber o sinal de início do módulo de sincronização, o RMA está no momento de desmagnetização máxima, havendo a necessidade do Par 1 ser aberto para ocorrer o escoamento quente. Porém, como é o momento de máximo, deverá ficar aberto durante metade do tempo do escoamento, permitindo assim a centralização dos escoamentos nos momentos de máximos dos ciclos. Durante os tempos de espera entre os acionamentos das válvulas, será considerado o tempo de resposta das válvulas como foi apresentado no tópico anterior (somando ou diminuindo 70 ms). Ao terminar os acionamentos que permitem um ciclo de RMA, é verificada a necessidade de se corrigir os tempos de escoamentos. Caso positivo, aguarda o sinal que permitirá iniciar novamente os acionamentos, e caso negativo, já reinicia automaticamente com os mesmos tempos do ciclo anterior.

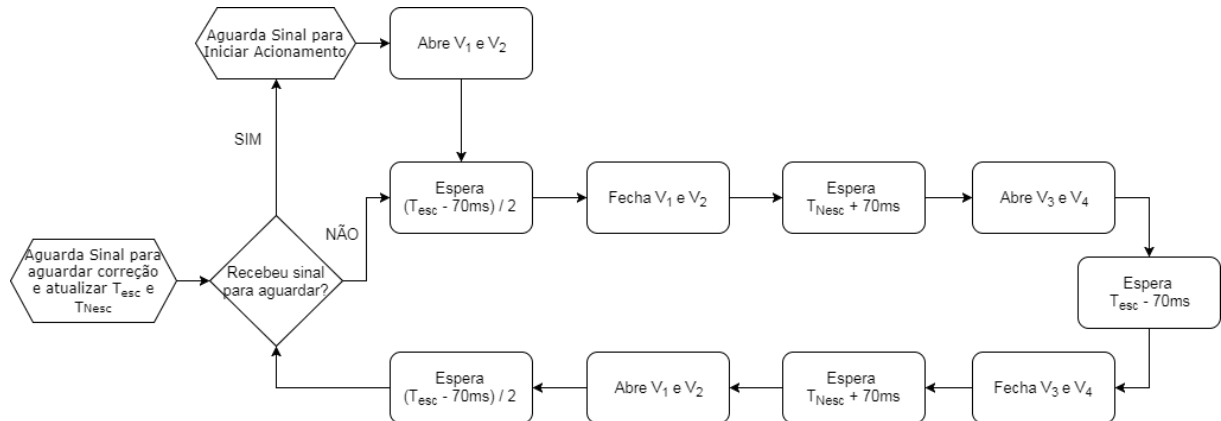
Figura 4.14 – Módulo responsável por identificar o momento de iniciar o acionamento das eletroválvulas.



Fonte: Elaborada pela Autora.



Figura 4.15 - Módulo responsável por acionar as eletroválvulas, considerando os tempos de escoamentos e tempo de resposta das válvulas.



Fonte: Elaborada pela Autora.

As lógicas de acionamento para a sincronização dos escoamentos com a variação do campo magnético, citadas nessa seção, foram implementadas no *software* LabVIEW e os resultados obtidos são apresentados no próximo capítulo.



## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos na bancada experimental de eletroválvulas e na bancada experimental de RMAs adaptada. Na Seção 5.1, será apresentado o desempenho das válvulas solenoides Bürkert e Danfoss em questão de perda de carga, potência e tempo de resposta. Através dessas informações, será apresentada a definição de quais válvulas devem ser utilizadas na bancada experimental de RMA e a definição de qual o limite máximo de frequência de ciclo de RMA alcançado com essas válvulas. Na Seção 5.2, será apresentado como ficou a placa do circuito de acionamento, as válvulas na bancada, e a caracterização do sensor de Efeito Hall. E por fim, na Seção 5.3, será apresentado o resultado obtido através do controle do acionamento das eletroválvulas implementado, analisando o sincronismo do escoamento com o campo magnético para diferentes tempos de escoamento.

### 5.1 Caracterização de eletroválvulas

Esta seção dedica-se principalmente à caracterização das válvulas solenoides Bürkert e Danfoss obtida através dos experimentos na bancada hidráulica, além de apresentar uma discussão de qual conjunto de válvula possuirá o melhor desempenho na bancada experimental de RMA.

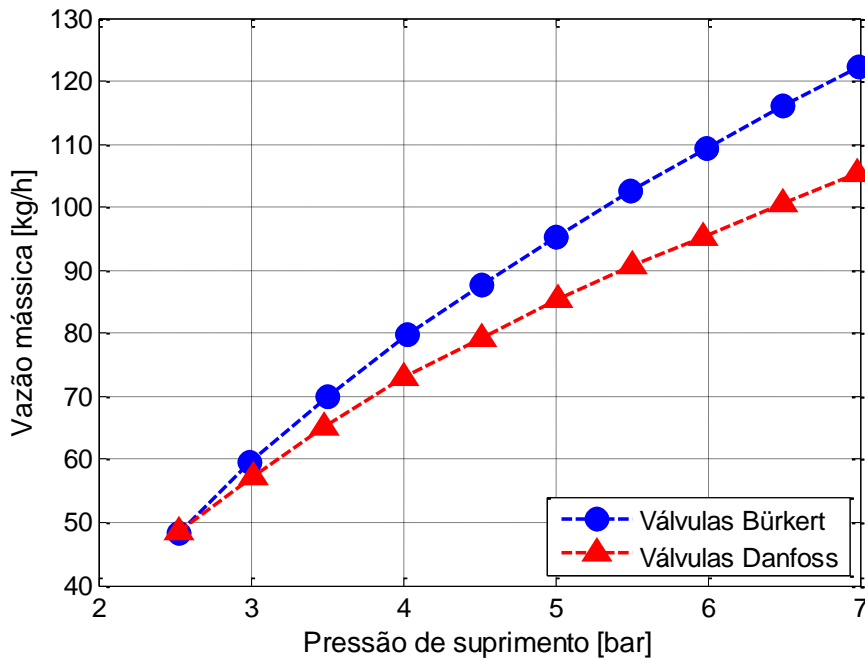
#### 5.1.1 Perda de Carga

Através dos experimentos TRP para diferentes pressões de suprimento, foi possível levantar as curvas de vazão alcançadas pelo sistema com o uso de cada conjunto de eletroválvulas, as quais estão apresentadas na Figura 5.1. Através delas é possível perceber que o sistema com as válvulas Bürkert apresenta uma vazão maior do que o sistema com as válvulas Danfoss, principalmente para pressões de suprimento maiores. Como a potência de bombeamento é constante para ambos os casos e os únicos componentes que mudam do sistema são as válvulas, é pertinente afirmar que essa diferença de vazão entre os dois conjuntos é provocada pela diferença da perda de carga das válvulas, sendo a perda das válvulas Danfoss maior do que as da Bürkert.

#### 5.1.2 Potência

A potência das eletroválvulas é de grande importância para o projeto, pois afeta diretamente o COP. Sendo assim, através dos experimentos TRP e TRT, foi possível verificar o comportamento do consumo das válvulas em teste, o qual será apresentado nesse tópico.

Figura 5.1- Curvas de vazão alcançadas na bancada experimental de eletroválvulas.



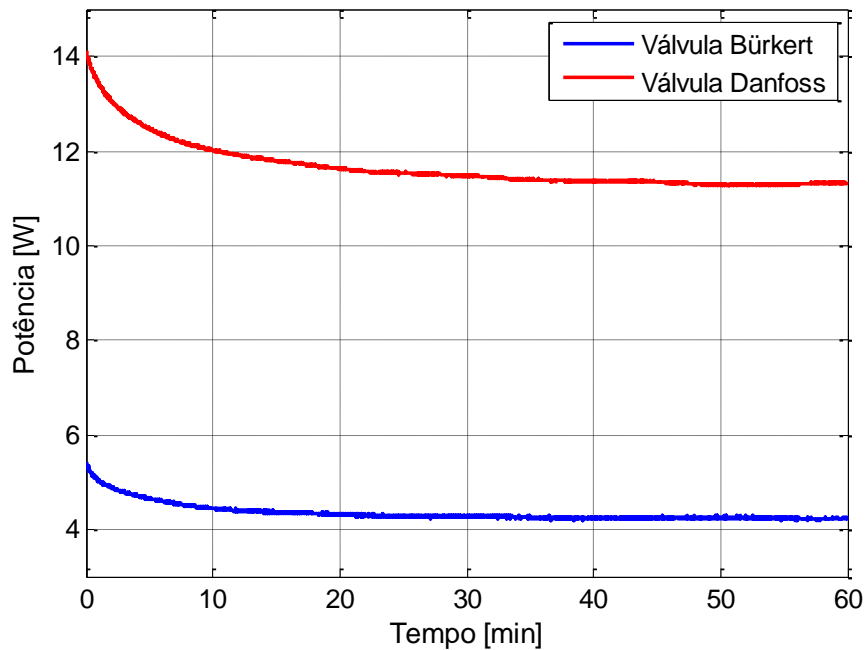
Fonte: Elaborada pela Autora.

Para iniciar todos os experimentos foi necessário esperar a estabilização da potência elétrica dissipada pelas válvulas após serem ligadas. A Figura 5.2 apresenta as curvas de estabilização da potência de uma válvula Bürkert e de uma válvula Danfoss após serem ligadas, porém não estava ocorrendo passagem de fluido por elas. As válvulas Bürkert apresentaram um consumo maior do que o indicado no catálogo (4,2 W de 4 W) e as válvulas Danfoss apresentaram um consumo menor ao indicado pelo catálogo (11,3 W de 15 W). Como é possível verificar pelas curvas, a potência das válvulas diminuiu ao longo do tempo até a estabilização, devido ao aquecimento dos solenoides. As válvulas Bürkert levam em torno de 15 minutos para estabilizarem, e as Danfoss levam em torno de 30 minutos.

Na Figura 5.3 é apresentada a potência consumida, após estabilização, por uma válvula Bürkert e por uma válvula Danfoss em experimentos TRP de diferentes pressões de suprimento. Através dessas curvas é possível verificar que a potência nas válvulas não se altera ao mudar a pressão de suprimento.

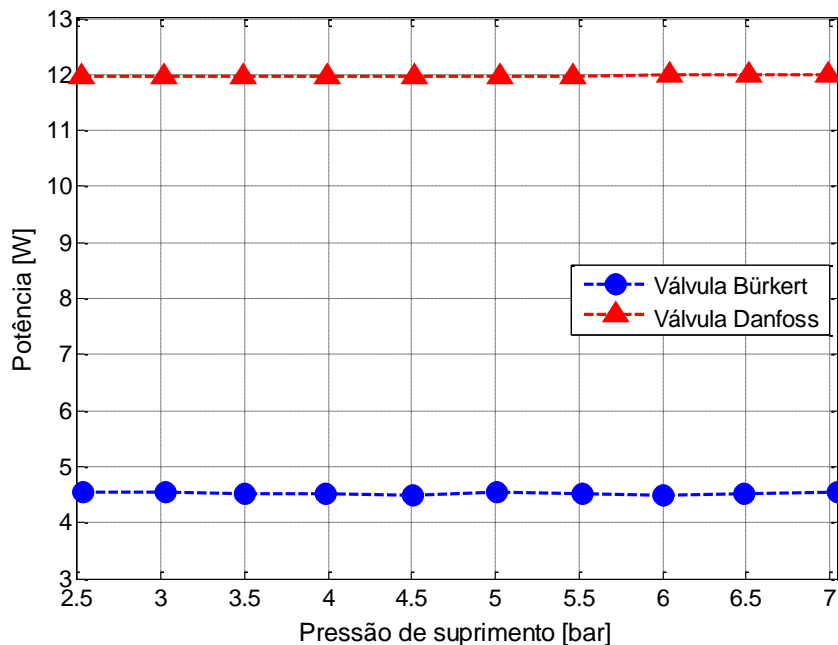
Por meio dos experimentos TRT foi obtida a potência consumida em diferentes frequências de chaveamento. A Figura 5.4 apresenta três curvas de potência para uma comparação do consumo de válvulas rotativas com o consumo de válvulas solenoides. A comparação é realizada entre o consumo das válvulas rotativas do protótipo de Lozano (2015) com o consumo de 16 válvulas solenoides Bürkert e Danfoss necessárias para substituir as primeiras

Figura 5.2 - Dinâmica da potência consumida pelas válvulas solenoides após serem ligadas



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.3 - Valores da potência consumida pelas válvulas solenoides em diferentes pressões de suprimento

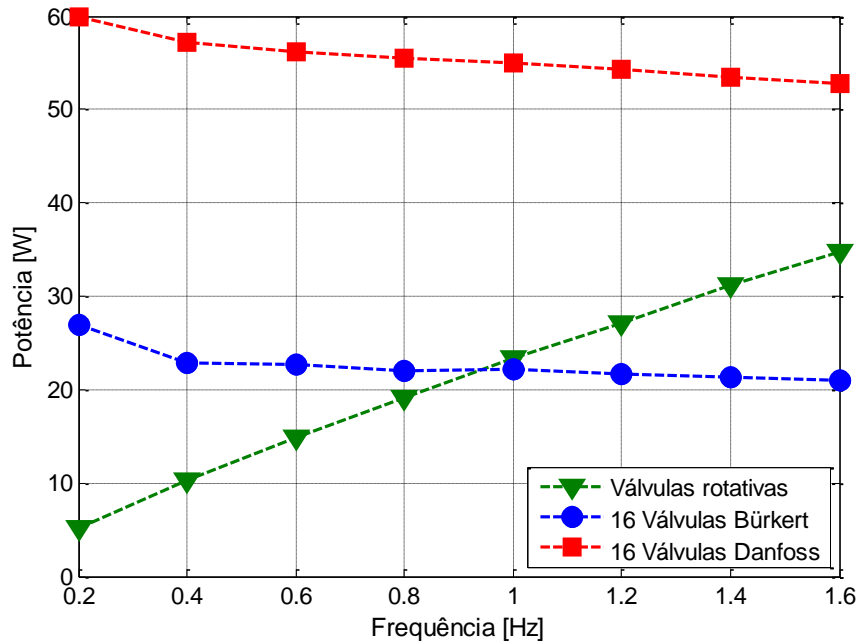


Fonte: Elaborada pela Autora.

citadas. Como no protótipo de Lozano um escoamento dura 25% de um ciclo de RMA (FE igual a 50%), para que possa ser feita uma comparação, as válvulas solenoides permaneceram abertas 25% do período que representava um ciclo de RMA, em cada frequência. A curva das

válvulas rotativas foi obtida através do trabalho de Capovilla (2016) e as curvas das válvulas solenoides foram estimadas a partir do consumo de quatro válvulas nas mesmas condições de experimento, devido a este número limitado de válvulas.

Figura 5.4 - Estimativa de consumo de válvulas para o protótipo de Lozano



Fonte: Elaborada pela Autora.

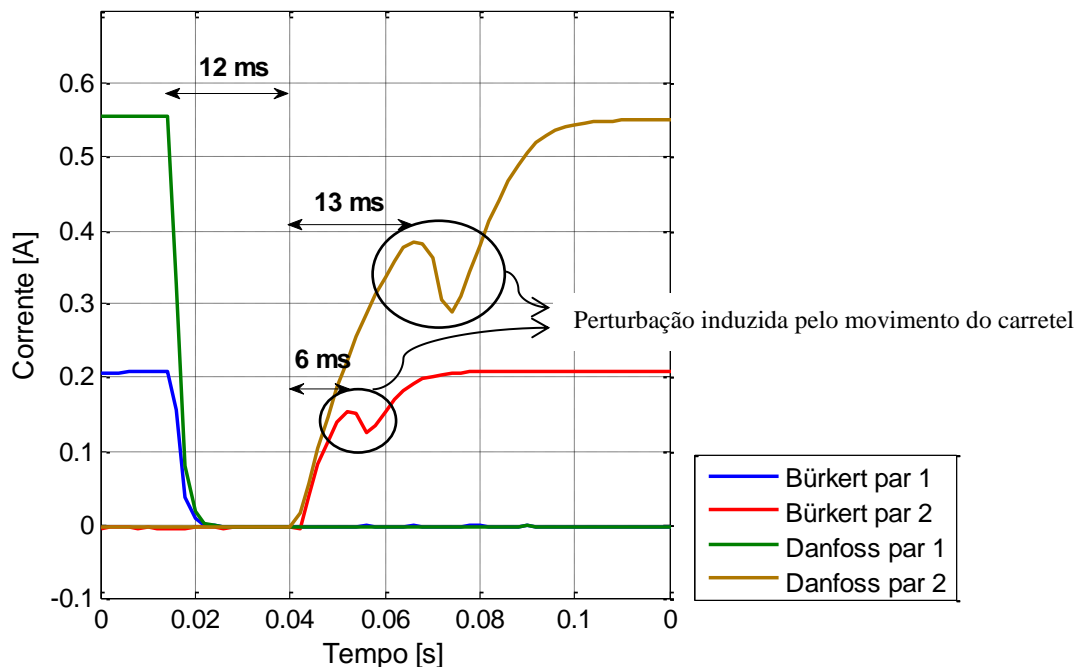
Através da Figura 5.4, percebe-se que a potência das válvulas solenoides diminui ao aumentar a frequência, pois quanto mais rapidamente elas chaveiam, mais o solenoide aquece e assim aumenta-se a resistência elétrica. Deste modo, a corrente que passa pelo solenoide é menor e por consequência a potência é menor. Além disso, a potência consumida de um conjunto de válvulas Danfoss necessário para substituir as válvulas rotativas do protótipo de Lozano é muito maior do que um conjunto de válvulas Bürkert, e inclusive maior do que o consumo das válvulas rotativas. Em um sistema com essas condições, as válvulas solenoides da Bürkert mostraram possuir melhor desempenho em termos de potência consumida para frequências maiores do que 0,94 Hz.

### 5.1.3 Tempo de Resposta

As válvulas solenoides serão utilizadas para controlar o tempo de escoamento no RMA. Logo, o tempo de resposta delas é uma característica importante a ser avaliada. Na sequência será caracterizado o tempo em que as válvulas solenoides levam para responder a um comando de abrir e fechar.

Na Figura 5.5 estão apresentados os sinais de corrente das válvulas de dois experimentos. Um dos experimentos foi com as válvulas Bürkert e o outro foi com as válvulas Danfoss. Os sinais de comando para fechar o primeiro par de válvulas e abrir o segundo foram programados para serem enviados em sequência para as válvulas, em ambos os casos, onde o esperado era que a troca ocorresse instantaneamente. Como pode ser visto na Figura 5.5, o fechamento de um par para a abertura de outro não ocorre instantaneamente, levando aproximadamente 12 ms para ocorrer. Isso acontece devido ao atraso de processamento do computador e do sistema de acionamento que utiliza relés.

Figura 5.5 - Sinais de corrente nas válvulas após receberem sinais de comando



Fonte: Elaborada pela Autora.

Quando uma corrente é aplicada a uma válvula solenoide, inicialmente o carretel permanece parado até que a força magnética gerada pelos solenoides seja suficiente para vencer o atrito. Ao iniciar o deslocamento gera-se uma perturbação no sinal da corrente devido à mudança de indutância causada pelo próprio deslocamento. Essa perturbação foi percebida durante os experimentos e pode ser visualizada na Figura 5.5. As válvulas Bürkert levam em torno de 6 ms para começarem a deslocar o carretel após serem energizadas e as válvulas Danfoss levam aproximadamente 13 ms.

Na Figura 5.6 e Figura 5.7 são apresentados os comportamentos das pressões de suprimento e de reservatório para diferentes sinais de controle aplicados nas válvulas Bürkert e

Danfoss, respectivamente. As curvas representadas por “0 ms” na legenda significam que não houve um tempo de espera entre a troca de abertura de pares de válvulas. Curvas com o tempo de 50 ms, 100 ms e 150 ms indicados na legenda são os resultados obtidos ao permanecerem todas as válvulas fechadas durante esse período de tempo, antes de abrir o próximo par de válvula. Correntes  $i_1$  e  $i_3$  representam as correntes no primeiro par de válvulas e no segundo par, respectivamente.

Figura 5.6 - Pressões de suprimento ( $P_S$ ), pressões de reservatório ( $P_T$ ) e correntes nos pares de válvulas Bürkert em experimentos com diferentes tempos entre fechamento e abertura dos pares

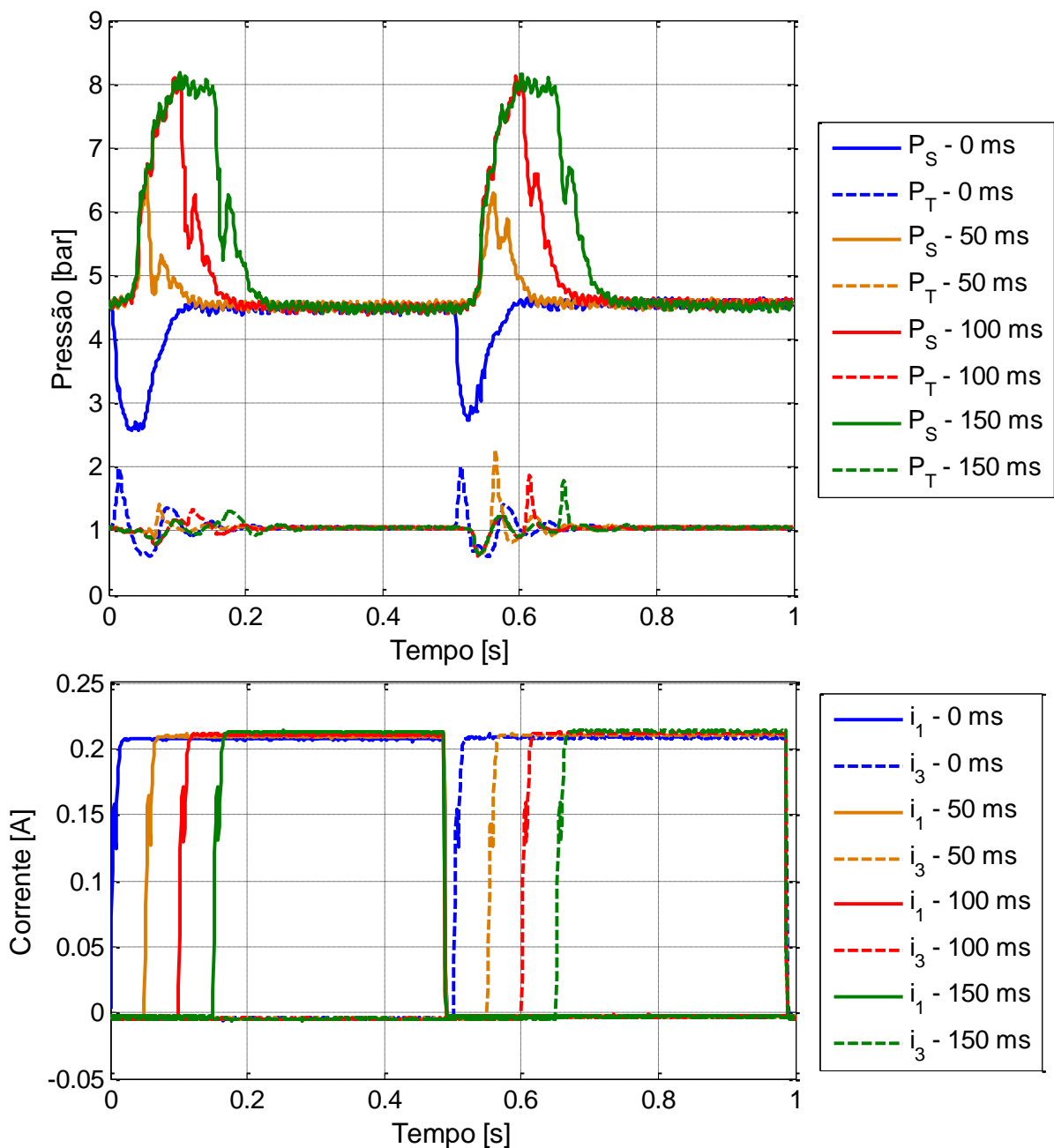
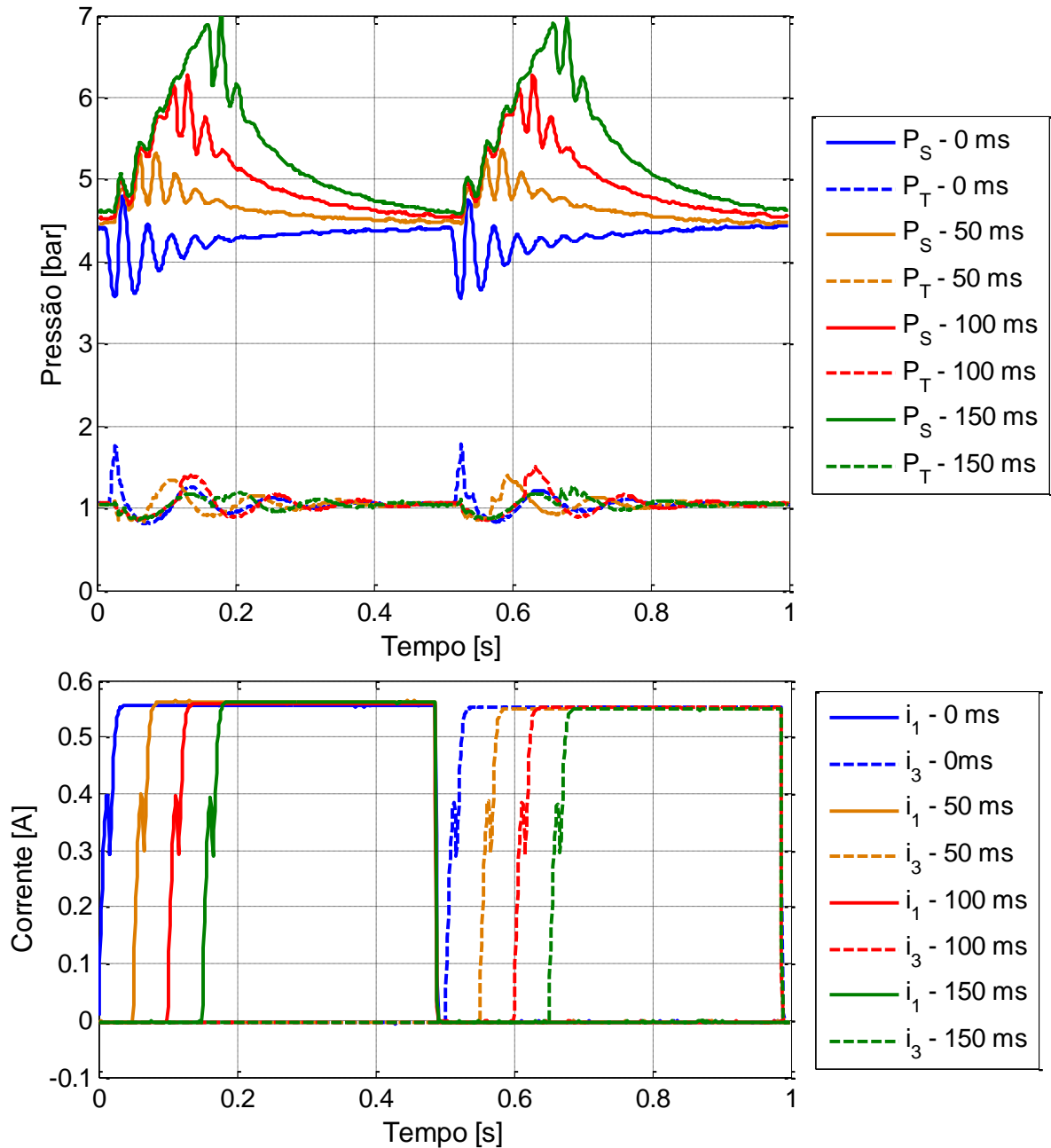




Figura 5.7 - Pressões de suprimento ( $P_S$ ), pressões de reservatório ( $P_T$ ) e correntes nos pares de válvulas Danfoss em experimentos com diferentes tempos entre fechamento e abertura dos pares



Fonte: Elaborada pela Autora.

Através das pressões e as correntes apresentadas na Figura 5.6 é possível notar que existe um atraso hidráulico na resposta das válvulas. Após o sinal da corrente indicar que o primeiro par de válvulas está fechado, nota-se pelas curvas de 50, 100 e 150 ms que a pressão só começa a subir após um determinado tempo, indicando que a válvula só fechou hidráulicamente naquele instante. Por meio da curva de 0 ms percebe-se que o segundo par de válvulas

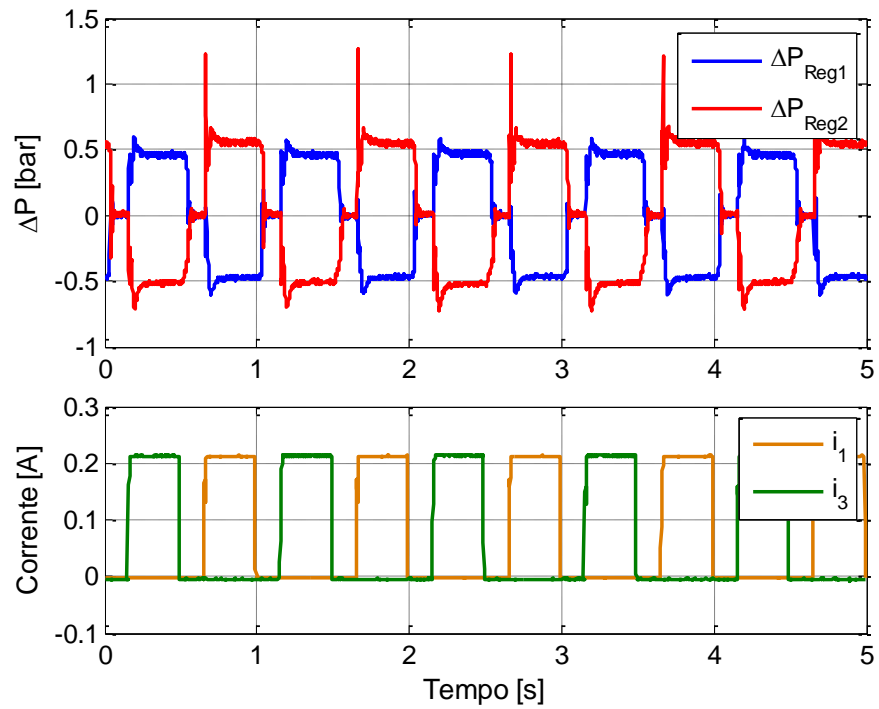
abriu antes do primeiro fechar, fazendo com que a pressão de suprimento caísse já que todas as válvulas permaneciam abertas. A pressão só voltou a subir após o primeiro par responder ao sinal de fechamento. Quando todas as válvulas estão fechadas, a pressão de suprimento tende a subir até o valor ajustado pela válvula de alívio, que neste caso era de 8 bar, levando um tempo para se estabilizar. O tempo de resposta das válvulas Bürkert para abertura é relativamente pequeno em comparação ao de fechamento, porém o tempo que o sistema leva para estabilizar a pressão é semelhante ao tempo de estabilização do fechamento. Uma análise mais detalhada do tempo de resposta será feita mais adiante.

Comparando a Figura 5.6 com a Figura 5.7, percebe-se que o tempo de resposta do fechamento das válvulas Danfoss é menor do que o das válvulas Bürkert, sendo praticamente a metade. O tempo de abertura, segundo os experimentos, é aproximadamente o mesmo. Apesar do tempo de resposta das válvulas Danfoss serem melhores do que o das válvulas da Bürkert, o tempo de estabilização do sistema hidráulico com elas é muito maior, o que é algo ruim para o sistema de refrigeração. Levando em consideração esse ponto, foi decidido realizar a análise mais detalhada do tempo de resposta apenas para as válvulas Bürkert e esta será apresentada a seguir.

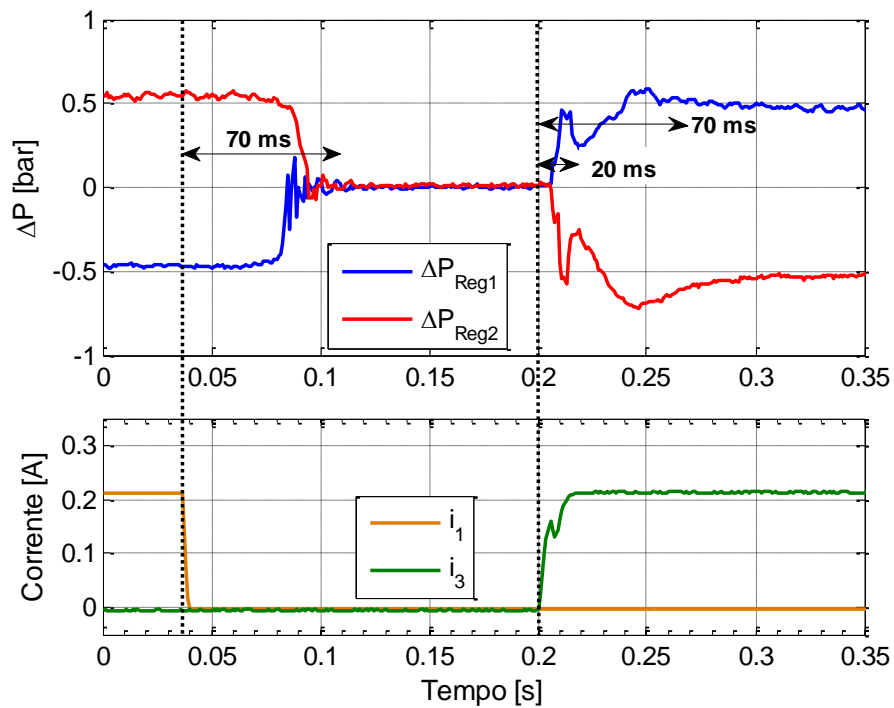
Visto que o medidor de vazão mássica da bancada experimental funciona através do efeito de Coriolis, ele não é um bom medidor para regimes transitórios. Portanto, a análise dos escoamentos foi realizada considerando a diferença de pressão nos regeneradores, onde valor nulo significa sem escoamento, diferença positiva é escoamento em uma direção, e diferença negativa é na direção oposta.

A Figura 5.8(a) apresenta o resultado de um dos experimentos (frequência de chaveamento de 1 Hz e pressão de suprimento de 4,5 bar), mostrando a diferença de pressão nos regeneradores durante cinco ciclos de chaveamento. Durante esses ciclos, todas as válvulas receberam sinais de comando para permanecerem 150 ms fechadas no início de cada escoamento, conforme é apresentado pelos sinais de corrente das válvulas na figura. Através desse exemplo é possível verificar que o comportamento de fechamento e abertura das válvulas se repete ao longo do tempo, permanecendo sempre o mesmo tempo de resposta para essas condições. Na Figura 5.8(b) é apresentado com mais detalhes uma fração desses ciclos, podendo analisar melhor os tempos de respostas. Neste caso, o tempo que a válvula levou para fechar e estabilizar o escoamento ficou em torno de 70 ms, o tempo para iniciar o escoamento foi de 20 ms, e sua estabilização ocorreu por volta de 70 ms também.

Figura 5.8 - Diferença de pressão ( $\Delta P$ ) nos regeneradores durante chaveamento das válvulas Bürkert



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela Autora.

A análise dos tempos de resposta foi realizada para diferentes experimentos, variando-se a pressão de suprimento e a frequência de chaveamento. Os resultados obtidos indicaram que a frequência de chaveamento não afeta o tempo de resposta, porém a pressão de suprimento afeta. Para  $P_s$  maiores a tendência é aumentar o tempo de fechamento das válvulas. A Tabela 5.1 foi construída a partir de uma aproximação dos resultados obtidos pelos experimentos. Como tempo de fechamento foi considerado o tempo que o escoamento realmente cessou. A análise do tempo de abertura não foi realizada para diferentes pressões, devido a não terem sido realizados experimentos onde era alterada a pressão de suprimento quando todas as válvulas permaneciam fechadas, por meio da válvula alívio.

Tabela 5.1 - Tempos de resposta da válvula Bürkert

$P_s$ [bar]	Tempo de fechamento [ms]
3	60
4,5	70
6	80
7,5	80

Fonte: Elaborada pela Autora.

#### 5.1.4 Conclusões sobre as eletroválvulas caracterizadas

Atualmente, os estudos realizados pelo grupo PoloMag apontam que a vazão mássica ótima para operar o RMA da bancada é de aproximadamente 100 kg/h. Além disso, deseja-se trabalhar com ciclos de RMA com frequências entre 0,5 e 4 Hz, e o menor consumo de energia possível pelo sistema hidráulico. Partindo dessas considerações e as características apresentadas pelas válvulas Bürkert e Danfoss, é possível afirmar que as eletroválvulas Bürkert apresentarão o melhor desempenho para a bancada experimental de RMA.

Com as válvulas Bürkert será possível obter vazões de 100 kg/h com  $P_s$  de 5,5 bar, exigindo um consumo menor da UPH quando comparado às válvulas Danfoss. Através do tempo de resposta dessas válvulas, obtidos pelos experimentos nessa faixa de  $P_s$ , foi possível determinar a frequência máxima de operação dessas válvulas e se verificou que será possível operar na frequência requerida, como apresentado na Tabela 5.2. A mesma foi determinada considerando a análise de controle apresentada na Seção 4.5.1, onde definiu-se que o tempo mínimo de escoamento ( $\tau_{\min}$ ) das válvulas Bürkert para uma FE de 100% é de 90 ms. Com esse valor é possível determinar os demais valores da tabela por meio das seguintes equações:

$$\tau_{\text{mín}}^{\text{FE}} = \tau_{\text{mín}}^{100\%} / \text{FE} \quad (5.1)$$

$$f_{\text{máx}}^{\text{FE}} = 1 / (2\tau_{\text{mín}}^{\text{FE}}) \quad (5.2)$$

Tabela 5.2 - Frequência máxima de operação das válvulas Bürkert.

<i>FE</i>	$\tau_{\text{mín}}$ (ms)	$f_{\text{máx}}$ (Hz)
100 %	90	5,55
87,5 %	102,85	4,86
75 %	120	4,16
62,5 %	144	3,47
50 %	180	2,77

Fonte: Elaborada pela Autora.

## 5.2 Bancada adaptada

A presente seção apresenta algumas imagens de como ficaram os novos componentes na bancada RMA. Além disso, apresenta os resultados obtidos com o circuito de acionamento com MOSFET e a medição do campo obtida por meio do sensor de Efeito Hall.

### 5.2.1 Circuito de acionamento e instalação das eletroválvulas

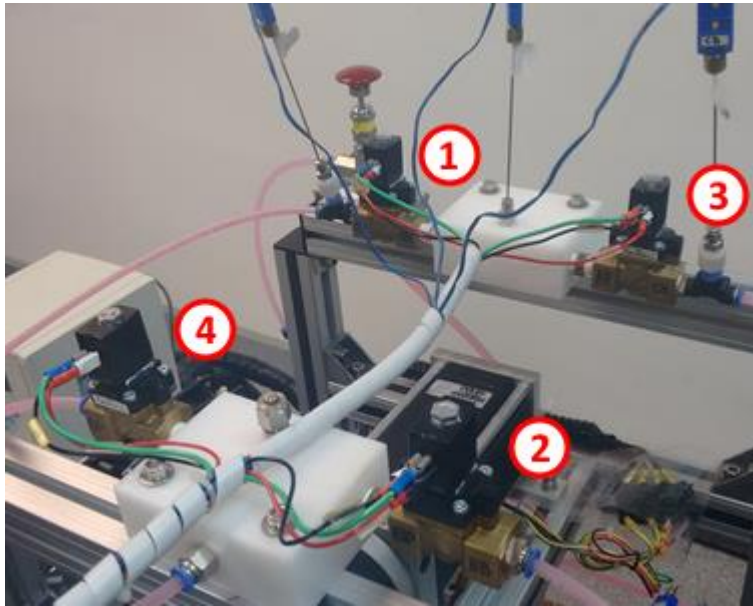
A PCI do circuito de acionamento com MOSFETs desenvolvida durante o projeto é apresentada na Figura 5.9 após ser instalada no painel elétrico da bancada experimental de RMA. Já a Figura 5.10 apresenta as quatro válvulas Bürkert instaladas na mesma bancada. O uso do circuito de acionamento com MOSFETs permitiu a troca instantânea do acionamento elétrico das válvulas, sem o atraso que ocorria na bancada experimental de eletroválvulas devido ao tempo de processamento e de resposta dos relés. Na Figura 5.11 estão apresentados os sinais de correntes das válvulas em um experimento. Os sinais de comando para fechar o primeiro par de válvulas e abrir o segundo foram programados para serem enviados em sequência para as válvulas. Como pode ser visto na Figura 5.11, o fechamento do par de válvulas 1 e a abertura do par 2 ocorreu instantaneamente.

Figura 5.9 - Placa de circuito integrado de acionamento e medição de potência das eletroválvulas



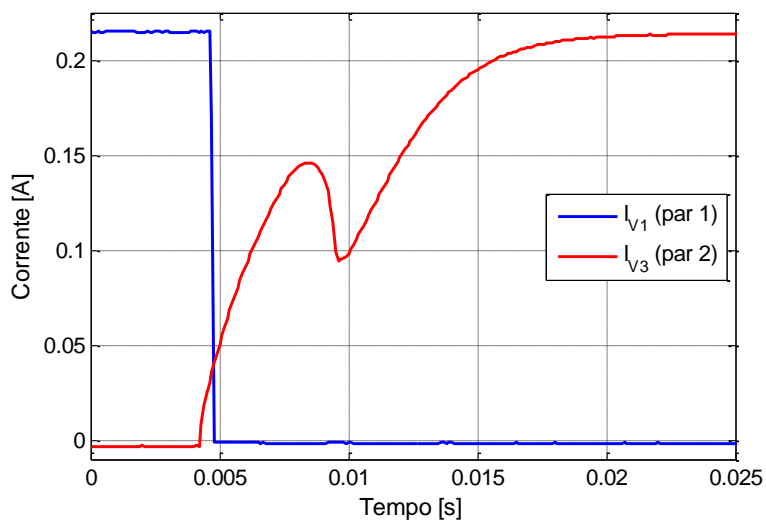
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.10 - Conjunto de eletroválvulas da Bürkert instaladas na bancada experimental de RMAs.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.11 - Corrente nas válvulas após receberem sinais de comando pelo circuito de acionamento com MOSFET.



Fonte: Elaborada pela Autora.

### 5.2.2 Caracterização da sonda Hall

O sensor de Efeito Hall, após ser realizada a instalação elétrica, ficou com a aparência apresentada na Figura 5.12.

A calibração do sensor foi realizada em uma posição que garantia que o sensor não saturasse. As curvas obtidas de antes e após a calibração do sensor são apresentadas na Figura 5.13. É preciso ressaltar que a calibração do sensor apresentou características que não eram

esperadas. O sensor saturou por volta de 45mT sendo que o esperado era ele medir até 100mT.

Figura 5.12 - Imagem do sensor de Efeito Hall após sua conexão elétrica

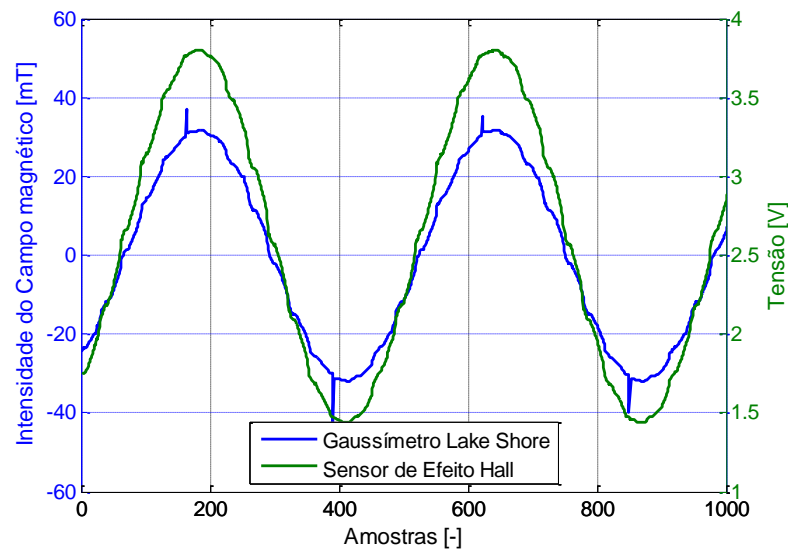


Fonte: Elaborada pela Autora.

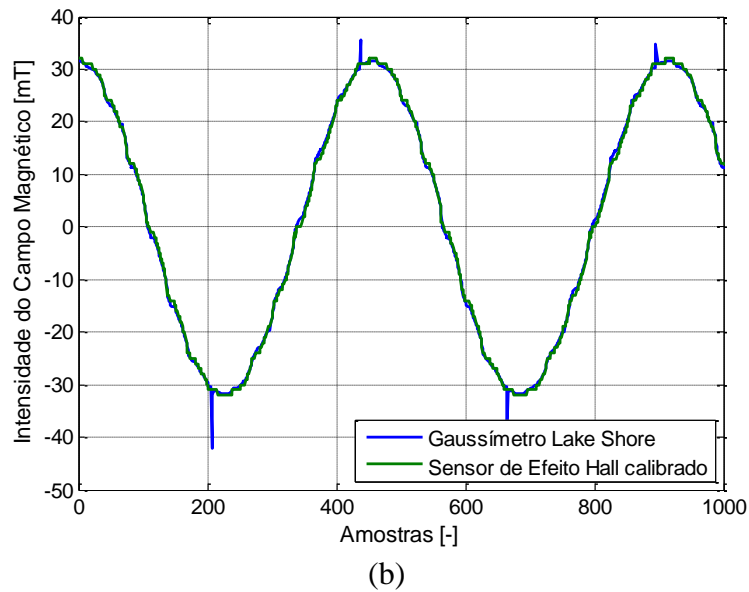
Para garantir que o sensor não irá saturar e medirá a componente  $B_y$  do campo durante a operação do controle, ele foi posicionado na distância de 105,5 mm do centro do ímã e fixado na parte interna de um pedaço de carcaça de G10 que mantém o regenerador imóvel, perpendicularmente ao eixo  $y$ .

Como resultado do SEH foi obtido uma medição de campo magnético que representa o perfil do campo que está sendo aplicado sobre o RMA. Através desses valores medidos, é possível controlar o acionamento das eletroválvulas.

Figura 5.13 - Calibração do sensor de Efeito Hall. (a) Sinal de saída do sensor antes da calibração. (b) Sinal resultante após a calibração.



(a)



Fonte: Elaborada pela Autora.

### 5.3 Sincronização dos escoamentos com o campo magnético

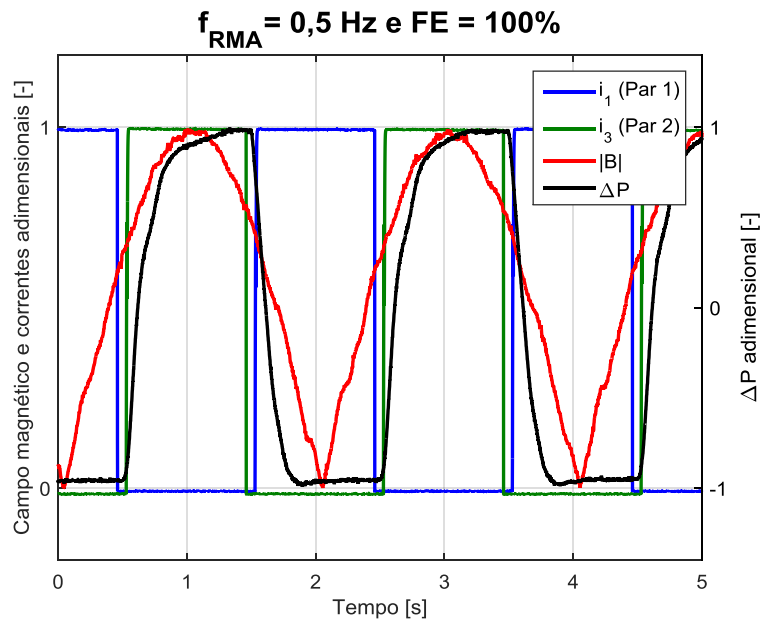
Esta seção dedica-se à apresentação dos resultados obtidos após a lógica de acionamento das eletroválvulas ser implementada, a qual é responsável por sincronizar os escoamentos com o campo magnético conforme as definições do usuário.

As análises dos escoamentos obtidos como resultado do acionamento das eletroválvulas foram realizadas através da diferença de pressão no RMA. Tal diferença é uma forma de se avaliar o perfil do escoamento que atravessa o regenerador, onde um valor nulo significa que não há escoamento, uma diferença positiva quer dizer que está ocorrendo o Escoamento Frio, e diferença negativa quer dizer Escoamento Quente.

A Figura 5.14 apresenta o sinal de campo medido e tratado pelo módulo de sincronização, juntamente com as correntes das válvulas  $V_1$  e  $V_3$ , e os escoamentos representados pela diferença de pressão no RMA. Todos os sinais foram normalizados para melhor visualização. Esse resultado foi obtido durante a execução de ciclos de RMA com uma fração de escoamento (FE) de 100%, definida pelo usuário, e frequência de 0,5 Hz. Por meio dos sinais das correntes, é possível verificar que existe um intervalo de tempo relativamente pequeno (70 ms) onde o controle de acionamento fez com que todas as válvulas permanecessem fechadas na teoria. Porém, esse intervalo de tempo foi implementado na lógica devido ao atraso de 80 ms do tempo de resposta para o fechamento de um par de válvulas e o atraso de 10 ms referente ao tempo de resposta para o início da abertura de outro par, onde a associação dessas informações resultou no intervalo de 70 ms conforme foi apresentado na Seção 4.5.1. Esse intervalo



Figura 5.14 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,5 Hz e FE de 100%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

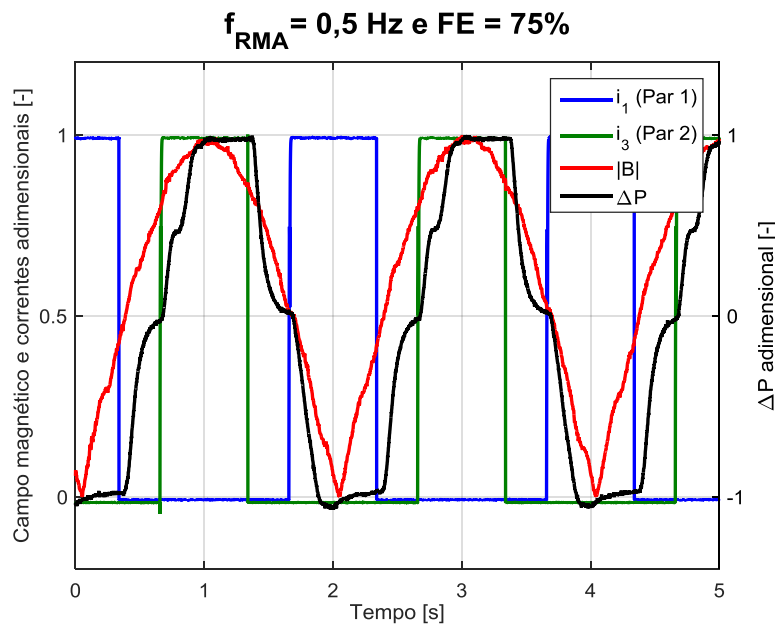
de tempo visa garantir o término de um escoamento e instantaneamente começar o próximo, proporcionando escoamentos durante 100% do ciclo de RMA. Na Figura 5.15 e na Figura 5.16 são apresentados resultados similares ao da Figura 5.14, porém para FE de 75% e 50%, respectivamente.

Analisando os resultados de escoamento apresentados, percebe-se que a oscilação entre os escoamentos no RMA ocorreu de forma sincronizada com o campo magnético, porém não ocorreram bem centralizados com os pontos máximos de magnetização e desmagnetização. Isso ocorreu devido ao tempo de estabilização dos escoamentos serem diferentes nessa banca-da experimental. Esse tempo ficou em torno de 200 ms, ou seja, muito acima do que estava sendo considerado na lógica de acionamento. Esse detalhe pode ser corrigido recalculando os tempos de respostas das eletroválvulas.

O sistema de acionamento das eletroválvulas mostrou-se satisfatório ao medir o campo e acionar as válvulas nos momentos adequados. Porém, devido ao atraso da chegada dos novos componentes hidráulicos, a conclusão da montagem da bancada experimental de RMA foi finalizada em paralelo com a finalização da escrita do presente documento. Em consequência disso, foi possível realizar apenas poucos experimentos com escoamentos, percebendo-se neste momento a necessidade de fazer os ajustes à lógica de acionamento, mencionados anteri-

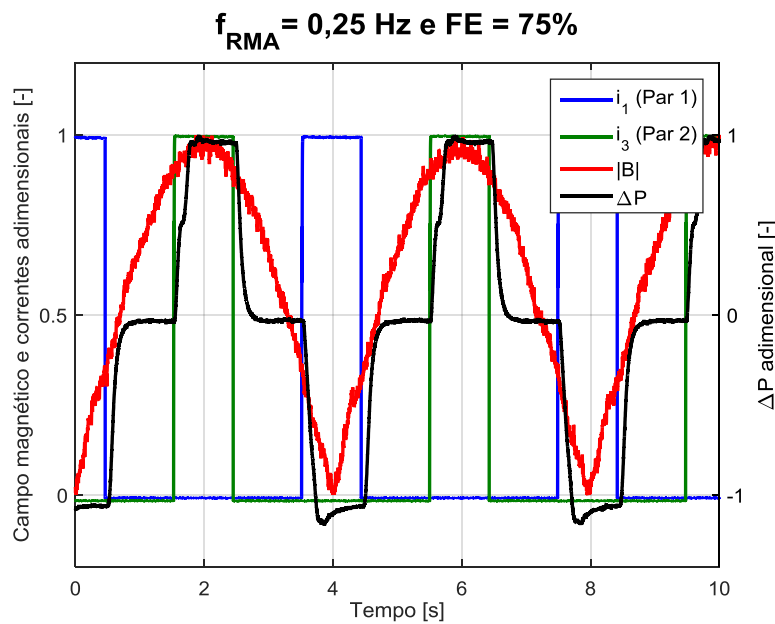
ormente. Esses ajustes não foram realizados a tempo para trazer melhores resultados a serem apresentados no presente documento.

Figura 5.15 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,5 Hz e FE de 75%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.16 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,5 Hz e FE de 50%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



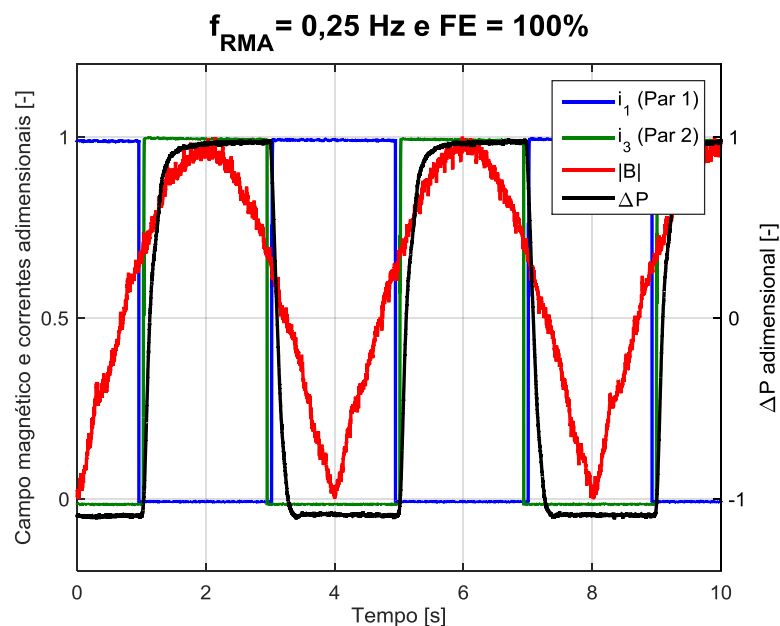
Fonte: Elaborada pela Autora.

Na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 são apresentados resultados de sincronização obtidos em outra frequência de ciclo de RMA, mostrando que o novo sistema de acionamento de eletroválvulas é capaz de realizar a sincronização necessária para o ciclo RMA em diferentes frequências. Além disso, pode ser observado que em frequências menores, o escoamento obtido se aproximou mais ao que era esperado, ou seja, ele está mais centralizado aos pontos máximos do ciclo. Isso ocorreu devido ao tempo de estabilização do escoamento ser pequeno quando comparado ao tempo em que ele permanece estável.

Apesar dos resultados aqui apresentados serem a primeira iteração no processo de aplicação do acionamento de eletroválvulas em um sistema de refrigeração magnética, isso possibilitou uma flexibilidade muito maior, quando comparado ao uso de válvulas acionadas mecanicamente. A lógica de acionamento desenvolvida e implementada ao longo deste trabalho permitiu ao usuário alterar as FE diretamente na interface gráfica, sem requerer alterações na bancada experimental, como era feito anteriormente.

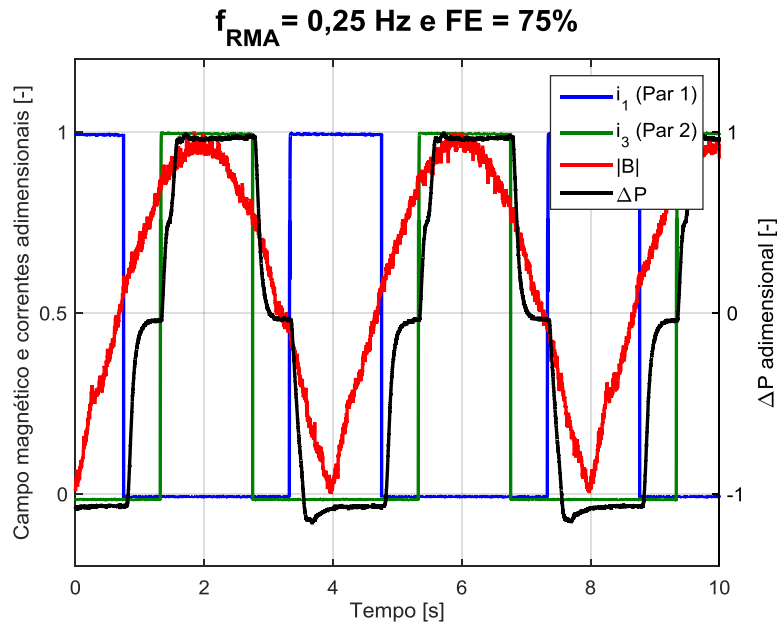
Os resultados obtidos com o sistema de acionamento das eletroválvulas utilizando um sensor de Efeito Hall e um circuito de acionamento com MOSFETs mostraram ser promissores e confiáveis para a sincronização do circuito hidráulico com o circuito magnético de um refrigerador magnético, apesar de ainda necessitar alguns ajustes. Por meio desse novo sistema, o grupo PoloMag possui um circuito hidráulico mais flexível, que facilitará os estudos em busca de melhores desempenhos para a refrigeração magnética.

Figura 5.17 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,25 Hz e FE de 100%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



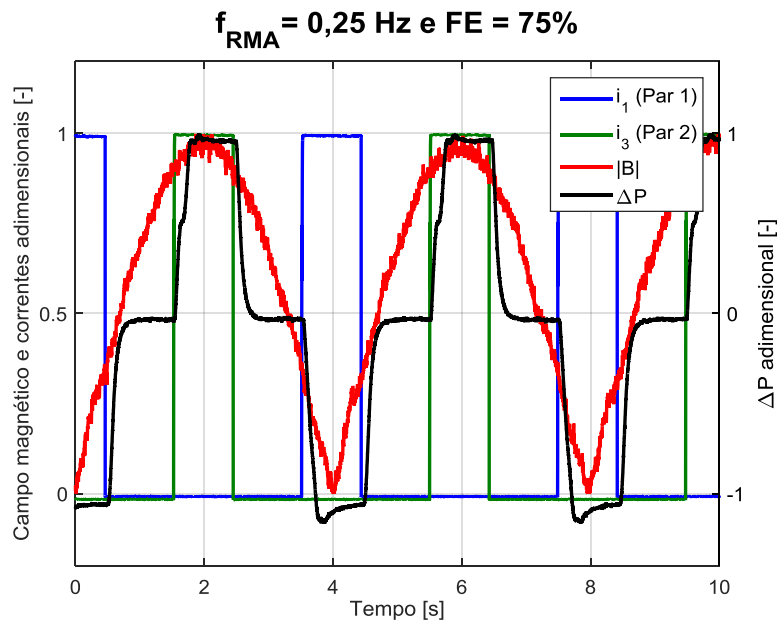
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.18 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,25 Hz e FE de 75%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 5.19 - Sincronização dos escoamentos com o campo magnético em uma  $f_{RMA}$  de 0,25 Hz e FE de 50%. Sinais de correntes e campo magnético normalizados. Escoamentos representados pela variação de pressão no RMA.  $\Delta P$  positivo indica Escoamento Frio e  $\Delta P$  negativo indica Escoamento Quente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho teve como objetivo substituir o sistema de válvulas rotativas utilizadas em uma bancada experimental de RMAs por um sistema de eletroválvulas, realizando o acionamento das mesmas de modo a permitir a sincronização dos escoamentos hidráulicos alternativos com o campo magnético aplicado a um RMA através da variação da FE.

O novo sistema de distribuição de escoamentos oscilatórios do fluido de trabalho foi desenvolvido para ser capaz de operar de forma confiável e com versatilidade, de modo a facilitar a operação e obter resultados válidos aos estudos a serem desenvolvidos pelo grupo de pesquisa PoloMag.

Para desenvolver o sistema de eletroválvulas, foram estudados dois tipos de válvulas solenoides comerciais, Bürkert e Danfoss, por meio de experimentos realizados na bancada experimental de eletroválvulas de Cardoso et. al (publicação em preparação). Esses estudos apontaram que as eletroválvulas Bürkert apresentariam melhores resultados na bancada em que o sistema seria implementado. Elas possuem menor perda de carga e menor consumo elétrico quando comparadas às válvulas Danfoss. Através dos estudos do tempo de resposta dessas válvulas, foi possível determinar o tempo mínimo de escoamento, o qual é aproximadamente 90 ms. Com esse tempo, determinou-se teoricamente a máxima frequência de operação que as válvulas Bürkert podem operar ciclos de RMA (5,55 Hz), cujo valor é bem superior ao que se espera ser utilizado na refrigeração magnética (em torno de 1 Hz). No entanto, esse valor precisa ser validado experimentalmente, pois o fabricante da válvula indica frequência de chaveamento máxima da válvula de 0,25 Hz.

Havendo a necessidade de um circuito eletrônico para acionar as eletroválvulas, foram estudados diferentes componentes capazes de chavear cargas. Entre relés, transistores bipolares de junção (BJT) e transistores MOSFETs, os transistores ganharam destaque devido ao tempo de resposta mais rápido, consumo de potência menor e não produzirem ruídos sonoros, quando comparados aos relés. Por meio de simulações no *software* Proteus 7, o MOSFET IRFZ44N apresentou um consumo elétrico menor ao BJT TIP120, o que influenciou na escolha do primeiro para a confecção do circuito de acionamento das eletroválvulas.

Para o desenvolvimento do sistema de acionamento das eletroválvulas, foi necessário também desenvolver um sistema de medição do campo magnético. Para tal, optou-se por utilizar um sensor capaz de medir diretamente a intensidade do campo magnético. O sensor escolhido foi o sensor de Efeito Hall SS49E da Sec Electronics Inc., cujo campo máximo medido e indicado em catálogo é de 100 mT. Porém, ao utilizá-lo, percebeu-se que ele saturava por

volta de 45 mT. Deste modo, o sensor foi posicionado em um ponto mais distante do centro do ímã, de modo que não saturasse e fosse capaz de medir o perfil do campo magnético aplicado ao regenerador. Esse resultado inesperado não foi um problema para o desenvolvimento da lógica de acionamento, pois esta utiliza em seus cálculos o perfil do campo magnético ao longo do tempo.

Finalmente, com as eletroválvulas selecionadas, o circuito de acionamento com MOS-FETs confeccionado, o sistema de medição do campo magnético desenvolvido, e todos estes instalados e adaptados na bancada experimental de RMAs, foi possível desenvolver a lógica de acionamento das eletroválvulas. A implementação da lógica foi realizada através do *software* LabVIEW. O resultado obtido por meio dela permitiu a sincronização dos escoamentos com o campo magnético, porém ainda necessita-se alguns ajustes.

A flexibilidade na escolha de perfis hidráulicos por meio da definição da FE via *software*, obtida através do sistema de acionamento de eletroválvulas, facilitará os estudos do grupo de pesquisa PoloMag em busca de melhores desempenhos para a refrigeração magnética. No entanto, o consumo energético das válvulas afeta diretamente o coeficiente de performance (COP). Se as eletroválvulas possuírem um consumo elevado, elas prejudicarão o desempenho do sistema de refrigeração.

Para concluir, através dos resultados obtidos é possível afirmar que sistema de acionamento de eletroválvulas é promissor e confiável para a sincronização do circuito hidráulico com o circuito magnético de um refrigerador magnético, além de poder operar em frequências mais altas com um consumo de energia menor.

Com base nas conclusões obtidas neste trabalho, são colocadas as seguintes perspectivas de trabalhos futuros:

- Realizar ajustes finais à lógica de acionamento de eletroválvulas para centralizar os escoamentos com momentos de máximos da magnetização e desmagnetização, obtendo assim, um melhor resultado.
- Substituir as válvulas Bürkert por eletroválvulas com menor consumo energético, menor perda de carga, menores tempos de resposta e maior frequência de chaveamento.
- Desenvolver um sistema de acionamento de eletroválvulas para um número maior de RMAs, permitindo a sincronia dos escoamentos através deles com o campo magnético.
- Implementar um controle capaz de corrigir possíveis desbalanceamentos de massa entre os escoamentos. Esse controle deve atuar na duração dos períodos dos escoamentos de cada etapa.

## REFERÊNCIAS

- APREA, C.; GRECO, A.; MAIORINO, A.; MASTRULLO, R.; TURA, A. **Initial experimental results from a Rotary permanent magnet magnetic refrigerator.** *International Journal of Refrigeration*, v. 43, p. 111 – 122, 2014.
- BAHL, C. R. H.; NIELSEN, K. K. **The effect of demagnetization on the magnetocaloric properties of gadolinium.** *Journal of Applied Physics*, v. 105, p. 013916(1–5), 2009.
- BRAGA, N. C. **Relés - Circuitos e Aplicações.** 1.ed. São Paulo: Editora Newton C. Braga, 2012.
- BROWN, J. S.; DOMANSKI, P. A. **Review of alternative cooling technologies.** *Applied Thermal Engineering*, v. 64, p. 252-262, 2014.
- BÜRKERT. **2/2-way Solenoid Valve with Servo Diaphragm, Type 6211.** Disponível em: <<https://www.burkert.ca/en/type/6211>> Acesso em: 25 abril 2017.
- CAPOVILLA, M. S.; LOZANO, J. A.; TREVIZOLI, P. V.; BARBOSA Jr., J. R. **Performance evaluation of a magnetic refrigeration system.** *Science and Technology of a the Built Environment*, p. 534-543, 2016.
- CARDOSO, P. O.; DESTRO, M. C.; ALVARES, M.G.; LOZANO, J. A.; DE NEGRI, V. J.; BARBOSA Jr., J. R. **Modeling of a novel digital hydraulic system for a magnetic refrigerator.** In: *Proceedings of the Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature.* Turim, Itália: [s.n.], 2016.
- CARDOSO, P. O.; DESTRO, M. C.; HOFFMANN, G.; ALVARES, M. G.; LOZANO, J. A.; DE NEGRI, V. J.; BARBOSA Jr., J. R. **Numerical and experimental assessment of a novel digital hydraulic system for magnetic refrigerators.** Em preparação para o *International Journal of Refrigeration*.
- CARDOSO, P. O. **Sistema de gerenciamento hidráulico utilizando eletroválvulas aplicado em refrigeradores magnéticos.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, em preparação.
- DANFOSS. **Data sheet - Solenoid valves, type EV310B.** Disponível em: <<http://products.danfoss.com/productrange/documents/industrialautomation/solenoid-valves/ev310b-direct-operated-3-2-way-solenoid-valves/#/>>. Acesso em: 25 abril 2017.
- DUTRA, S. L.; NAKASHIMA, A. T. D.; HOFFMANN, G.; LOZANO, J. A.; BARBOSA Jr., J. R. **Using electrovalves as a flow distribution system for an active magnetic regenerator.** In: *24<sup>th</sup> ABCM international Congress of Mechanical Engineering (COBEM).* Curitiba, Brasil: [s.n.], 2017.
- ENGELBRECHT, K.; ERIKSEN, D.; BAH, C. R. H.; BJØRK, R.; GEYTI, J.; LOZANO, J. A.; NIELSEN, K. K.; SAXILD, F.; SMITH, A.; PRYDS, N. **Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator.** *International Journal of Refrigeration*, v. 35, p. 1498–1505, 2012.

ERIKSEN, D.; ENGELBRECHT, K.; BAHL, C. R. H.; BJØRK, R.; NIELSEN, K. K.; IN-SINGA, A. R.; PRYDS, N. **Design and experimental tests of a rotary active magnetic re-generator prototype.** *International Journal of Refrigeration*, v. 58, p. 14–21, 2015.

GSCHNEIDNER Jr., K. A.; PECHARSKY, V. K. **Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects.** *International Journal of Refrigeration*, v. 31, p. 945-961, 2008.

HIRANO, N.; NAGAYA, S.; OKAMURA, T.; KAWANAMI, T.; WADA, H. **Development of room temperature magnetic refrigerator in Japan.** In: *Proceedings in 4th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*. [S.l.: s.n.], 2010.

JACOBS, S.; AURINGER, J.; BOEDER, A.; KOMOROWSKI, J. C. and L.; LEONARD, J.; RUSSEK, S.; ZIMM, C. **The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator.** *International Journal of Refrigeration*, v. 37, p. 84–91, 2014.

KITANOVSKI, A.; TUŠEK, J.; TOMC, U.; PLAZNIK, U.; OŽBOLT, M.; POREDOŠ, A. **Magnetocaloric Energy Conversion: From theory to applications.** [S.l.]: Springer, 2015.

LIRIO, L. E. A.. **Contribuições para análise de perdas em conversores de potência com MOSFET.** 2013. Dissertação (Mestrado) – COPPE / Programa de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

LOZANO, J. A. **Designing a rotatory magnetic refrigerator.** 2015. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2015.

NAKASHIMA, A. T. D. **Avaliação teórica e experimental da influência do perfil temporal do escoamento sobre a performance de um regenerador magnético-ativo.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2017.

NIELSEN, K. K.; BAHL, C. R. H.; SMITH, A. **Constraints on the adiabatic temperature change in magnetocaloric materials.** *Physical Review B*, American Physical Society, v. 81, n. 5, p. 054423, Feb 2010.

RASHID, M. H.. **Eletrônica de potência** Dispositivos, circuitos e aplicações. 4 ed. [s.l.]: Pearson, 2015.

ROWE, A.; TURA, A.; DIKEOS, J.; CHAHINE, R. **Near room temperature magnetic refrigeration.** In: *Proceedings in International Green Energy Conference*. Ontario, Canada: [s.n.], 2005.

SEC ELETRONICS INC. **SS49E Linear Hall Effect Sensor.** Disponível em: <<http://www.secsemi.com/products/Linear-Hall-ICs/SS49E.html>> Acesso em: 15 de março de 2017.

SMITH, A. **Who discovered the magnetocaloric effect?** *The European Physical Journal H*, v. 38, p. 507-517, 2013.

TEYBER, R.; TREVIZOLI, P.; NIKNIA, I.; CHRISTIAANSE, T.; GOVINDAPPA, P.; ROWE, A. **Experimental performance investigation of an active magnetic regenerator**



**subject to different fluid flow waveforms.** *International Journal of Refrigeration*, v. 74, p. 38 – 46, 2016.

TREVIZOLI, P. V. **Estudo experimental de um sistema de avaliação de materiais com efeito magnetocalórico para aplicações em refrigeração.** 2010. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2010.

TREVIZOLI, P. V. **Development of thermal regenerators for magnetic cooling application.** 2015. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2015.

TREVIZOLI, P. V.; LOZANO, J. A.; PEIXER, G. F.; BARBOSA Jr., J. R. **Design of nested halbach cylinder arrays for magnetic refrigeration applications.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 395, p. 109-122, 2015.

TURA, A.; ROWE, A. **Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization.** *International Journal of Refrigeration*, v. 34, p. 628-639, 2011.