



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Gabriel Martins do Rosário

**Sistema de sincronização hidráulica-magnética para unidade de refrigeração  
magnética**

Florianópolis  
2021

Gabriel Martins do Rosário

**Sistema de sincronização hidráulica-magnética para unidade de refrigeração magnética**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.

Co-orientadora: Gislaine Hoffmann, M.Sc.

Supervisor: Jaime Andrés Lozano Cadena, Dr.Eng.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rosário, Gabriel Martins do  
Sistema de sincronização hidráulica-magnética para  
unidade de refrigeração magnética / Gabriel Martins do  
Rosário ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch, 2021.  
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Refrigeração  
magnética. 3. Sistema de sincronização hidráulica  
magnética. 4. Supervisão e controle. I. Flesch, Rodolfo  
César Costa. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Gabriel Martins do Rosário

**Sistema de sincronização hidráulica-magnética para unidade de refrigeração magnética**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 27 de setembro de 2021.

---

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.  
Orientador  
UFSC/CTC/DAS

---

Jaime Andrés Lozano Cadena, Dr.Eng.  
Supervisor  
Laboratório POLO (EMC/CTC/UFSC)

---

Prof. Max Hering de Queiroz, Dr.  
Avaliador  
UFSC/CTC/DAS

---

Prof. Marcelo de Lellis Costa de Oliveira, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado a todos que fizeram parte da  
minha jornada na graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador e à minha co-orientadora, Prof. Rodolfo Flesch e Eng. Gislaine Hoffmann, pela dedicação e atenção aos detalhes tanto na correção desta monografia quanto no acompanhamento das minhas atividades de estágio. Pela rigidez técnica e pelos debates técnicos proporcionados. Por confiar no meu trabalho e por me incentivar a buscar o meu melhor.

Ao meu supervisor no Polo, Eng. Jaime Lozano, pelo suporte nas atividades do laboratório e pela solicitude. Pelos conselhos sobre carreira e pelas conversas inspiradoras. Pela resiliência na coordenação de um projeto experimental em tempos de pandemia. Da mesma forma que professor Rodolfo e Gislaine, por confiar no meu trabalho e me incentivar a buscar o meu melhor.

A todo o grupo PoloMag, do qual eu fiz parte de 2019 até este ano, pela parceria na superação de desafios técnicos e pelos ricos momentos de descontração. Agradeço especialmente aos meus colegas Anderson, Diego, Gislaine, Marcelo, Maria, Matheus e Sergio que estiveram comigo no dia a dia na maior parte do tempo ao longo desses anos. Não poderia deixar de citar aqui os colegas: Bernardo, Guilherme, Hígor, Jorge e Rafael.

Aos meus amigos, por todos os momentos que passamos juntos durante a graduação, tanto presencialmente quanto virtualmente. Aos meus amigos do ensino médio do IFSC de São José e aos amigos que fiz ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação. Cito aqui: Christopher, Cristian, Eduardo R., Guilherme N., Guilherme P., Gustavo A., Gustavo S., Luiz F., Matheus, Pedro, Renan, Rhanna e Yohannes.

Aos meus avós, Auro e Maria Aparecida, e aos meus pais, Adriano e Carolina, por todo apoio e carinho fornecidos. Agradeço o incentivo aos estudos e por fornecer o suporte necessário para que isso acontecesse. Agradeço também a minha namorada Juliane, pelo companheirismo e pela presença tão importantes nessa última etapa da minha graduação.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, por todo o conhecimento compartilhado, e pela Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de estudar em uma instituição pública de qualidade. Assim como à Embrapii, Codemge e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Refrigeração e Termofísica (Polo), pelo apoio financeiro.

Muito obrigado a todos!

*"Some people don't like change,  
but you need to embrace change if the alternative is disaster."  
(Ellon Musk, 2011)*

## RESUMO

A refrigeração magnética é uma tecnologia alternativa de refrigeração que usa refrigerantes sólidos e tem mostrado potencial para substituir tecnologias convencionais. A sincronização entre circuitos hidráulico e magnético é fundamental para o funcionamento de um sistema de refrigeração magnética. A maioria dos protótipos de refrigeradores magnéticos desenvolvidos até agora aplicam técnicas mecânicas de sincronização, como válvulas de vedação e cames. Nos últimos anos, a necessidade de flexibilidade nos parâmetros do ciclo hidráulico-magnético de refrigeradores magnéticos resultou na utilização de eletroválvulas para realizar o gerenciamento hidráulico e na criação de sistemas de sincronização baseados em processamento de sinais elétricos. O objetivo geral deste trabalho é criar um sistema de sincronização hidráulica-magnética para uma unidade de refrigeração experimental. Para tanto, elencaram-se as necessidades específicas do sistema termo-magnético estudado, que possibilitaram o desenvolvimento de sistemas de supervisão, aquisição e sincronização do refrigerador experimental. A partir de pesquisa bibliográfica, uma estratégia para identificação da posição do campo magnético no refrigerador e uma lógica de sincronização foram desenvolvidas, ambas executadas por um dispositivo com arranjo de portas programáveis em campo (FPGA, do inglês *field-programmable gate array*). Um componente para acionamento das eletroválvulas foi selecionado baseado no menor tempo de ativação elétrica, e uma PCI foi construída para possibilitar os acionamentos. Selecionaram-se componentes de aquisição e controle, que foram integrados por meio de uma aplicação com uma arquitetura modular. A análise de resultados mostrou que o sistema de sincronização desenvolvido é capaz de sincronizar os circuitos hidráulico e magnético do refrigerador magnético dentro dos requisitos desejados, além disso atende às funções de aquisição e supervisão. O sistema desenvolvido identifica o ciclo magnético com resolução mínima de  $0,0173^\circ$ , com frequência de atualização de até 15,6 kHz. Além disso, esse sistema possui uma resolução mínima de disparo de eletroválvulas de 0,16 s, que resulta em uma fração de escoamento de 2,25% em ciclos hidráulico-magnéticos de 1,5 Hz, sem considerar o atraso causado pelo escoamento.

**Palavras-chave:** Refrigeração magnética. Sistema de sincronização hidráulica-magnética. Supervisão e controle.

## ABSTRACT

The magnetic refrigeration is an alternative cooling technology that applies solid-state materials as refrigerants and it has shown potential to substitute conventional technologies. The synchronization between hydraulic and magnetic circuits is essential for the functioning of a magnetic refrigeration system. Most prototypes of magnetic refrigerators developed so far apply mechanical techniques of synchronization, such as rotary valves and cams. Over the past few years, the need for flexibility in the hydraulic and magnetic cycles of magnetic refrigerators has led to the use of electronic solutions, such as electrovalves, to carry out the fluid flow management and to synchronize both sub-systems based on the processing of electric signals. The main purpose of this work is to develop a hydraulic-magnetic synchronization system for an experimental magnetocaloric refrigeration unit. In this sense, the specific needs of the referred thermal-magnetic system were identified, which allowed for the development of a system of supervision, acquisition, and synchronization for the experimental refrigerator. Based on evidence from the literature, a strategy was developed to identify the positioning of the magnetic field within the refrigerator and to create a synchronization logic, both of which were carried out using a field-programmable gate array (FPGA). A component for the driving of electrovalves was selected based on the minimum turnaround time for electric activation, and a PCB was built for the driving. Components for acquisition and control were selected and then integrated by means of a modular architecture. The analysis of the obtained results demonstrated that the synchronization system that was developed is capable of synchronizing the hydraulic and magnetic systems of the magnetic refrigerator within the desired standards. Furthermore, it addresses the functions of acquisitions and supervision. The developed system identifies the magnetic cycle with a minimum resolution of  $0,0173^\circ$ , with an update rate of up to  $15,6$  kHz. Moreover, this system has a minimum trigger resolution of electrovalves of  $0,16$  s, which leads to a flow fraction of  $2.25\%$  in hydraulic-magnetic cycles of  $1.5$  Hz, without considering the delay caused by the flow.

**Keywords:** Magnetic refrigeration. Hydraulic-magnetic synchronization system. Control and supervision.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Descrição esquemática do ciclo termomagnético de Brayton aplicado a um RMA. . . . .	22
Figura 2 – Representação da sincronia entre campo magnético e vazão mássica durante o ciclo de refrigeração magnética. . . . .	24
Figura 3 – Ciclo magnético com frações de escoamento de 25% e 50%. . . . .	24
Figura 4 – Representação do sistema de sincronização de um refrigerador magnético que utiliza como atuadores válvulas solenoide. . . . .	26
Figura 5 – Arquitetura do sistema de sincronização do protótipo FAME de Huang et al. (2019) . . . . .	27
Figura 6 – Bancada móvel da URM. . . . .	30
Figura 7 – Bloco estator da URM. . . . .	31
Figura 8 – Registro da montagem do circuito magnético . . . . .	32
Figura 9 – Valores absolutos da incidência do campo magnético sobre um RMA. . . . .	34
Figura 10 – Diagrama hidráulico da URM. . . . .	37
Figura 11 – Diagrama da disposição dos regeneradores no estator. . . . .	38
Figura 12 – Diagrama simplificado do subsistema magnético. . . . .	43
Figura 13 – Pulsos do simulador de encoder. . . . .	45
Figura 14 – Disposição transdutores de efeito Hall . . . . .	46
Figura 15 – Circuito de corrente contínua do acionamento por TRIAC. . . . .	49
Figura 16 – Parte de corrente alternada do circuito projetado para avaliação do acionamento com TRIAC. . . . .	49
Figura 17 – Simulação do sinal sobre a eletroválvula nos estados de SW1 fechada e aberta, respectivamente. . . . .	50
Figura 18 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por TRIAC. . . . .	51
Figura 19 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por relé eletromecânico . . . . .	52
Figura 20 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por relé de estado sólido . . . . .	53
Figura 21 – Resultado do acionamento de 1 relé. . . . .	54
Figura 22 – Lógica simplificada de comparação da URM. . . . .	54
Figura 23 – Diagrama dos componentes físicos da URM. . . . .	59
Figura 24 – Diagrama da arquitetura do sistema embarcado do componente myRio-1900. . . . .	61
Figura 25 – Diagrama da macro estrutura do software do sistema de controle. . . . .	62
Figura 26 – Sub estruturas do módulo IHM. . . . .	63
Figura 27 – Sub estruturas do módulo RT. . . . .	64
Figura 28 – Sub estruturas do módulo FPGA. . . . .	65

Figura 29 – Momentos de ativação e desativação das eletroválvulas. . . . .	67
Figura 30 – IHM da URM. . . . .	69
Figura 31 – Medição transdutor efeito Hall . . . . .	76
Figura 32 – Ciclos de campo magnético a 0,5 Hz, 1 Hz e 1,5 Hz. . . . .	77
Figura 33 – Ativação dos relés em 5 ciclos de RMA. . . . .	80
Figura 34 – Ensaio de fração de escoamentos 1 Hz. . . . .	81
Figura 35 – Ensaio da função de deslocamento de fase. . . . .	82
Figura 36 – Testes parâmetros ímpares. . . . .	84
Figura 37 – Testes parâmetros pares. . . . .	85

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Função de cada componente do subsistema hidráulico. . . . .	31
Quadro 2 – Primeiro levantamento parcial de requisitos. . . . .	35
Quadro 3 – Escoamentos pelo RMA em relação ao acionamento das eletroválvulas. . . . .	39
Quadro 4 – Segundo levantamento parcial de requisitos. . . . .	40
Quadro 5 – Levantamento final de requisitos dos subsistemas de controle e supervisão. . . . .	42
Quadro 6 – Conversões feitas no <i>kernel Set FPGA</i> . . . . .	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de projeto de um refrigerador magnético. . . . .	18
Tabela 2 – Tabela parcial de transdutores. . . . .	41
Tabela 3 – Tabela de componentes do subsistema magnético. . . . .	47
Tabela 4 – Parâmetros resultantes ao alterar $N_m$ . . . . .	56
Tabela 5 – Distribuição dos componentes nos módulos do sistema de aquisição. . . . .	58
Tabela 6 – Resumo dos resultados do ensaio 2 canais subida e descida . . . . .	73
Tabela 7 – Resumo dos resultados do ensaio 1 canal subida e descida . . . . .	74
Tabela 8 – Resumo dos resultados do ensaio 1 canal apenas subida . . . . .	75
Tabela 9 – Tabela de valores calculados para verificação da implementação da lógica de sincronização. . . . .	78
Tabela 10 – Resultados dos testes definidos na tabela 9. . . . .	79
Tabela 11 – Associação regeneradores e relés. . . . .	80
Tabela 12 – Valores inseridos na IHM e valores esperados na interface do FPGA. . . . .	83

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	METODOLOGIA	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>21</b>
2.1	REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA	21
2.2	SISTEMAS DE SINCRONIZAÇÃO HIDRÁULICA-MAGNÉTICA	25
2.3	COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO	27
<b>3</b>	<b>UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA</b>	<b>29</b>
3.1	ESTRUTURAS	29
3.2	OPERAÇÃO	32
<b>3.2.1</b>	<b>Subsistema magnético</b>	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Subsistema hidráulico</b>	<b>35</b>
3.3	REQUISITOS DOS SUBSISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO	40
<b>4</b>	<b>DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS E COMPONENTES</b>	<b>43</b>
4.1	SISTEMA MAGNÉTICO	43
<b>4.1.1</b>	<b>Estratégia de medição do ciclo magnético</b>	<b>43</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Componentes</b>	<b>45</b>
4.2	COMPONENTE DE ACIONAMENTO DAS ELETROVÁLVULAS	47
<b>4.2.1</b>	<b>TRIAC</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Relé eletromecânico</b>	<b>50</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Relé de estado sólido</b>	<b>51</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Componente selecionado</b>	<b>52</b>
4.3	LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO	53
4.4	DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DE AQUISIÇÃO E CONTROLE	55
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE</b>	<b>60</b>
5.1	DISPOSITIVO MYRIO-1900	60
5.2	ARQUITETURA DO SOFTWARE	60
5.3	<i>KERNELS</i> DESENVOLVIDOS	63
5.4	IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO	66
5.5	INTERFACE HUMANO-MÁQUINA	68
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	70
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>72</b>
6.1	ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PULSOS	72
<b>6.1.1</b>	<b>Medição subida e descida de dois canais</b>	<b>73</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Medição subida e descida de um canal</b>	<b>74</b>

<b>6.1.3</b>	<b>Medição subida de um canal . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Análise dos resultados . . . . .</b>	<b>75</b>
6.2	ENSAIOS DE ROTAÇÃO DO ÍMÃ . . . . .	75
6.3	ENSAIOS DA LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO . . . . .	77
<b>6.3.1</b>	<b>Concordância lógica . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Ensaio de sincronização . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Análise dos resultados . . . . .</b>	<b>81</b>
6.4	OUTROS COMANDOS . . . . .	83
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .	84
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de refrigeração visam a controlar a temperatura de um ambiente abaixo da temperatura do meio externo. Suas aplicações são vastas e permeiam tanto o meio doméstico quanto o meio industrial, mostrando-se de fundamental importância para a vida cotidiana e para o desenvolvimento da sociedade moderna. Alguns dos muitos exemplos da utilidade da refrigeração são: conservação de alimentos, climatização de ambientes e controle de condições de produção (BANSAL; VINEYARD; ABDELAZIZ, 2012).

Atualmente, a grande maioria dos sistemas de refrigeração emprega a técnica de compressão mecânica de vapor, sendo essa uma técnica bem estabelecida. Essa tecnologia é resultado de décadas de pesquisa, o que tornou possível a redução considerável de seu preço, a otimização da eficiência e a diminuição do consumo energético do sistema (POSSAMAI; TODESCAT, 2004). No entanto, o emprego de algumas substâncias danosas ao meio ambiente, sobretudo alguns tipos de gases refrigerantes, passou a ser questionado, nos últimos anos, devido a seus efeitos sobre o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio (UNFCCC, 2018). Esse questionamento deu início a pesquisas por tecnologias alternativas de refrigeração, que almejam ganho em eficiência e redução no impacto ambiental (QIAN et al., 2016).

No campo de pesquisa de tecnologias alternativas de refrigeração, há técnicas que utilizam diferentes efeitos físicos, como o magnetocalórico (EMC), o barocalórico, o elastocalórico e o eletrocalórico. Entre as técnicas alternativas de refrigeração, a refrigeração magnética tem chamado a atenção de especialistas ao redor do mundo, devido à aplicação de um material refrigerante no estado sólido e, principalmente, ao potencial de eficiência gerado pela característica de reversibilidade do efeito magnetocalórico (BROWN; DOMANSKI, 2013). Para uma classe particular de materiais magnéticos, o EMC se traduz em uma variação positiva na temperatura do material, caso a variação de campo magnético seja elevada e as condições sejam adiabáticas. Nessas mesmas circunstâncias, a redução do campo magnético produz uma variação negativa da temperatura do material. Dessa forma, o EMC pode ser caracterizado em função de uma variação adiabática de temperatura, e a sua reversibilidade é a principal vantagem em termos de eficiência térmica (NIELSEN; BAHL; SMITH, 2010).

Como o efeito magnetocalórico em si produz pequenas variações de temperatura no material refrigerante de estado sólido, para aumentar a variação total gerada pelos refrigeradores, são utilizados Regeneradores Magnéticos Ativos (RMAs). Os regeneradores são estruturas tubulares preenchidas por material poroso por onde passa um fluido de transferência de calor (que geralmente é constituído por água com algum anticorrosivo). Se a matriz sólida for formada por material com disposição ao EMC, o regenerador passa a ser um RMA. No RMA, a matriz sólida é aquecida e resfriada de

acordo com a resposta do EMC enquanto troca calor com o fluido de transferência de calor (FORTKAMP et al., 2020). Assim, por meio da sincronização entre escoamentos oscilatórios e ciclos de campo magnético no RMA, é possível estabelecer um ciclo de refrigeração. O ciclo de refrigeração magnética mais empregado em protótipos de refrigeradores magnéticos é o chamado ciclo regenerativo termo-magnético de Brayton (KITANOVSKI et al., 2015).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Os sistemas de sincronização hidráulica-magnética têm evoluído junto com o desenvolvimento dos sistemas de refrigeração magnética. Até 2017, segundo Cardoso (2018), os sistemas de sincronização hidráulica-magnética de refrigeradores magnéticos do tipo ímã rotativo costumavam ser feitos por meio de arranjos mecânicos. Componentes mecânicos, como cames e faces de vedação, eram acoplados a eixos que ao rotacionar estancavam ou permitiam a passagem do fluido de transferência pelo RMA, possibilitando o gerenciamento do circuito hidráulico. A rotação desse eixo era transmitida para o ímã, e essa conexão possibilitava a sincronização entre os ciclos hidráulico e magnético pelo RMA. A partir de 2017, a necessidade da alteração de parâmetros do ciclo de refrigeração de forma mais ágil levou à criação de novos sistemas baseados no acionamento hidráulico por eletroválvulas (CARDOSO, 2018).

Um sistema de sincronização hidráulica-magnética confiável para um protótipo de refrigerador magnético é de grande importância para a sua operação, a avaliação de seu desempenho e o posterior desenvolvimento do produto a nível comercial. O projeto de um sistema de refrigeração magnética depende de um grande número de variáveis geométricas, magnéticas e hidráulicas, tais como as apresentadas na tabela 1 (ROWE; TURA; DIKEOS, 2005). No projeto, é necessário resolver a interconexão entre seus parâmetros e, além disso, considerar as limitações de fabricação devido à restrição de recursos. Os parâmetros de desempenho de um refrigerador magnético não podem ser determinados usando-se apenas técnicas de modelagem matemática e análises termodinâmicas básicas, assim, ensaios experimentais se mostram necessários (LOZANO, 2015).

O grupo de pesquisa em tecnologias alternativas de refrigeração, PoloMag, do Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica (POLO) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) tem gerado contribuições ao acervo científico da área de refrigeração magnética. Atualmente, o grupo está com duas linhas de pesquisa, sendo a primeira o desenvolvimento de uma adega doméstica que opera por meio da tecnologia de refrigeração magnética (NAKASHIMA et al., 2021), e a segunda, o desenvolvimento de um condicionador de ar, também operado por meio da refrigeração magnética. Essa segunda linha de pesquisa busca alcançar uma capacidade de refrigeração de 9000 Btu/h (2,6 kW), o que equivale

Tabela 1 – Variáveis de projeto de um refrigerador magnético.

<b>Geométricas</b>	<b>Magnéticas</b>	<b>Hidráulicas</b>
Porosidade	Intensidade	Fluido de transferência
Material magnetocalórico	Distribuição de campo	Utilização
Forma do regenerador	Vão magnético	Frequência de operação
Geometria da Matriz	Número de polos	Perda de carga
<i>Aspect ratio</i>	Torque	Temperatura de operação
Encapsulamento	Dimensão	Acionamento
Massa magnetocalórica	Massa do ímã	Sincronização

Fonte – Adaptado de (ROWE; TURA; DIKEOS, 2005)

a aproximadamente cem vezes a capacidade de refrigeração alcançada pela adegas e torna essa pesquisa mais complexa e desafiadora. O atual estágio de desenvolvimento do projeto do condicionador de ar magnético é a construção de um protótipo, a unidade de refrigeração magnética (URM), para análises e estudos. Assim, este trabalho foi elaborado com o fim de desenvolver o sistema de sincronização hidráulica-magnética da URM.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de sincronização hidráulica-magnética para uma unidade de refrigeração magnética experimental. É importante para o projeto do refrigerador magnético que esse sistema de sincronização possibilite o controle das variáveis do ciclo de RMA de acordo com as necessidades de avaliação do refrigerador, gerando o requisito de um sistema incrementável e de configuração flexível. O incremento das funções do sistema de sincronização não deve afetar o desempenho do sistema.

Para alcançar o objetivo geral, são listados os seguintes objetivos específicos deste trabalho:

1. Desenvolver estratégia de medição do ciclo magnético e definir os respectivos componentes para execução;
2. Definir o componente de acionamento das eletroválvulas;
3. Desenvolver lógica de sincronização dos circuitos hidráulico e magnético;
4. Definir componentes de aquisição e controle;
5. Integrar sistemas de aquisição, supervisão e controle, de modo a corresponder aos requisitos de projeto.

### 1.3 METODOLOGIA

Para atingir o primeiro objetivo específico proposto foram analisadas estratégias de identificação de ciclo magnético empregadas em outros sistemas de refrigeração magnética, com características comuns à URM, disponíveis na literatura. Duas técnicas principais foram encontradas, sendo elas a identificação do ciclo por medição através de sensores de efeito Hall e a medição da posição do ímã por meio de encoder. A técnica adotada para o sistema de sincronização da URM foi a segunda citada. A estratégia desenvolvida e os componentes utilizados para a identificação da posição do ciclo magnético em relação aos RMAs é apresentada na Seção 4.1 do documento e a análise das técnicas utilizadas em diferentes sistemas termo-magnéticos se encontra na Seção 2.2 do capítulo de revisão bibliográfica.

Para atingir o segundo objetivo específico foi analisado o comportamento de três componentes, sendo eles: TRIAC, relé eletromecânico e relé de estado sólido. Essa análise buscou encontrar qual dos componentes possuía o menor tempo de atraso de ativação e desativação, além do melhor comportamento do ponto de vista de sinal quando operava com a eletroválvula. A análise do TRIAC envolveu a simulação do circuito e posteriormente sua construção física. O comportamento dos três componentes operando o acionamento da eletroválvula foi analisado experimentalmente. Esses estudos resultaram na definição do relé de estado sólido como componente definido para o acionamento e na construção de uma placa PCI composta pelo componente selecionado. As análises e a PCI construída são apresentadas na seção 4.2.

Para atingir o terceiro objetivo específico foram analisadas as lógicas propostas por outros sistemas de sincronização de refrigeradores magnéticos e foram considerados as particularidades da URM. Também foi considerado o caráter digital da identificação do ciclo magnético e dos acionamentos, resultando na lógica apresentada na Seção 4.3.

Para atingir o quarto objetivo específico foram analisadas as opções de componentes disponíveis no mercado diante dos requisitos específicos da URM abordados no capítulo 3. Essa análise considerou todos os sinais que os componentes de controle e aquisição teriam que medir e gerar. Além disso, a pesquisa da revisão bibliográfica também influenciou a decisão de optar por um componente que possuísse um FPGA para o processamento dos sinais digitais. A análise dos componentes disponíveis no mercado e a definição dos componentes são apresentadas na Seção 4.4.

Para atingir o quinto objetivo específico foi estudado o guia National Instruments (2014) e desenvolvido em ambiente LabVIEW três aplicações, uma para IHM, uma para executar a lógica de sincronização baseada em técnicas digitais e outra responsável pela integração das outras duas citadas. O estudo do guia permitiu o desenvolvimento dessas três aplicações que são executadas por processadores distintos, sendo a lógica de sincronização executada por um FPGA. No capítulo 5 é apresentada a arquitetura

modular da aplicação desenvolvida e as funções desses respectivos módulos. Na seção 5.1 há uma breve explicação da arquitetura do hardware do componente de controle. Na Seção 5.2 são apresentadas os três módulos principais, que são executados por processadores diferentes. Na Seção 5.3 são apresentadas as estruturas desenvolvidas para o módulo de integração. Na seção 5.4 são apresentadas as estruturas desenvolvidas para o módulo de execução da lógica de sincronização. Na Seção 5.5 é apresentada a IHM do sistema. Na seção 5.6 são feitas as considerações finais do Capítulo 5.

Para avaliar os resultados obtidos foram analisadas as funcionalidades e os limites do sistema de sincronização hidráulica-magnética desenvolvido. Foram feitos ensaios para definição de parâmetros do sistema de sincronização e ensaios para verificação de correspondência lógica entre os parâmetros inseridos na IHM e as variáveis medidas. Assim, puderam ser verificados os requisitos de facilidade de manutenção e incremento do sistema, além da efetividade da arquitetura desenvolvida, uma vez que em nenhum momento da operação identificou-se a dessincronização entre os ciclos. As análises resultaram também na resolução mínima de identificação da posição do ciclo magnético, na sua frequência de atualização e na menor fração de escoamento alcançada pelo sistema, correspondendo assim aos requisitos de projeto da URM.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta monografia está dividida em 7 capítulos: O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos sobre refrigeração magnética utilizados neste trabalho e uma análise de sistemas de sincronização hidráulica-magnética utilizados em refrigeradores magnéticos. O Capítulo 3 apresenta a URM, explica o funcionamento dos seus sistemas magnético e hidráulico e faz um levantamento dos requisitos para o seu sistema de sincronização. O Capítulo 4 apresenta a definição das estratégias e dos componentes de hardware do sistema. O Capítulo 5 apresenta as estruturas das aplicações em software desenvolvidas para integração dos sistemas. O Capítulo 6 apresenta a análise dos resultados obtidos pela seleção dos componentes e definição das estratégias apresentadas ao longo deste trabalho para formar o sistema de sincronização e controle da URM. O Capítulo 7 apresenta as considerações finais e as perspectivas de trabalhos futuros resultantes do desenvolvimento deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os conceitos empregados neste trabalho. A Seção 2.1 apresenta os conceitos relacionados a refrigeração magnética, tais como: os três principais sistemas que compõem um refrigerador magnético, as etapas do ciclo de refrigeração magnética, os principais parâmetros do ciclo de refrigeração e a importância da sincronização hidráulica-magnética em um sistema de refrigeração magnética. A Seção 2.2 apresenta uma análise dos sistemas de sincronização para refrigeradores magnéticos encontrados na literatura. A Seção 2.3 apresenta as conclusões do capítulo.

### 2.1 REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA

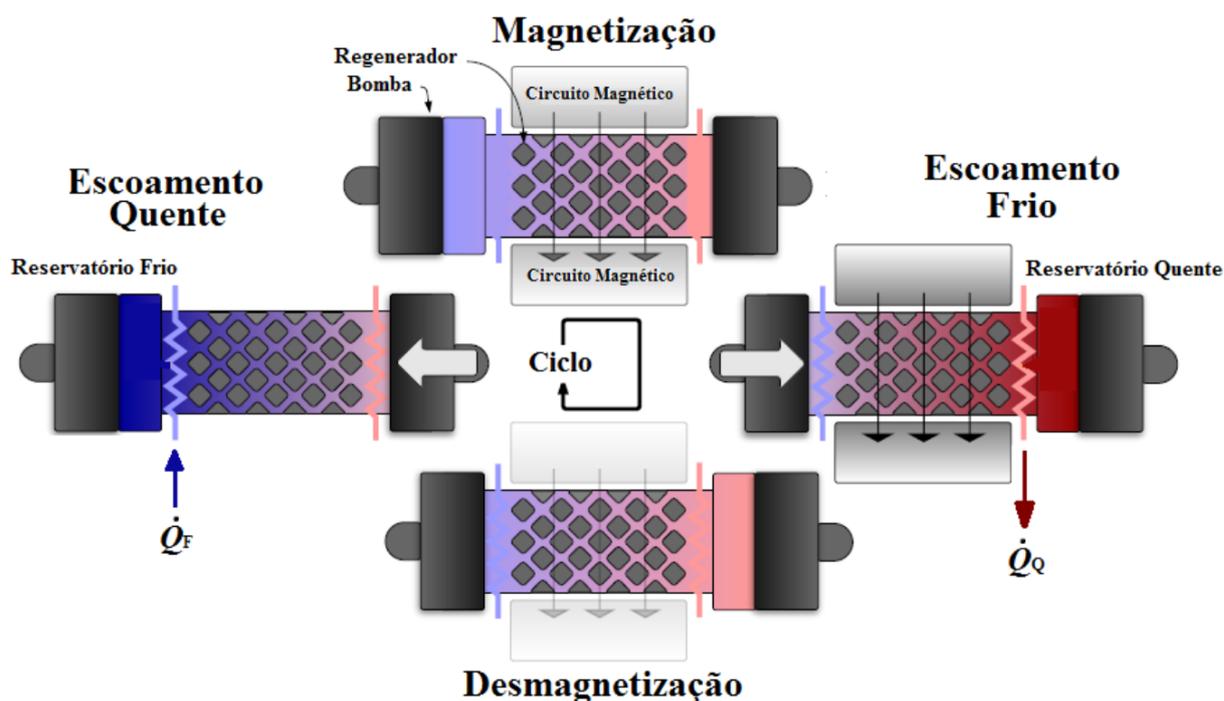
O principal desafio da refrigeração magnética é a limitação da diferença de temperatura que pode ser estabelecida entre os reservatórios térmicos ( $\Delta T_{\text{span}}$ ) devido às baixas amplitudes da variação adiabática de temperatura ( $\Delta T_{\text{ad}}$ ) no material sólido refrigerante, proporcionada pelo EMC. Para um material de referência como o Gadolínio (Gd), a  $\Delta T_{\text{ad}}$  é de cerca de 2 K a 3 K para uma variação de 1 T de campo magnético (NIELSEN; BAHL; SMITH, 2010). Para superar essa restrição, o material magnetocalórico é aplicado como uma matriz regeneradora de calor, o RMA.

Um sistema de refrigeração magnética que opera com RMA é normalmente composto por três sistemas principais (LOZANO, 2015): sistema magnético, sistema hidráulico e o próprio sistema de RMAs. O sistema magnético é responsável por fornecer a variação da densidade de fluxo magnético sobre o RMA e é composto essencialmente por ímãs. O sistema hidráulico é responsável por promover escoamentos oscilatórios do fluido de transferência de calor pelos RMAs e é composto essencialmente por motobomba e válvulas que fazem o gerenciamento hidráulico (SANTOS, 2020). O sistema de RMA é composto essencialmente por uma associação de RMAs (ou um único RMA). Outros componentes que compõem um sistema de refrigeração magnética são trocadores de calor e exaustores utilizados para promover a interação térmica entre o sistema refrigerador e os reservatórios térmicos.

Para entender o funcionamento de um sistema de refrigeração magnética que opera com RMAs, o diagrama da figura 1 apresenta as quatro etapas do ciclo de refrigeração magnética padrão com os principais componentes. Para representar as etapas, esse diagrama apresenta um RMA que contém o material magnetocalórico. As etapas de magnetização e desmagnetização são caracterizadas por variações de campo magnético sobre o RMA proporcionadas pelo circuito magnético. O circuito hidráulico promove as etapas de escoamento quente e frio pelo RMA e a direção desses escoamentos é representada pelas setas brancas no diagrama. A temperatura do fluido de transferência de calor é representada no diagrama pela cor do local, a cor é

mais avermelhada onde a temperatura é maior. Nos locais denominados reservatórios quente e frio são posicionados os trocadores de calor, através dos quais passa o fluido de transferência a fim de realizar as trocas de calor com o ambiente. No reservatório quente, o fluido rejeita calor a uma taxa  $\dot{Q}_Q$  enquanto que no reservatório frio o fluido absorve calor a uma taxa  $\dot{Q}_F$ .

Figura 1 – Descrição esquemática do ciclo termomagnético de Brayton aplicado a um RMA.



Fonte – Adaptado de Trevizoli (2015).

O ciclo de refrigeração magnética padrão apresentado no diagrama da figura 1 se baseia no ciclo termo magnético de Brayton, cujas etapas são as seguintes (ROWE; TURA; DIKEOS, 2005):

1. *Magnetização adiabática*: nesta etapa, o material magnetocalórico, que está em uma determinada temperatura e mantido em condição adiabática, é submetido a uma variação positiva de campo magnético, o que induz um aumento de sua temperatura em  $\Delta T_{ad}$ , devido ao EMC.
2. *Escoamento frio*: depois da magnetização adiabática, o campo magnético sobre o RMA é mantido constante (processo *isofield*) e um fluido de transferência de calor, proveniente do reservatório frio, escoar através do RMA em direção ao reservatório quente. O fluido que sai do RMA nesse processo absorveu calor do refrigerante e está a uma temperatura maior que o reservatório quente. Quando

ele chegar nesse reservatório, o que ocorrerá não necessariamente no mesmo ciclo, ele rejeitará calor a uma taxa  $\dot{Q}_q$  para o ambiente. Dessa forma, nesse sistema o refrigerante sólido não entra em contato direto com os reservatórios térmicos.

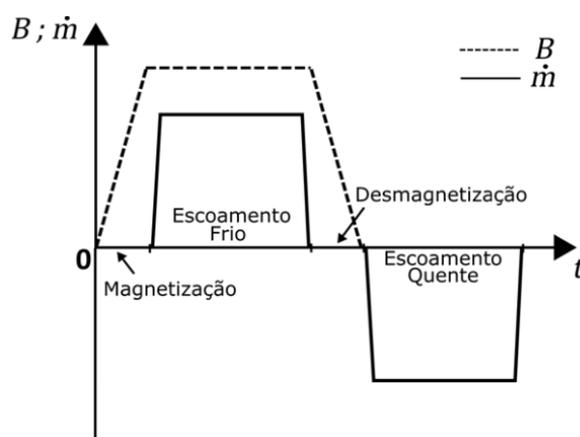
3. *Desmagnetização adiabática*: Nesta etapa, o campo magnético gerado pelo ímã deixa de incidir sobre o RMA. De forma similar à magnetização adiabática, o processo de desmagnetização adiabática do RMA reduz a temperatura do refrigerante sólido em  $\Delta T_{ad}$  devido ao EMC.
4. *Escoamento quente*: com a matriz desmagnetizada, o fluido de transferência de calor, proveniente do reservatório quente, escoar através do RMA em direção ao reservatório frio. A matriz regeneradora, que se encontra mais fria do que o reservatório quente devido à desmagnetização adiabática, absorve calor do fluido, aumentando a sua energia interna. Quando o fluido chega no reservatório frio, não necessariamente no mesmo ciclo, ele está a uma temperatura mais baixa do que esse reservatório, o que possibilita a interação térmica entre fluido e reservatório e a absorção de calor a uma taxa  $\dot{Q}_F$ . A parcela de calor sensível absorvida pelo fluido de transferência no reservatório frio corresponde à capacidade de refrigeração ( $\dot{Q}_F$ ) do sistema.

Para que aconteça o ciclo termomagnético de RMA, o sistema magnético e o sistema hidráulico devem trabalhar em harmonia e, para tal, é necessário o estudo de como coordenar todas as operações de maneira desejável. Para esse estudo, é feita uma investigação de quais variáveis devem ser controladas e quais variáveis devem ser observadas, a fim de se atingir a maior eficiência do sistema de refrigeração. A figura 2 apresenta a sincronização entre esses dois sistemas. As etapas de escoamento quente e frio dessa figura correspondem às etapas descritas do diagrama da figura 1. Do ponto de vista temporal, o escoamento frio é sincronizado para que aconteça quando o material magnetocalórico está magnetizado, o que permite que o fluido de transferência absorva calor do material ao atravessá-lo e dissipe esse calor no reservatório quente. Já o escoamento quente é sincronizado para que aconteça quando o material está desmagnetizado, permitindo que o fluido dissipe calor para o material ao atravessá-lo e absorva calor do reservatório frio a uma taxa  $\dot{Q}_F$ .

Entre os principais parâmetros do ciclo termomagnético de RMA que influenciam na capacidade de refrigeração de um refrigerador magnético estão a frequência do ciclo de RMA ( $f_{RMA}$ ), a vazão mássica desse fluido ( $\dot{m}$ ) e a fração de escoamento ( $K_e$ ). Esse último parâmetro representa a porcentagem da duração dos escoamentos do fluido de transferência de calor em relação ao período do ciclo de RMA, sendo definido da seguinte forma:

$$K_e = D_e f_{RMA} 100, \quad (1)$$

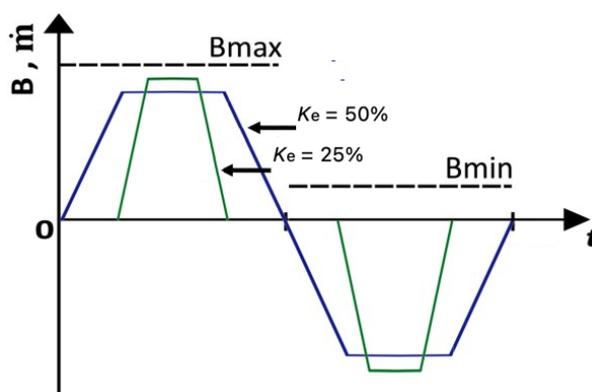
Figura 2 – Representação da sincronia entre campo magnético e vazão mássica durante o ciclo de refrigeração magnética.



Fonte – Adaptado de Hoffmann (2017)

em que  $D_e$  é a duração de cada escoamento em segundos. A figura 3 apresenta um ciclo magnético em que estão representados dois ciclos de RMA diferentes, um com fração de escoamento a 25% e outro com fração de escoamento a 50%.

Figura 3 – Ciclo magnético com frações de escoamento de 25% e 50%.



Fonte – Elaborada pelo Autor.

Esses parâmetros costumam ser variáveis de operação do sistema e podem ser utilizados para controlar a temperatura do reservatório frio em uma referência desejada (HOFFMANN, 2020). Mantê-los nos valores desejados e garantir a sincronização hidráulico-magnética é de fundamental importância para o desempenho do sistema.

## 2.2 SISTEMAS DE SINCRONIZAÇÃO HIDRÁULICA-MAGNÉTICA

O sistema de sincronização hidráulica-magnético pode ser puramente mecânico ou então apresentar sistemas eletrônicos que promovem uma maior flexibilidade para os parâmetros de sincronização. Segundo Cardoso (2018), até 2017 era possível classificar os sistemas de sincronização em três grupos baseados na utilização dos atuadores hidráulicos:

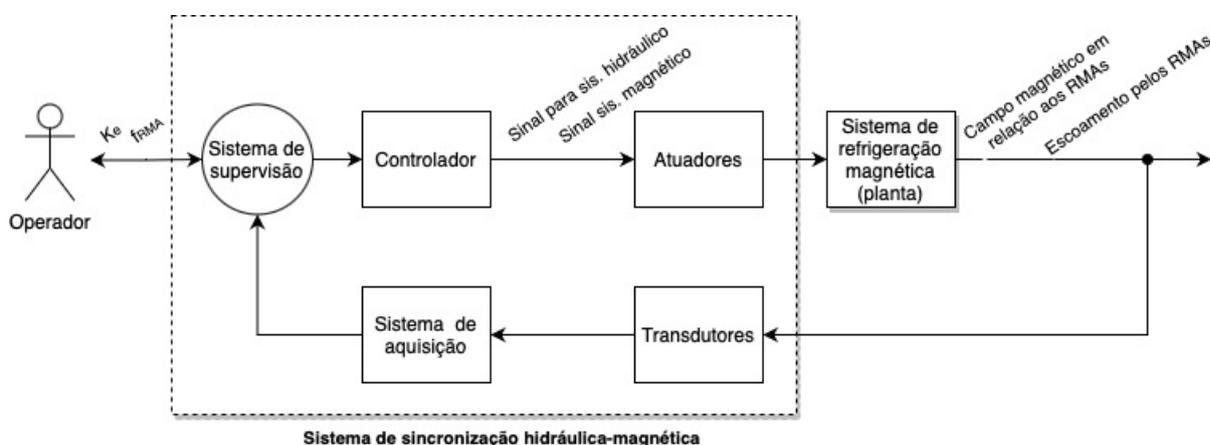
- *válvulas rotativas com vedação face a face*, utilizadas nos protótipos de Engelbrecht et al. (2012), Jacobs et al. (2014), Hirano et al. (2010), Aprea et al. (2014) e Lozano (2015);
- *válvulas de assento atuadas por ressaltos de cames*, utilizadas nos protótipos de Eriksen et al. (2015) e Fortkamp et al. (2018);
- *conjuntos bomba-pistão*, utilizados nos protótipos de Tura e Rowe (2011), Trevizoli (2015) e Teyber et al. (2017).

A partir de 2017, há relatos de protótipos do tipo ímã rotativo que utilizam válvulas solenoides como atuador hidráulico em conjunto com a medição da posição do campo magnético sobre os RMAs (HOFFMANN, 2017; HUANG et al., 2019; NAKASHIMA et al., 2021).

De modo geral, a sincronização hidráulico-magnética de sistemas de refrigeração magnética que empregam válvulas solenoides pode ser entendida conceitualmente como um sistema de controle, no qual os parâmetros de entrada são a fração de escoamento e a frequência de RMA. Como resultado desse controle têm-se sinais para os sistemas hidráulico e magnético que proporcionam o tempo de abertura das válvulas, a vazão mássica através dos RMAs e o acionamento do ímã na frequência desejada. A figura 4 apresenta esse sistema de controle. Os parâmetros de entrada são inseridos pelo operador por meio do sistema de supervisão do protótipo, que se comunica com o componente controlador. O controlador recebe os parâmetros desejados pelo operador e, com a medição da posição do circuito magnético, executa a lógica de sincronização. Após a execução dessa lógica, ele envia o sinal para os atuadores, que mudam o estado da planta, que nesse contexto é o próprio sistema de refrigeração magnética.

Até o momento, para sistemas de ímã rotativo que utilizam válvulas solenoides como atuadores hidráulicos, a lógica de sincronização se baseia ou na medição direta da intensidade de campo magnético sobre os regeneradores, ou então na medição da posição do ímã em relação aos RMAs. O sistema de Huang et al. (2019) utiliza um encoder ótico do próprio servomotor CC (que gera a rotação do ímã) para medir a posição do campo magnético em relação aos regeneradores. Outros sistemas, como os protótipos de Hoffmann (2017) e Nakashima et al. (2021), fazem a medição do campo

Figura 4 – Representação do sistema de sincronização de um refrigerador magnético que utiliza como atuadores válvulas solenoide.



Fonte – Elaborado pelo autor.

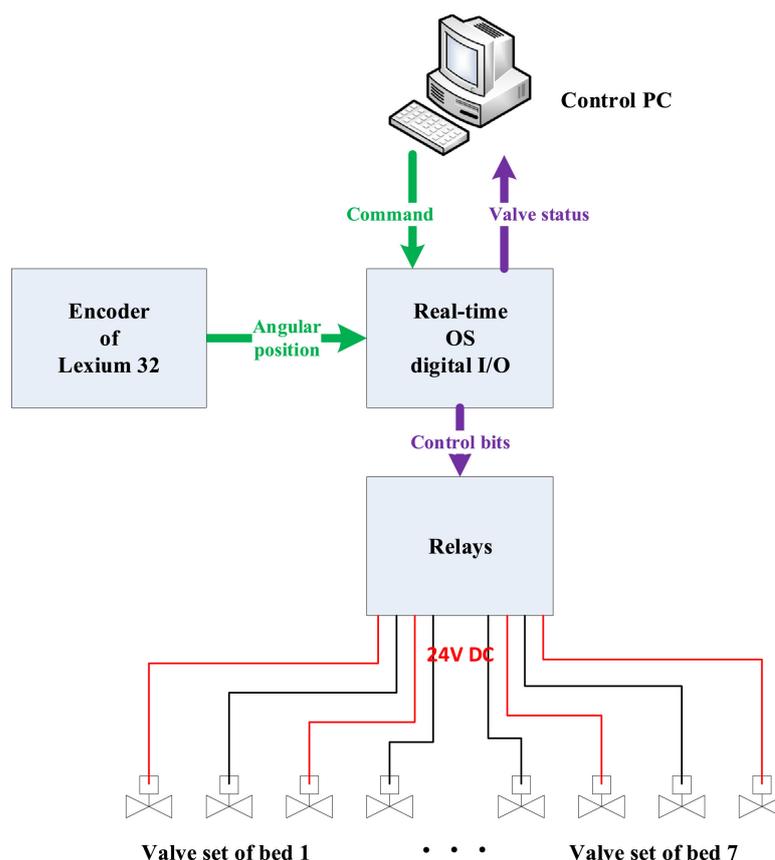
magnético por meio de sensores do tipo Hall posicionados em pontos conhecidos próximos aos regeneradores. Em ambos os casos é necessário fazer uma caracterização prévia do perfil de incidência temporal de campo magnético sobre os regeneradores para calcular os momentos de abertura e fechamento das válvulas solenoides. A vantagem do sistema com encoder é que é possível trabalhar apenas com sinais digitais, facilitando o processamento feito no dispositivo de controle.

Os tempos de ativação e desativação das válvulas solenoides são duas das variáveis de saída do controle proporcionadas pela lógica de sincronização. A lógica de Hoffmann (2017) calcula esses tempos baseada na medição de um ciclo magnético sobre o RMA. A cada ciclo, esses tempos são atualizados com os valores configurados nos parâmetros de referência e de acordo com a medição do campo. Isso é feito a cada ciclo de RMA para garantir a centralização dos escoamentos com os momentos de máxima e mínima intensidade de campo. Na lógica de Huang et al. (2019), os acionamentos dependem dos parâmetros de referência e da posição do eixo do ímã. Isso possibilita que os momentos de acionamento sejam recalculados apenas quando acontecem mudança de referência.

Componentes programáveis costumam ser utilizados para compor os dispositivos de controle e de aquisição do sistema de sincronização. A maioria dos protótipos que apresentam a informação de tais dispositivos utilizam dispositivos National Instruments, como os protótipos de Tura e Rowe (2011), Eriksen et al. (2015) e Hoffmann (2020). Outros protótipos utilizam controladores lógicos programáveis (CLPs), como por exemplo os desenvolvidos por Zheng et al. (2009) e Gómez et al. (2013). No caso do protótipo de Huang et al. (2019), foi dado enfoque na utilização de um computador com sistema operacional de tempo real (Phar Lap ETS) para realizar o controle das 28

válvulas solenoides presentes no protótipo, conforme apresenta o diagrama na figura 5. Com uma configuração flexível e incrementável, o protótipo possui um grande potencial para testes de desempenho e possibilita estudos direcionados à comercialização de refrigeradores magnéticos (HUANG et al., 2019).

Figura 5 – Arquitetura do sistema de sincronização do protótipo FAME de Huang et al. (2019)



Fonte – (HUANG et al., 2019)

A definição de cada componente do sistema de sincronização depende dos objetivos do protótipo desenvolvido e por isso faz-se necessário um levantamento de requisitos do protótipo. Para desenvolver o sistema de sincronização, leva-se em consideração o atraso de acionamento causado tanto pelas eletroválvulas quanto pelo dispositivo eletrônico que aciona essas eletroválvulas (HOFFMANN, 2017). Isso ocorre porque atrasos no acionamento influenciam na sincronização e, desse modo, influenciam na capacidade de refrigeração, conforme demonstra Nakashima et al. (2021).

### 2.3 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

A sincronização hidráulica-magnética é fundamental para o funcionamento de um refrigerador magnético. A diferença de temperatura causada pela variação de

campo magnético no material magnetocalórico não é capaz de gerar resfriamentos consideráveis para um refrigerador se não inserida no ciclo de RMA. Para promover o ciclo de RMA, os sistemas hidráulico e magnético do refrigerador devem operar em harmonia. Os parâmetros desse ciclo costumam ser variáveis manipuladas de refrigeradores magnéticos e são controlados pelo sistema de sincronização hidráulica-magnética.

Diante do exposto nesta revisão da literatura, alguns pontos podem ser resumidos a respeito do desenvolvimento do sistema de sincronização hidráulica-magnética de um protótipo de refrigerador magnético do tipo ímã rotativo com gerenciamento hidráulico operado por eletroválvulas:

- para desenvolver esse sistema devem ser definidos: o componente de supervisão, o componente de aquisição, o componente de controle, os componentes para o acionamento dos atuadores hidráulico e magnético, o sistema de medição da posição do campo magnético em relação aos RMAs e a lógica de sincronização;
- os componentes de supervisão, controle e aquisição costumam ser componentes de configuração flexível e escalável;
- a realimentação da posição do campo magnético em relação aos RMAs costuma ser feito ou por meio da medição direta do campo magnético, ou então por meio da posição relativa do ímã e essa decisão influencia na lógica de sincronização;
- cada protótipo de refrigerador magnético possui seu objetivo e requisitos específicos que devem ser conhecidos para definição dos sistemas e dos componentes citados.

### 3 UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA

Este capítulo tem como objetivo detalhar características e considerações importantes da operação da URM para o desenvolvimento dos subsistemas de controle e supervisão. Para alcançar esse objetivo, primeiramente a Seção 3.1 apresenta as principais estruturas que compõem cada um dos três principais subsistemas da URM, sendo eles os subsistemas magnético, hidráulico e térmico. Depois, a Seção 3.2 apresenta os aspectos operacionais desses três subsistemas e inicia-se o levantamento dos requisitos do sistema de controle e supervisão. Por último, a Seção 3.3 detalha os requisitos operacionais da URM para os subsistemas de controle e supervisão, agregando as informações dos componentes utilizados nos subsistemas.

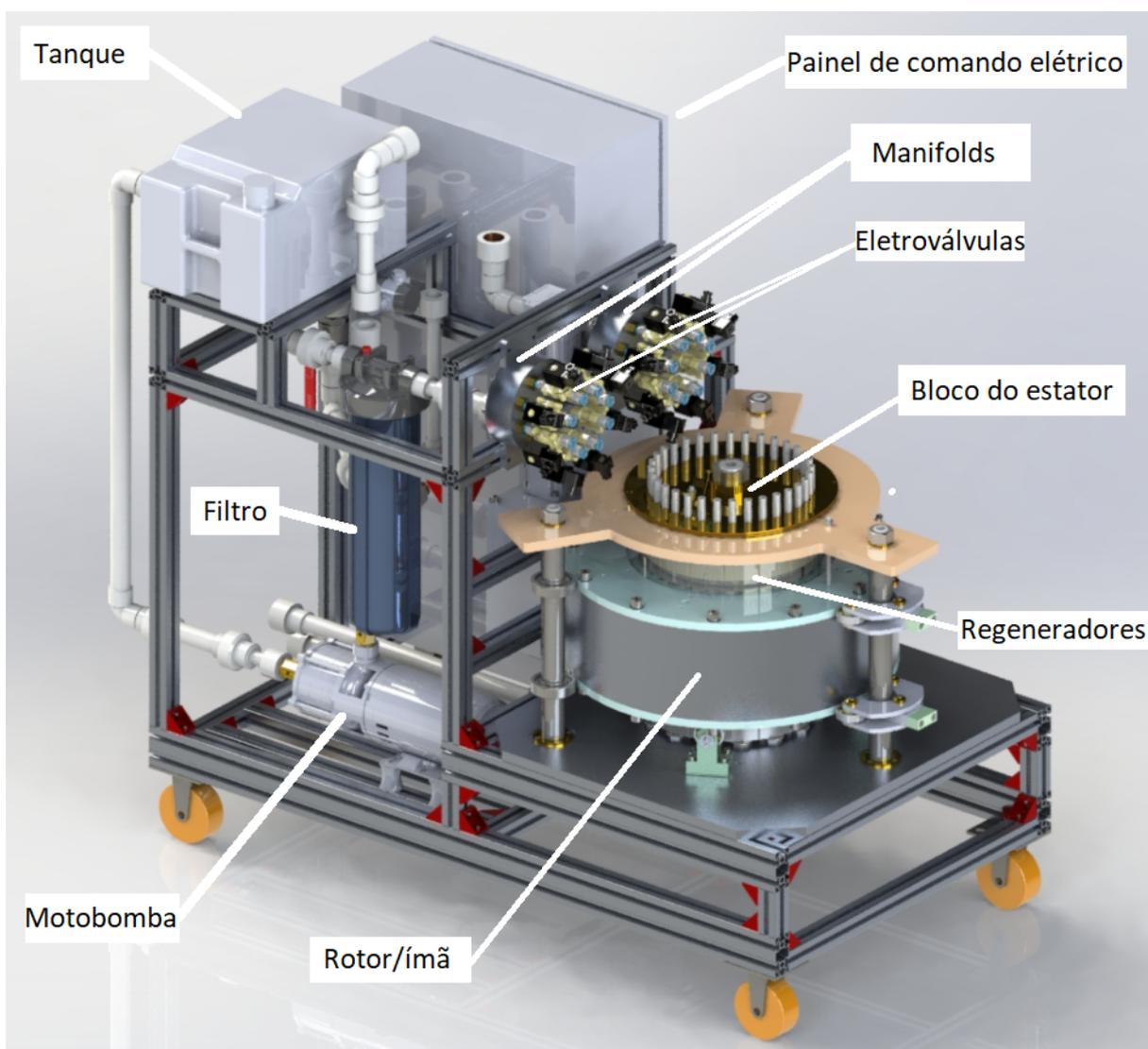
#### 3.1 ESTRUTURAS

Cada subsistema da URM possui estruturas mecânicas específicas que possibilitam a sua operação. Assim, nesta seção são apresentadas as principais estruturas que compõem cada subsistema para a melhor abordagem de seus detalhes operacionais nas seções seguintes do capítulo.

A URM possui a maioria de seus componentes fixados em uma bancada móvel, apresentada na figura 6. Ficam fora dessa bancada apenas dois trocadores de calor do subsistema térmico. São componentes do subsistema hidráulico: motobomba, filtro, tanque, *manifolds* de alta e baixa pressão, eletroválvulas e as válvulas de retenção unidirecionais que estão dentro do conjunto do bloco do estator (a função de cada componente é resumida no quadro 1). O subsistema magnético possui uma parte móvel e outra estática, chamadas de rotor e estator respectivamente. O rotor é composto pelo ímã da bancada e pela sua estrutura de encapsulamento. O estator é composto unicamente por uma estrutura metálica cilíndrica, a qual serve de condutora das linhas de campo magnético geradas pelo ímã no eixo de rotação do seu encapsulamento e de suporte para fixação dos regeneradores. O estator com os regeneradores fixos formam a estrutura do bloco do estator, conforme é referenciado na figura 6. As conexões hidráulicas omitidas da representação da figura 6 são aquelas que ligam a bancada aos trocadores de calor, bem como as conexões entre as eletroválvulas e o bloco do estator.

O bloco do estator é um conjunto formado por três tipos de componentes: o estator do circuito magnético, RMAs e válvulas de retenção unidirecionais. Cada um dos 16 RMAs da URM é preenchido por uma liga porosa de lantânio, ferro e silício chamada Calorivac, material que produz o efeito magnetocalórico da unidade. Eles possuem 2 válvulas de retenção conectadas em suas aberturas, totalizando 4 válvulas de retenção por regenerador e, conseqüentemente, 64 no total. Os RMAs são fixados lado a lado em torno do estator, formando a estrutura estática apresentada na figura 7,

Figura 6 – Bancada móvel da URM. Para melhor visualização dos componentes, algumas ligações do circuito hidráulico foram omitidas da representação.



Fonte – Acervo do grupo PoloMag.

que é posicionada de forma concêntrica com o rotor na bancada.

O rotor forma com o estator o conjunto denominado como circuito magnético. Essas duas estruturas possuem geometria cilíndrica e são posicionadas de forma concêntrica, conforme apresentado na figura 8. O rotor é composto por segmentos de ímã permanente e por chapas de aço elétrico, e é móvel. O estator é composto por chapas de aço elétrico e é estático. Eles garantem que a incidência do campo magnético sobre os regeneradores, que ficam posicionados no vão entre o rotor e o estator, assumam períodos de alta e baixa intensidade durante a rotação do ímã.

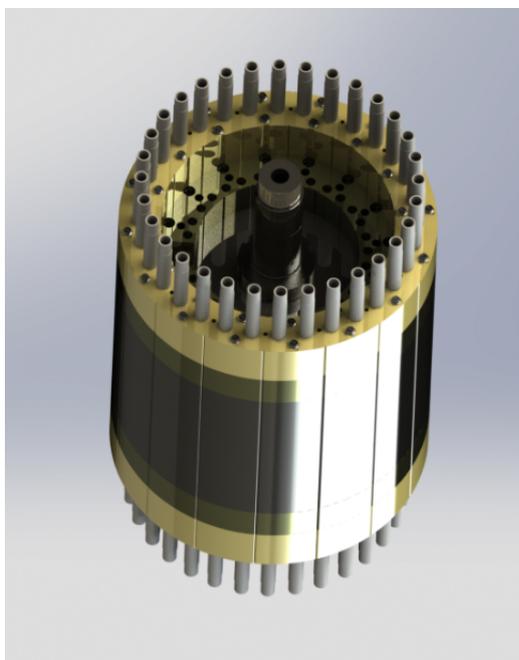
Os dois trocadores de calor, que não aparecem na figura 6, formam com os RMAs o conjunto de estruturas do subsistema térmico. Cada trocador possui acoplado

Quadro 1 – Função de cada componente do subsistema hidráulico.

<b>Componentes</b>	<b>Função</b>
Motobomba	Gerar o escoamento de fluido de trabalho pelo circuito hidráulico
Filtro	Retirar impurezas do fluido de trabalho que possam entupir os regeneradores
Tanque	Garantir suprimento de fluido de trabalho para o circuito hidráulico
<i>Manifold</i> de alta pressão	Reunir as eletroválvulas responsáveis pelos escoamentos em direção aos regeneradores
<i>Manifold</i> de baixa pressão	Reunir as eletroválvulas responsáveis pelos escoamentos que saem dos regeneradores
Eletroválvulas	Permitir ou bloquear o escoamento pelos regeneradores
Válvulas de retenção unidirecionais	Impedir que o escoamento em uma única direção passe através dos dois <i>manifolds</i> ou então entre pelos dois lados do trocador frio

Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Bloco estator da URM.



Fonte – Acervo do grupo PoloMag.

um exaustor, que tem como finalidade promover a troca de calor com o ambiente por convecção forçada. Um dos trocadores é posicionado no local que se deseja resfriar e o outro em local à temperatura ambiente. O escoamento pela serpentina do trocador

Figura 8 – Registro da montagem do circuito magnético. O rotor possui todos os seus pontos de contato com a bancada sobre rolamentos que permitem o seu movimento de rotação. Nessa etapa da montagem, os RMAs ainda não estavam posicionados no estator.



Fonte – Acervo pessoal do autor.

posicionado no local refrigerado permanece com temperatura inferior a temperatura que esse ambiente está; por isso esse trocador é chamado de trocador frio. O trocador posicionado no local que permanece à temperatura ambiente possui escoamento com temperatura mais alta que a temperatura ambiente e por isso esse trocador é chamado de trocador quente. É importante ressaltar que essas relações entre temperaturas do ambiente e de escoamento nas serpentinas dos trocadores são consideradas em regime permanente.

Essa seção apresentou as principais estruturas que possibilitam a refrigeração magnética na URM, associando cada estrutura ao seu determinado subsistema. Foram explicados os objetivos de cada estrutura e sua localização no sistema global. Detalhes operacionais sobre o funcionamento da URM para gerar o resfriamento do fluido de trabalho são abordados na seção 3.2.

### 3.2 OPERAÇÃO

Esta seção apresenta as finalidades dos subsistemas magnético e hidráulico e como eles estão projetados para atender a esses devidos fins. Essa apresentação tem como objetivo o entendimento da operação dos sistemas para o levantamento dos requisitos de controle e supervisão, que sincronizam a operação dos dois subsistemas mecânicos para promover a refrigeração magnética. Para promover esse entendimento,

também são abordados os detalhes essenciais de alguns componentes desses dois subsistemas mecânicos.

O ciclo de refrigeração magnética na URM acontece em 4 etapas, segundo o ciclo de Brayton apresentado na seção 2.1. Dentre essas etapas 2 delas correspondem a períodos de magnetização e desmagnetização e outras 2 a ciclos de escoamentos pelos regeneradores. Os detalhes sobre como os subsistemas magnético e térmico promovem essas etapas na URM são apresentados a seguir.

### 3.2.1 Subsistema magnético

O subsistema magnético garante períodos de incidência alta e baixa do campo magnético sobre os RMAs por meio do ímã que rotaciona em torno do bloco estator. A incidência do campo magnético medido em um RMA da URM ao longo de 3 ciclos de rotação do ímã é apresentada na figura 9. Essa imagem é parte de um mapeamento da incidência do campo ao longo da rotação do ímã com a sonda do transdutor posicionada no local que corresponde ao centro de um dos regeneradores. A orientação do campo (negativa ou positiva) não influencia no efeito magnetocalórico. Assim, cada rotação completa do ímã em torno do bloco estator gera 2 ciclos de magnetização e desmagnetização sobre cada RMA. Sendo assim, pode-se definir que:

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

em que  $f_B$  é a frequência da rotação do ímã em torno do bloco estator (em hertz) e  $f_{RMA}$  é a frequência do ciclo do campo magnético incidente nos RMAs (em hertz), também chamada de frequência de RMA.

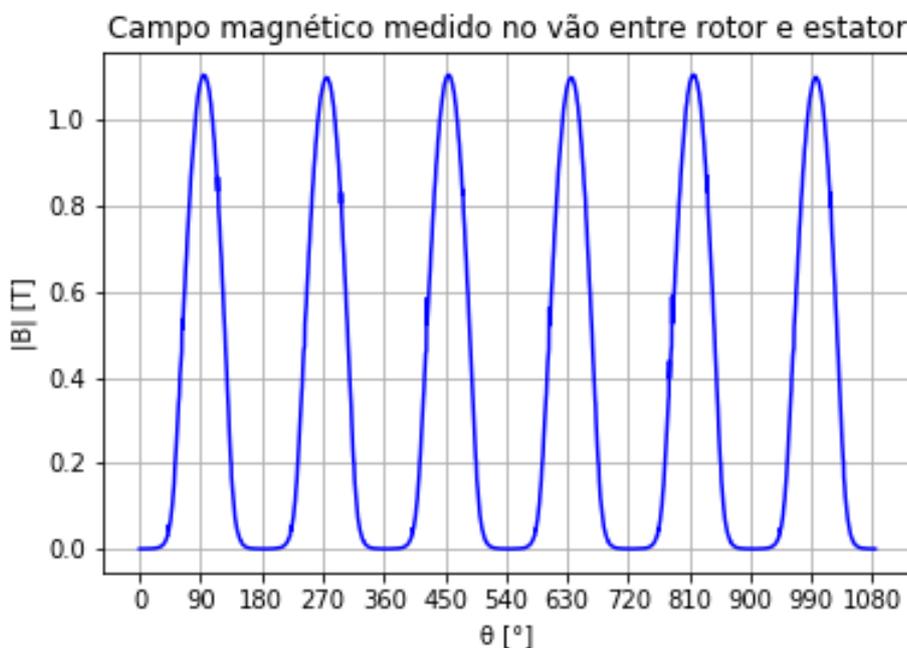
É previsto que a URM opere com ciclos de campo magnético sobre os regeneradores a uma frequência de 2,5 Hz, o que implica uma frequência de rotação do ímã de 1,25 Hz. Um conjunto de polias foi projetado para transmissão da rotação do eixo de um motor para o ímã. A polia presa ao ímã possui 195 dentes e a polia presa ao eixo do motor possui 24 dentes. Dessa forma, pode-se definir que:

$$f_m = K_p f_B, \quad (3)$$

sendo que  $f_m$  é a frequência (em hertz) de rotação do eixo de transmissão do motor e  $K_p$  é a relação (adimensional) entre o número de dentes das polias presas ao ímã e ao rotor respectivamente. Dessa forma, com uma relação  $K_p = 195/24 = 8,125$  e  $f_b = 1,25$  Hz o eixo do motor deve ser capaz de rotacionar em pelo menos 10,156 Hz para que o campo magnético incidente nos regeneradores alcance a frequência de 2,5 Hz.

O componente adquirido para rotacionar o ímã foi um servomotor que rotaciona a até 2000 rpm (33,33 Hz), no entanto, com a intenção de aumentar o torque resultante,

Figura 9 – Valores absolutos da incidência do campo magnético sobre um RMA.



Fonte – Elaborado pelo autor.

o motor foi adquirido com um mecanismo redutor acoplado ao seu eixo de transmissão com relação de 5 para 1. O mecanismo faz com que a cada cinco rotações do motor, o eixo de transmissão rotacione apenas uma vez, o que resulta no aumento do torque mas limita a rotação máxima a 400 rpm (6,67 Hz). Na equação (3), ao substituir  $f_m$  pela frequência mencionada,  $K_p$  pela relação entre as polias (195/24) e realizar as devidas operações matemáticas para encontrar o valor de  $f_b$ , tem-se que a frequência de máxima de rotação do ímã será de 0,821 Hz, resultando em uma frequência máxima de RMA de 1,64 Hz (equação (2)). Pode-se definir aqui um fator de redução total entre o giro do motor e o giro do ímã da seguinte forma:

$$K_r = \frac{1}{5K_p}, \quad (4)$$

em que  $K_r$  é um termo adimensional que engloba o fator de redução causado pelo acoplamento do motor e a redução causada pelas polias. Apesar da limitação imposta pelo servomotor, todo o projeto dos subsistemas de supervisão e controle foi desenvolvido com base no requisito inicial de projeto de operar até 2,5 Hz.

Os subsistemas de controle e supervisão devem ser capazes de identificar o ciclo de RMA com 2,5 Hz. Uma estratégia teve que ser desenvolvida para identificação desses ciclos. Uma das opções é a medição da incidência do campo magnético sobre os regeneradores ao longo do tempo. Uma segunda opção é medir a posição angular do ímã em relação a uma referência fixa. A definição da estratégia utilizada e dos

componentes utilizados para executá-la são abordadas em detalhes na seção 4.1 do capítulo 4.

A identificação da incidência do campo magnético sobre cada um dos regeneradores é necessária para que o subsistema de controle possa conhecer os momentos para operar as eletroválvulas. Sendo assim, os requisitos abordados até então são resumidos no quadro 2 e novos requisitos provenientes do subsistema hidráulico são apresentados na subseção 3.2.2, a qual aborda os detalhes operacionais desse subsistema.

Quadro 2 – Primeiro levantamento parcial de requisitos operacionais dos subsistemas de controle e supervisão.

Subsistemas	Requisitos
Controle	Possibilidade de configuração da frequência do ciclo de refrigeração.
Controle	Definição de estratégia para identificação do posicionamento angular do rotor em relação aos regeneradores
Supervisão	Identificação da incidência do campo sobre regeneradores durante o ciclo de refrigeração

Fonte – Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Subsistema hidráulico

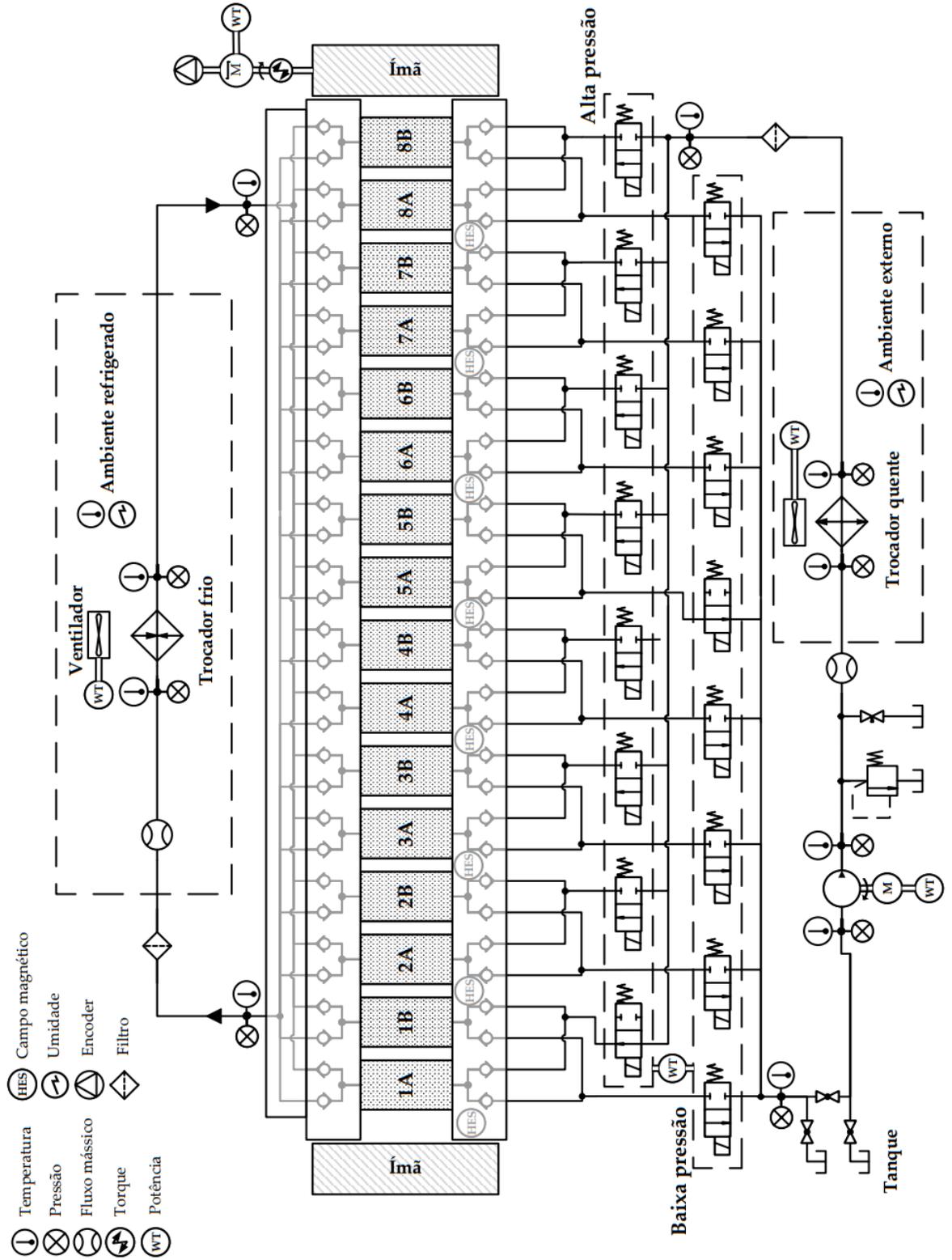
Para que o ciclo de Brayton aconteça, os escoamentos através dos RMAs devem estar sincronizados com a incidência do campo magnético. Durante o período de alta magnetização do RMA, deve acontecer escoamento do ambiente de menor temperatura para o ambiente de maior temperatura, caracterizando o escoamento frio. Durante o período de baixa magnetização, deve ocorrer o escoamento contrário, caracterizado o escoamento quente.

Os escoamentos quente e frio pelos RMAs durante os períodos de incidência baixa e alta do campo são promovidos pelo subsistema hidráulico. Além de possibilitar essa alternância de escoamentos, o subsistema hidráulico tem como objetivo garantir a passagem ordenada do fluido de trabalho pelos componentes do subsistema térmico. Para promover esses escoamentos conforme desejado, esse subsistema é composto por 1 tanque, 1 motobomba, 2 filtros, 64 válvulas de retenção unidirecionais e 16 eletroválvulas, posicionados de acordo com o diagrama apresentado na figura 10. O diagrama evidencia quais são as eletroválvulas de alta e baixa pressão, que são as eletroválvulas separadas por meio dos dois *manifolds* comentados na seção 3.1 deste capítulo. Ele também destaca o ambiente refrigerado e o externo, com seus respectivos trocadores frio e quente. Além das áreas e dos componentes citados, o

diagrama apresenta a disposição de atuadores e transdutores dos principais subsistemas e a disposição dos RMAs, representados pelos retângulos no centro do diagrama identificados por numeração de 1 a 8 e letras “A” e “B”.

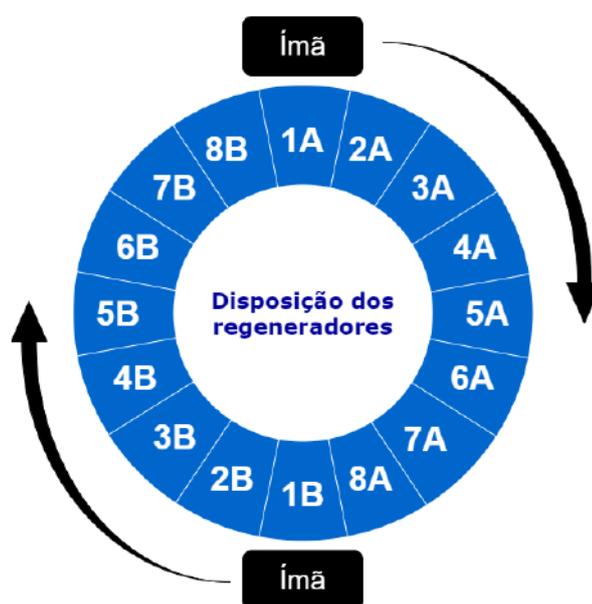
O caminho que o fluido de trabalho realiza no circuito hidráulico ao longo dos ciclos de refrigeração magnética, é o seguinte: o mesmo sai do tanque e é bombeado pela motobomba para o trocador quente, onde rejeita calor para o ambiente externo. Após passar pelo trocador, o fluido é direcionado aos regeneradores determinados por meio do conjunto de eletroválvulas de alta pressão e válvulas unidirecionais. Essa parte do escoamento caracteriza o escoamento quente. Ao sair dos regeneradores, com temperatura mais baixa do que entrou, o fluido é direcionado por outras válvulas unidirecionais até o trocador de calor frio do ambiente refrigerado. Ao sair do trocador frio, o fluido é novamente encaminhado por um conjunto de válvulas direcionais até os regeneradores, realizando através deles o escoamento frio. A saída do fluido dos regeneradores, dessa vez mais quente do que entrou, é guiada pelo outro conjunto de válvulas direcionais. Ele passa, então, pelas eletroválvulas de baixa pressão e chega até o tanque, onde pode realizar o ciclo de escoamentos novamente.

Figura 10 – Diagrama hidráulico da URM.



Cada eletroválvula com escoamento de alta pressão é responsável pelo escoamento quente por 2 RMAs, assim como cada eletroválvula de baixa pressão é responsável pelo escoamento frio em 2 RMAs. Os 2 RMAs com escoamentos controlados por uma única eletroválvula de alta e uma única eletroválvula de baixa estão dispostos 180° entre si no em torno do estator. Por estarem em lados opostos do bloco do estator, conforme é apresentado na figura 11, esses RMAs recebem incidência similar de campo magnético durante o ciclo de rotação do ímã e, por isso, podem ter apenas 2 eletroválvulas gerenciando seus escoamentos quente e frio.

Figura 11 – Diagrama da disposição dos regeneradores no estator.



Fonte – (SANTOS, 2020)

As eletroválvulas da URM são do tipo "abre ou fecha" e trabalham aos pares para garantir os estados de escoamento quente, frio ou sem escoamento pelos RMAs. O estado em que as duas eletroválvulas estão abertas caracteriza um escoamento inválido pelo regenerador, conforme resume o quadro 3, pois não é possível o escoamento nas duas direções em um único regenerador ao mesmo tempo. A lógica do subsistema de controle deve sempre evitar esse comportamento.

O ciclo de escoamentos conforme apresentado aqui deve acontecer para cada par dos dezesseis regeneradores presentes na estrutura do estator, de acordo com a amplitude do campo magnético incidente sobre eles. Os subsistemas de supervisão e controle devem ter uma estratégia para sincronizar a abertura e o fechamento das eletroválvulas de acordo com o campo magnético medido nos regeneradores. Além de promover essa sincronização, esses subsistemas devem promover fração de escoamento mínima de 37,5% no ciclo hidráulico, conforme requisito de projeto. O que para

Quadro 3 – Escoamentos pelo RMA em relação ao acionamento das eletroválvulas.

<b>Tipo de Escoamento</b>	<b>Eletroválvula de baixa</b>	<b>Eletroválvula de alta</b>
Frio	Fechada	Aberta
Quente	Aberta	Fechada
Sem escoamento	Fechada	Fechada
Erro	Aberta	Aberta

Fonte – Elaborado pelo autor.

uma  $f_{RMA} = 2,5$  Hz significa uma duração de escoamento de 150 ms.

O requisito de tempo mínimo entre acionamentos de uma mesma eletroválvula é de 150 ms, no entanto o tempo entre acionamentos de 2 eletroválvulas diferentes pode chegar muito próximo a zero (sem ser efetivamente no mesmo instante). Se 37,5% do ciclo magnético em um regenerador for escoamento quente e 37,5% for escoamento frio, nos outros 25% do ciclo os regeneradores estarão sem escoamento. Sendo assim, o subsistema de supervisão e controle deve ser capaz de operar a abertura e o fechamento de uma mesma eletroválvula com intervalos mínimos de 150 ms e esse sistema também deve possuir um período de amostragem pequeno o suficiente para garantir o ajuste fino desses acionamentos e dos acionamentos de eletroválvulas distintas. Quanto menor o período de amostragem do dispositivo de controle, acionamentos com frações de escoamento mais próximas de 50% são alcançadas.

A eletroválvula selecionada para operar os escoamentos da URM não possui os tempos de abertura e fechamento constantes quando há alterações paramétricas de frequência de acionamento, pressão a montante e a jusante ou vazão. Um estudo sobre a operação dessa válvula específica mostrou que o menor tempo de abertura desse componente do subsistema hidráulico encontra-se com os parâmetros de vazão a 1750 kg/h, na frequência de operação de 5 Hz a uma diferença de pressão a montante e a jusante de 4 bar, em que seus tempos de abertura e fechamento são 24 ms e 27 ms, respectivamente (SANTOS, 2020). No entanto, com os mesmos valores de vazão e pressão a uma frequência de operação de 3 Hz, esses tempos mudam para 40 ms e 63 ms, respectivamente. Esses resultados mostram que a lógica de controle dos acionamentos deve considerar como uma variável o tempo de abertura e fechamento das eletroválvulas ao longo das variações paramétricas para centralizar os escoamentos com a incidência do campo nos regeneradores.

Esta seção apresentou os objetivos do subsistema hidráulico e os detalhes de sua operação, destacando as especificações de projeto que geram requisitos para os subsistemas de controle e sincronização. O quadro 4 resume os requisitos abordados nesta seção.

Quadro 4 – Segundo levantamento parcial de requisitos operacionais dos subsistemas de controle e supervisão.

<b>Subsistemas</b>	<b>Requisitos</b>
Controle	Estratégia de sincronização deve sincronizar abertura e fechamento das eletroválvulas de acordo com o posicionamento do ímã em relação aos regeneradores
Controle	Estratégia de sincronização deve considerar a alteração da fração de escoamento
Controle	Circuito de acionamento das eletroválvulas devem operar abertura e fechamento da mesma eletroválvula em 150 ms
Controle	Estratégia de sincronização deve prever uma futura expansão que centralize os escoamentos com o campo incidente no regenerador periodicamente
Supervisão	Adquirir dados temporais dos acionamentos rápido o bastante para registrar a mudança de estado dos comandos da eletroválvulas
Supervisão	Adquirir dados de potência do motor que aciona a bomba, das eletroválvulas e dos exaustores

Fonte – Elaborado pelo autor.

### 3.3 REQUISITOS DOS SUBSISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO

Os requisitos dos subsistemas de controle e supervisão da URM abordados até então estão resumidos nos quadros 2 e 4, apresentados nas subseções 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente. Eles são requisitos derivados de detalhes de projeto da URM e são críticos para sua devida operação. Neste tópico são abordadas as medições que deverão ser feitas na URM e os requisitos desejáveis de software, finalizando com um resumo geral dos requisitos.

As grandezas de interesse da operação da URM são: pressão, torque, potência ativa, campo magnético, vazão, posição do ímã e temperatura. Está pré definido que a bancada contará com uma quantidade de transdutores conforme está apresentado na tabela 2. Além disso, sabe-se que a bancada em sua versão final contará com um inversor de frequência para controlar a motobomba, com um dispositivo que controla a velocidade do motor que rotaciona o ímã, com pelo menos mais 8 sinais para acionamento das eletroválvulas e com 2 sinais para controlar a potência dos exaustores, resultando em, no mínimo 12 sinais de saída. Todos esses sinais adquiridos ou gerados devem ser contemplados pelos componentes responsáveis pela aquisição ou controle da URM.

Tabela 2 – Tabela parcial de transdutores.

<b>Transdutor</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Sinal de saída</b>
Transdutor de pressão	11	(0 a 10) mV
Torquímetro	1	(-5 a +5) V
Transdutor de potência ativa	2	(0 a 10) V
Transdutor de potência ativa	3	(0 a 5) V
Transdutor de campo magnético	8	(0 a 5) V
Transdutor de vazão	2	(4 a 20) mA
Chave final de curso	1	(0 a 5) V
Termopares	16	(-6 a +21) mV

Fonte – Elaborado pelo autor.

Como a URM é uma máquina experimental, é desejado conhecer as grandezas medidas em diferentes pontos de operação a fim de avaliar o seu comportamento. Variações paramétricas de grandezas como vazão, velocidade de rotação do ímã e fração de escoamento são desejáveis para avaliar o comportamento das grandezas medidas durante sua operação. Essas variações são feitas pelo operador da bancada da URM diretamente pelo software de controle. As grandezas medidas devem ser apresentadas ao operador via uma interface. Além disso, após a operacionalização da URM e realização de ensaios preliminares de validação de conceitos com a bancada experimental, deseja-se expandir o software de controle. Essa expansão prevista é proveniente do conhecimento de alguns fenômenos que podem acontecer em um sistema de refrigeração magnética e têm como fim otimizar a sua operação. Sendo assim, o software de supervisão e controle deve ser de fácil incremento e manutenção.

Os requisitos dos subsistemas de controle e supervisão podem ser resumidos conforme é apresentado no quadro 5. Dentre esses requisitos, aqueles identificados como requisitos de “estratégia de sincronização” fazem referência à sincronização entre o campo magnético incidente nos RMAs e a abertura das eletroválvulas nos momentos corretos para a realização do ciclo de Brayton. Essa estratégia de sincronização deve resultar em sinais enviados para o circuito responsável pela abertura das eletroválvulas que também possui requisitos de projeto. Os requisitos referenciados como de “Aquisição” tratam-se da parte do subsistema de supervisão responsável por adquirir os dados das medições dos transdutores da URM. Aqueles referenciados como “Controle” tratam-se dos requisitos do componente responsável pelo processamento de sinais para a execução da lógica de sincronização entre os escoamentos e o campo magnético, além do acionamento na velocidade desejada do motor do rotor e da ativação dos exaustores.

Quadro 5 – Levantamento final de requisitos dos subsistemas de controle e supervisão.

<b>Componente</b>	<b>Requisitos</b>
Estratégia de sincronização	Sincronizar abertura e fechamento das eletroválvulas de acordo com o posicionamento do ímã em relação aos regeneradores
Estratégia de sincronização	Considerar a alteração da fração de escoamento
Estratégia de sincronização	Possibilitar expansão para centralização dos escoamentos com o campo magnético incidente sobre os regeneradores periodicamente
Estratégia de sincronização	Facilidade de incremento e manutenção
Controle	Envio dos 12 sinais de saída
Controle	Permitir abertura e fechamento da mesma eletroválvula em intervalo mínimo de 150 ms com ajuste fino desse tempo e permitir fração de escoamento mais próxima de 50% possível
Circuito de acionamento das eletroválvulas	Operar abertura e fechamento da mesma eletroválvula em intervalo mínimo de 150 ms
Aquisição	Adquirir os dados referentes aos acionamentos
Aquisição	Identificação da incidência do campo sobre os regeneradores
Aquisição	Leitura de sinais apresentados na tabela 2
IHM	Permitir alterações paramétricas de fração de escoamento, vazão e frequência de ciclos de RMA
IHM	Permitir visualização do operador da URM das grandezas medidas (pressão, torque, potência ativa, campo magnético, vazão e temperatura)

Fonte – Elaborado pelo autor.

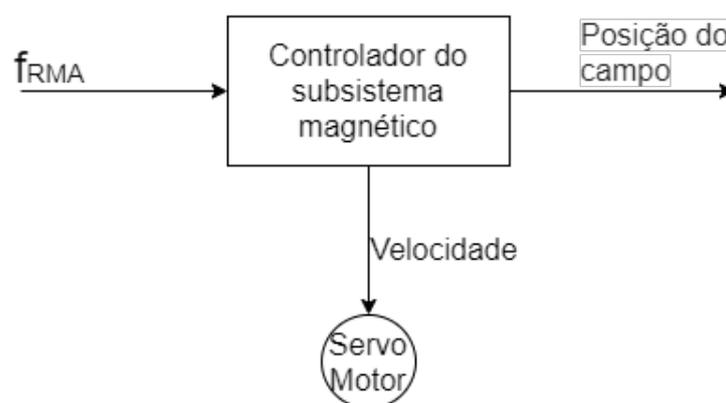
## 4 DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS E COMPONENTES

O objetivo deste capítulo é apresentar as estratégias e os componentes definidos para o sistema de sincronização hidráulica-magnética da URM. Na seção 4.1 são apresentados a estratégia e os componentes de medição do ciclo magnético. Na seção 4.2 é apresentado o processo de definição do componente eletrônico para acionar as eletroválvulas. Na seção 4.3 é apresentada a lógica de sincronização definida para o sistema. Por fim, na seção 4.4 é apresentado o processo de seleção dos dispositivos de aquisição e de controle e é apresentado um esquema da arquitetura de hardware definida para o sistema.

### 4.1 SISTEMA MAGNÉTICO

Esta seção tem como objetivo apresentar a parte do sistema de sincronização desenvolvido que opera o sistema magnético. Essa parte do sistema de sincronização é responsável por identificar a posição do ciclo magnético em relação a cada um dos regeneradores da URM e por gerar uma frequência de ciclo magnético conforme inserida na IHM. A figura 12 apresenta uma representação dessa parte do sistema. Na subseção 4.1.1 é apresentada a estratégia de medição do ciclo magnético. Na subseção 4.1.2 são apresentados os componentes utilizados para executar essa estratégia e aqueles utilizados para gerar a frequência do ciclo magnético.

Figura 12 – Diagrama da parte do sistema de controle responsável pelo subsistema magnético.



Fonte – Elaborado pelo autor.

#### 4.1.1 Estratégia de medição do ciclo magnético

A medição do ciclo magnético sobre cada um dos 16 RMAs é feita de forma indireta, relacionando a posição do ímã e o campo gerado por ele. A estratégia se baseia

na identificação da posição do ímã em relação ao bloco estator e no conhecimento do perfil de incidência do campo magnético sobre os regeneradores ao longo da rotação do ímã (resultado do mapeamento da incidência apresentado na figura 9). Para identificar a posição do ímã em relação ao bloco estator é utilizado um simulador de encoder e um transdutor de efeito indutivo fixo na bancada para identificação da posição “zero” de referência do ímã em relação ao bloco estator. Uma peça metálica é posicionada na estrutura móvel de modo que ao passar pelo transdutor indutivo sua presença é identificada e um pulso é enviado ao componente responsável pelo processamento dos sinais de controle.

O simulador de encoder (modelo EAN1 da empresa WEG) é um acessório físico que se conecta ao driver do servomotor e que possibilita a identificação da posição relativa do eixo do motor. Esse acessório funciona como um encoder incremental, ou seja, ele possui 2 canais de saídas digitais que geram pulsos de onda quadrada acordo com a posição do eixo. Cada canal tem capacidade de gerar até 4096 pulsos por rotação completa do eixo do motor sendo que os ciclos de onda quadrada provenientes desses canais estão virtualmente defasados  $\pi/2$  radianos entre si. Em uma velocidade constante do motor, o tempo entre as bordas de subida e descida dos canais é constante, conforme exemplificado na figura 13. Assim, para melhorar a resolução da medição, pode-se considerar as bordas de subida ou descida dos sinais como os eventos que informam a posição do eixo do servo motor. Dessa forma, pode-se definir:

$$\theta_m = \frac{360}{4N_m}, \quad (5)$$

em que  $\theta_m$  é o ângulo (em graus) de rotação do eixo do motor que corresponde a um intervalo entre bordas de subida ou descida dos canais e  $N_m$  é o número de pulsos por giro completo do motor que é configurado no encoder. Com isso, ao contar o número de bordas identificadas desde uma posição inicial conhecida, é possível realizar o cálculo da posição absoluta do eixo do motor ( $\Theta_m$ ) da seguinte forma:

$$\Theta_m = \theta_{m0} + \theta_m P_m, \quad (6)$$

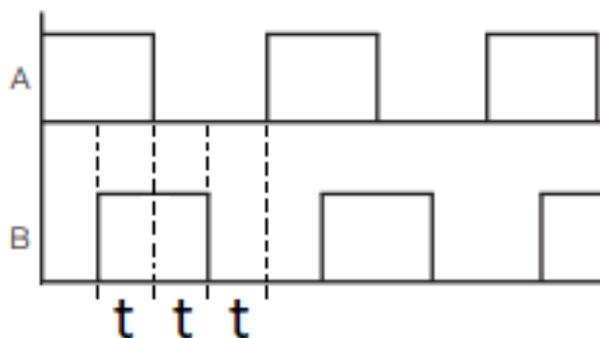
em que  $\theta_{m0}$  é o ângulo inicial conhecido e  $P_m$  é o número de bordas de subida ou descida medidas em uma volta do eixo do motor. Para calcular a posição absoluta do ímã, relaciona-se o ângulo do eixo do servo motor ao ângulo do ímã da seguinte forma:

$$\Theta_i = K_r \Theta_m, \quad (7)$$

em que  $\Theta_i$  é o ângulo correspondente à posição absoluta do ímã.

Na prática, a lógica de sincronização se baseia na contagem das bordas de subida e descida dos sinais do encoder para operar a abertura e o fechamento das eletroválvulas. Quando o dispositivo que processa os sinais de controle recebe o

Figura 13 – Pulsos do simulador de encoder.



Fonte – Elaborado pelo autor.

signal do transdutor indutivo, ele reinicia a contagem das bordas. O número de bordas identificadas em um ciclo de RMA é sempre igual para um determinado número de pulsos configurado no dispositivo EAN1, sendo definido por:

$$N_b = \frac{4N_m}{K_r}, \quad (8)$$

em que  $N_b$  é o número de bordas geradas por volta do ímã. Sendo assim, para operar os escoamentos nos momentos corretos, basta relacionar os momentos de abertura e fechamento das eletroválvulas com o número de bordas identificadas ao longo da rotação do ímã. A lógica de sincronização implementada com essa estratégia é apresentada na seção 4.3. Detalhes sobre os componentes utilizados para implementar essa estratégia são apresentados na seção 4.1.2.

#### 4.1.2 Componentes

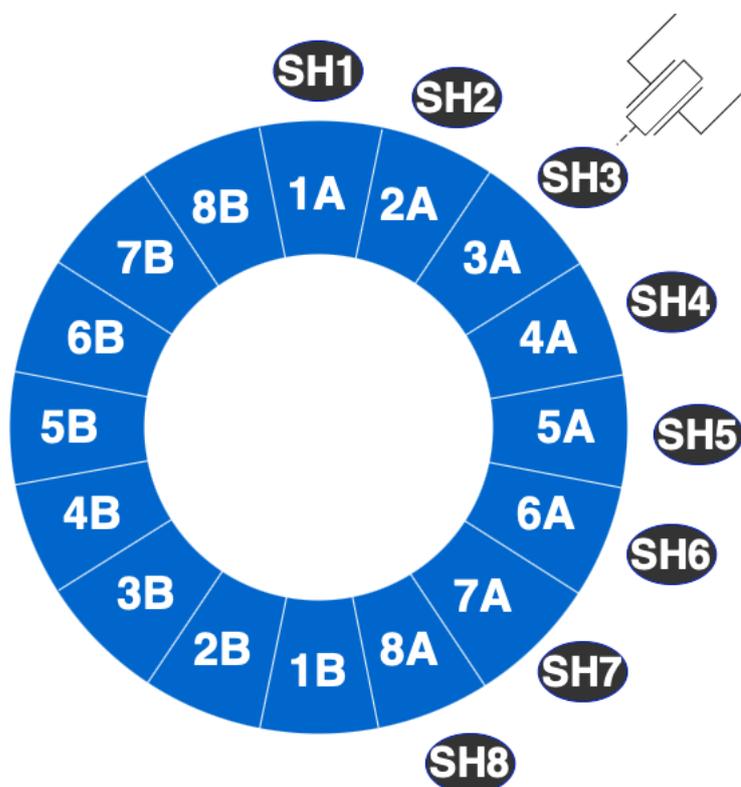
Esta seção apresenta os componentes utilizados para execução da estratégia de identificação do campo magnético incidente nos RMAs durante o ciclo magnético. Os componentes são: transdutores de efeito hall, transdutor indutivo e simulador de encoder.

Para garantir a relação entre a posição do ímã e o campo magnético nos RMAs utiliza-se 8 transdutores de efeito Hall modelo UGN3503 (da empresa Allegro Micro Systems) para medir o perfil do campo magnético. Uma das propriedades observadas para utilização desse componente foi a sua largura de banda, que possui valor maior que 2,5 Hz (frequência máxima de RMA considerada). Os transdutores foram posicionados em torno do estator, próximos aos regeneradores, conforme é apresentado na figura 14. Cada transdutor é responsável pela medição do perfil do campo magnético sobre um regenerador. Como o módulo do campo magnético é sempre igual para

regeneradores com o mesmo número no diagrama, não foi necessário cobrir os 16 regeneradores.

Para identificar a posição de referência do ímã foi utilizado um transdutor indutivo da empresa Balluff (modelo BES028C) e uma peça metálica em formato de "L". A peça metálica foi fixada no rotor e o transdutor foi fixado na bancada de forma que ele identifique a passagem da peça a cada rotação do ímã. O transdutor foi posicionado direcionado ao regenerador "3A", conforme apresentado no diagrama da figura 14. Esse transdutor funciona como uma chave normalmente aberta que é fechada ao identificar a passagem da peça. Dessa forma, a cada sinal enviado desse transdutor, o sistema de controle identifica uma rotação completa do ímã.

Figura 14 – Disposição dos transdutores de efeito Hall e transdutor indutivo em torno do estator.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Para rotacionar o ímã é utilizado um servomotor modelo SWA de 2000 rpm controlado por um servoconversor modelo SCA06, ambos da empresa WEG. O servoconversor recebe um sinal de tensão que indica a velocidade de rotação do servomotor e, por meio de um controle realimentado, esse dispositivo garante a velocidade do eixo do servomotor. Vale lembrar que a rotação do eixo do servomotor não corresponde à rotação do ímã. Assim, o dispositivo de controle da URM, responsável pelo envio do sinal de tensão para o servoconversor, calcula a velocidade que o eixo do servomotor

deve rotacionar para garantir a frequência de RMA desejada (por meio das equações (2) e (3)).

Para identificar a posição relativa do ímã em relação à peça metálica de referência é utilizado o acessório simulador de encoder conectado ao servocontrolador. A aquisição dos sinais do encoder e do sensor de efeito Hall que identifica a posição de referência são feitos por meio de canais digitais no dispositivo de controle.

Os componentes apresentados possibilitam a execução da estratégia de identificação da posição do campo magnético nos RMAs e o controle da frequência de rotação do ímã. A tabela 3 resume os transdutores e atuadores utilizados com seus respectivos sinais de entrada e saída.

Tabela 3 – Tabela de componentes do subsistema magnético.

Componente	Quantidade	Sinal de entrada	Sinal de saída
Transdutor de efeito hall	8	-	(0,7 a 4,3) V
Transdutor de efeito indutivo	1	-	(0 a 5) V
Simulador de encoder	2	-	(0 a 5) V
Servocontrolador	1	(0 a 5) V	-

Fonte – Elaborado pelo autor.

## 4.2 COMPONENTE DE ACIONAMENTO DAS ELETROVÁLVULAS

Este tópico dedica-se à apresentação dos procedimentos realizados para a definição do componente de acionamento das eletroválvulas. Para definir esse componente, foram pesquisadas opções que possuísem comportamento como o de um interruptor em corrente alternada. Para realizar os acionamentos, buscou-se por componentes capazes de atender as especificações de operação de duas eletroválvulas em paralelo, como operar em 220 V e suportar corrente de até 0,54 mA. Além disso, levou-se também em consideração o tempo de acionamento dos componentes. Por fim, circuitos que contêm esses componentes foram desenvolvidos e testados para avaliação do tempo de acionamento na prática e validação do circuito.

### 4.2.1 TRIAC

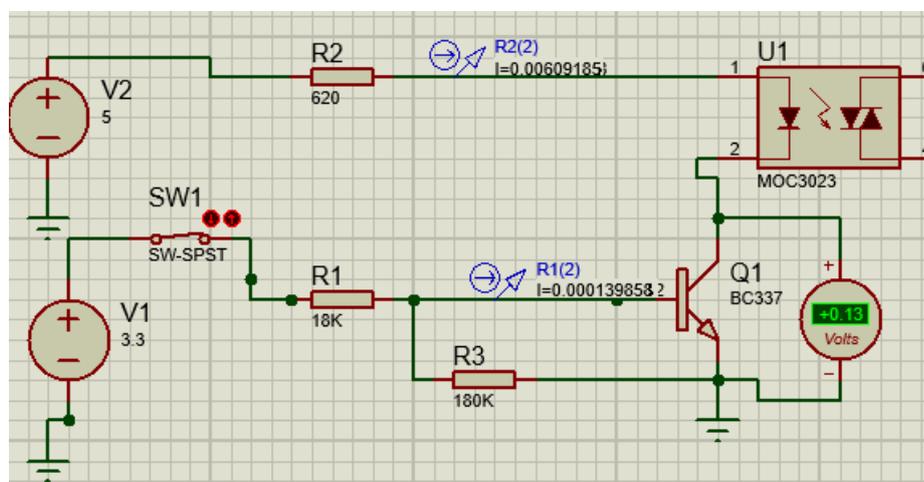
O TRIAC, ou triodo para corrente alternada, é um componente que possui 3 pinos e que conduz corrente entre 2 deles nas duas direções, conforme acionado por um terceiro terminal. Esse acionamento acontece na forma de um gatilho, com condição de que o terceiro terminal esteja com uma corrente igual ou acima da corrente de disparo ( $I_{gt}$ ) e uma tensão igual ou acima da tensão de disparo ( $V_{gt}$ ). Uma vez disparado, os terminais desse componente continuam conduzindo até que a corrente entre eles passe por zero.

Para a atual aplicação, utilizou-se um arranjo composto por um TRIAC (modelo BTA06) e um TRIAC opto isolador (modelo MOC3023) para fazer com que o circuito funcionasse como um interruptor. O TRIAC opto isolador tem sua operação parecida com um TRIAC comum, no entanto, para acionar esse componente é necessário apenas superar a corrente e tensão de acionamento de um LED em vez de superar a tensão e a corrente de disparo no terceiro pino. O grande benefício de utilizar um isolador óptico é a separação física entre a parte do circuito de baixa tensão e corrente contínua e a parte do circuito de mais alta tensão e corrente alternada.

A parte de baixa tensão e corrente contínua do circuito que foi projetada para proteger a saída do controlador é apresentada na figura 15. A fonte de 3,3 V representa o sinal proveniente do controlador e a fonte de 5 V uma alimentação externa. A chave SW1 foi inserida no circuito apenas para simulação do sinal digital que comanda o acionamento, pois na prática o sinal enviado pelo controlador terá amplitude nula ou de 3,3 V, dependendo do estado lógico escolhido para a saída. O resistor R1 serve para limitar a corrente de base do transistor. O transistor (modelo BC337) possui comportamento de uma chave aberta quando SW1 também está aberta e de chave fechada quando SW1 também está fechada. Isso possibilita que a corrente passe pelo LED do opto acoplador quando SW1 é fechada ativando-o e conseqüentemente ativando o seu TRIAC. O resistor R2 é utilizado para limitar a corrente no LED do opto acoplador e no transistor. O resistor R3 é utilizado como um resistor de *pull down*, o que faz com que a tensão na base do transistor tenha diferença de potencial igual à tensão da referência no estado em que a chave SW1 é aberta. Isso evita possíveis acionamentos indesejados do transistor, pois evita que sua base fique com potencial indefinido (circuito completamente aberto) quando SW1 estiver aberta. Assim, quando a chave SW1 está fechada, o opto isolador funciona como uma chave fechada entre os seus terminais 6 e 4 e quando SW1 está aberta, os terminais 6 e 4 funcionam como uma chave aberta.

Na parte do circuito de corrente alternada utiliza-se o circuito sugerido na folha de dados do opto acoplador com a adição do componente R5. A figura 16 apresenta uma representação do circuito montado. Os terminais 6 e 4 são conectados aos terminais 6 e 4 do circuito de baixa tensão. O R4 é utilizado para limitar a corrente tanto no TRIAC do opto acoplador quanto no pino de acionamento do outro TRIAC utilizado. A eletroválvula é representada pelo conjunto de componentes L1 e R7. Os componentes C1, R8, C3 e R6 são utilizados como *snubbers*, que são filtros passa baixas empregados nesse circuito para dissipar as correntes que aparecem quando o chaveamento não é feito pela passagem por zero e para garantir o correto desligamento dos TRIACs ao cortar a alimentação da carga indutiva da eletroválvula. A inclusão de R5 aconteceu após a simulação do circuito em *software*. Sem esse componente a variação de tensão sobre a eletroválvula não acontecia durante a simulação. Um estudo mais criterioso

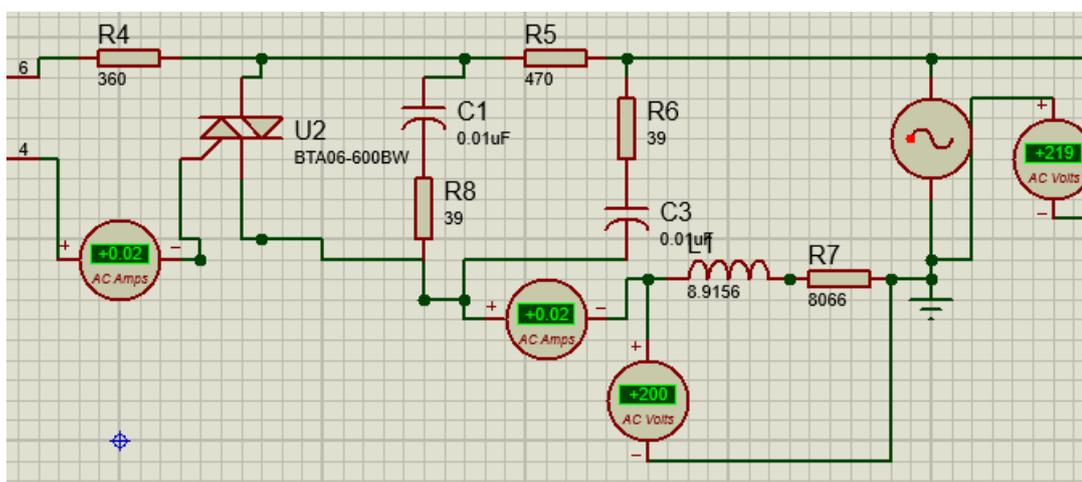
Figura 15 – Parte de corrente contínua do circuito projetado para proteger a porta digital do dispositivo de controle.



Fonte – Elaborado pelo autor.

dos motivos desse resistor possibilitarem a simulação não coube no escopo temporal deste trabalho.

Figura 16 – Parte de corrente alternada do circuito projetado para avaliação do acionamento com TRIAC.

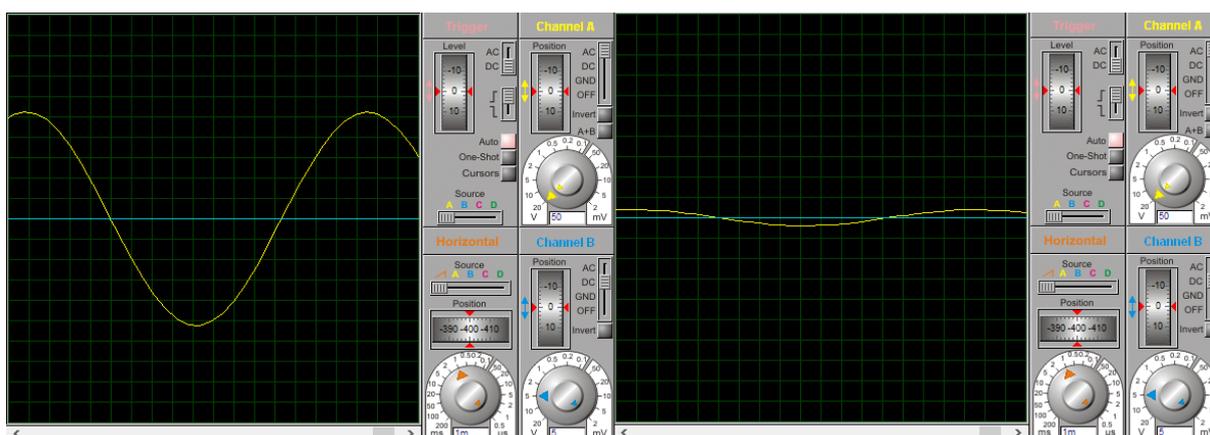


Fonte – Elaborado pelo autor.

Foi utilizado o *software* de simulação de circuitos Proteus 8 (versão 8.9) para simular o circuito. Com a configuração apresentada, ao acionar a chave SW1, a eletroválvula é submetida a uma tensão alternada de aproximadamente 200 V. Ao abrir a chave SW1, uma tensão de aproximadamente 6 V inconvenientemente ainda aparecia em seus terminais, como pode-se ver na simulação apresentada na figura 17. Acredita-

se que essa tensão seja resultante do resistor R5. Porém, ainda assim decidiu-se avaliar o circuito na prática e visualizar o seu tempo de resposta antes de descartar a possibilidade de utilização do componente.

Figura 17 – Simulação do sinal sobre a eletroválvula nos estados de SW1 fechada e aberta, respectivamente.



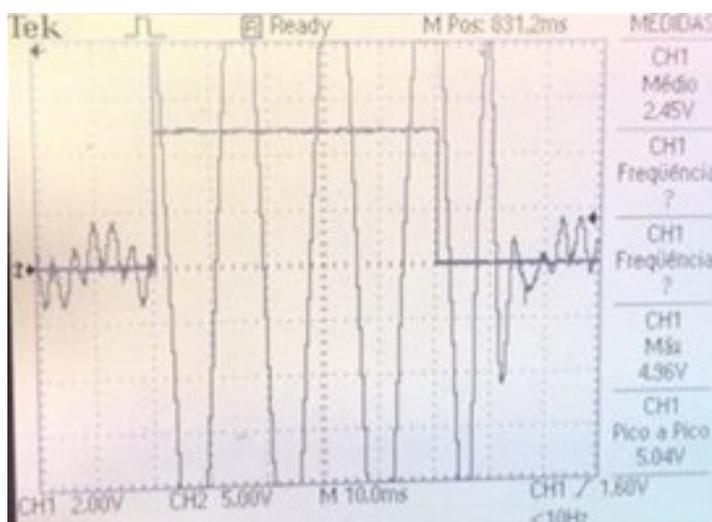
Fonte – Elaborado pelo autor.

O circuito foi montado sobre uma placa multifuros para a avaliação prática de seu comportamento. A placa foi alimentada por uma fonte externa de 5 V e o sinal de ativação da base do transistor foi gerado por meio de um microcontrolador programado para gerar sinais de onda quadrada em diferentes frequências entre 5 Hz e 20 Hz. Essa faixa de frequência foi escolhida devido ao menor tempo desejado entre ativação e desativação de uma eletroválvula de aproximadamente 150 ms. O que se observou na prática foi que ao acionar o TRIAC o acionamento elétrico da eletroválvula acontece sem atrasos, conforme apresentado na figura 18. Na desativação do TRIAC, acontece um atraso máximo de aproximadamente 15 ms, isso porque a desativação desse componente só acontece quando a corrente entre seus terminais passa por zero. Uma tensão residual aparece sobre a eletroválvula quando o TRIAC está desativado. Outra importante observação foi que o aumento da frequência de chaveamento inserida na base do transistor não resultou em alteração visível no tempo de atraso da desativação.

#### 4.2.2 Relé eletromecânico

O relé eletromecânico foi outro componente que opera como interruptor avaliado para acionamento das eletroválvulas. Diferentemente do TRIAC, esse componente não necessitou do desenvolvimento de circuitos complementares para avaliação do seu comportamento junto com a eletroválvula. Ele foi colocado na mesma placa multifuros e foi acionado com o mesmo microcontrolador programável.

Figura 18 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por TRIAC com um chaveamento de 20 Hz. O canal 1 corresponde ao sinal em tensão de onda quadrada inserido na base do transistor e o canal 2 ao sinal de tensão sobre a eletroválvula. A escala de tempo utilizada foi 10,0 ms.



Fonte – Acervo pessoal do autor.

A medição da tensão sobre a eletroválvula quando submetida a um chaveamento demonstrou que, assim como o circuito com TRIACs, a frequência não causa alterações visíveis no atraso de abertura ou fechamento. Para a maior frequência avaliada, observou-se um atraso de 10 ms no surgimento da tensão sobre a eletroválvula após o acionamento do relé. Na desativação da eletroválvula se verificou um atraso de 12 ms. O resultado do ensaio feito com o relé eletromecânico do modelo JZC-23F(4123) é apresentado na figura 20, em que a medição do sinal de entrada do relé foi feita com os polos negativo e positivo invertidos e por isso resultou em um sinal de tensão negativa nos momentos de acionamento da eletroválvula.

### 4.2.3 Relé de estado sólido

O terceiro componente avaliado foi o relé de estado sólido modelo G3MC-202PL-VD da empresa OMRON. Assim como o relé eletromecânico, esse componente não necessitou de circuitos complementares para realizar o acionamento em corrente alternada. Como o circuito com TRIAC, esse tipo de relé não emite ruído audível na sua operação, característica presente no relé eletromecânico. Seu ensaio foi realizado da mesma forma que os outros componentes, sobre a mesma placa multifuros e se utilizou o microcontrolador programável para gerar os sinais de onda quadrada de 5 Hz e 20 Hz na entrada do componente.

Como resultado, observou-se um atraso máximo na tensão sobre a eletroválvula

Figura 19 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por relé eletromecânico com chaveamento de 20 Hz. O canal 1 corresponde ao sinal em tensão de onda quadrada inserido na entrada do relé e o canal 2 ao sinal de tensão sobre a eletroválvula. A escala de tempo utilizada foi 25,0 ms. Os polos de medição do sinal de entrada do relé estão invertidos.



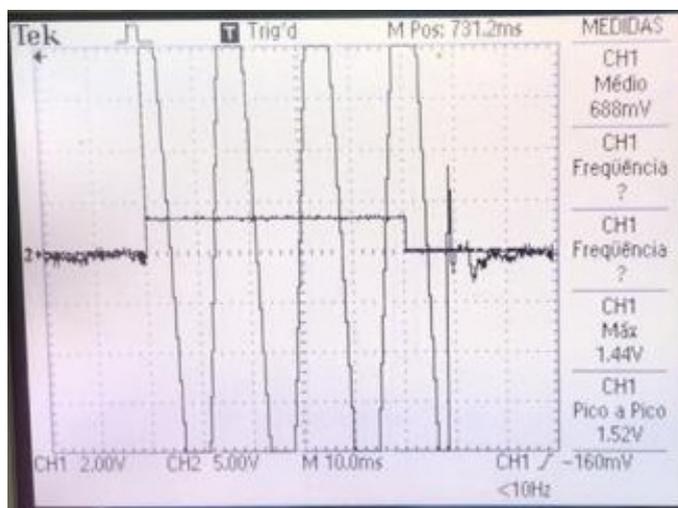
Fonte – Acervo pessoal do autor.

de aproximadamente 15 ms ao desativar o relé. O componente não apresentou atraso visível na ativação, conforme apresenta a figura 20. Assim como ocorreu nos ensaios com os outros componentes, o aumento da frequência não resultou em alteração dos atrasos de ativação ou desativação. O que se observou de diferente em relação aos outros componentes, foi a diminuição do atraso de desativação conforme o momento da desativação do relé coincidia com o momento que a tensão da rede passava por zero. Quanto menor a tensão da rede sobre a eletroválvula nos momentos de desativação do componente, menor era o tempo do atraso de desativação.

#### 4.2.4 Componente selecionado

Diante dos resultados expostos, o componente selecionado para realiar o acionamento das eletroválvulas foi o relé de estado sólido. Quatro fatores levaram à escolha desse componente: seu tempo de resposta, sua estabilidade quando desativado, a não emissão de ruídos audíveis e a facilidade de manutenção. Seu tempo de atraso total, ao somar o atraso de ativação e desativação, é de 15 ms no máximo e se iguala ao circuito com TRIACs. Apesar de serem comparáveis no tempo de acionamento, o circuito com TRIACs apresentou uma tensão residual sobre a eletroválvula quando desativado, o que poderia resultar em acionamentos indesejáveis das eletroválvulas. É uma característica dos dois relés a facilidade da troca do componente caso exista

Figura 20 – Sinal medido sobre a eletroválvula quando acionada por relé de estado sólido com chaveamento de 20 Hz. O canal 1 corresponde ao sinal em tensão de onda quadrada inserido na entrada do relé e o canal 2 ao sinal de tensão sobre a eletroválvula. A escala de tempo utilizada foi 10,0 ms.



Fonte – Acervo pessoal do autor.

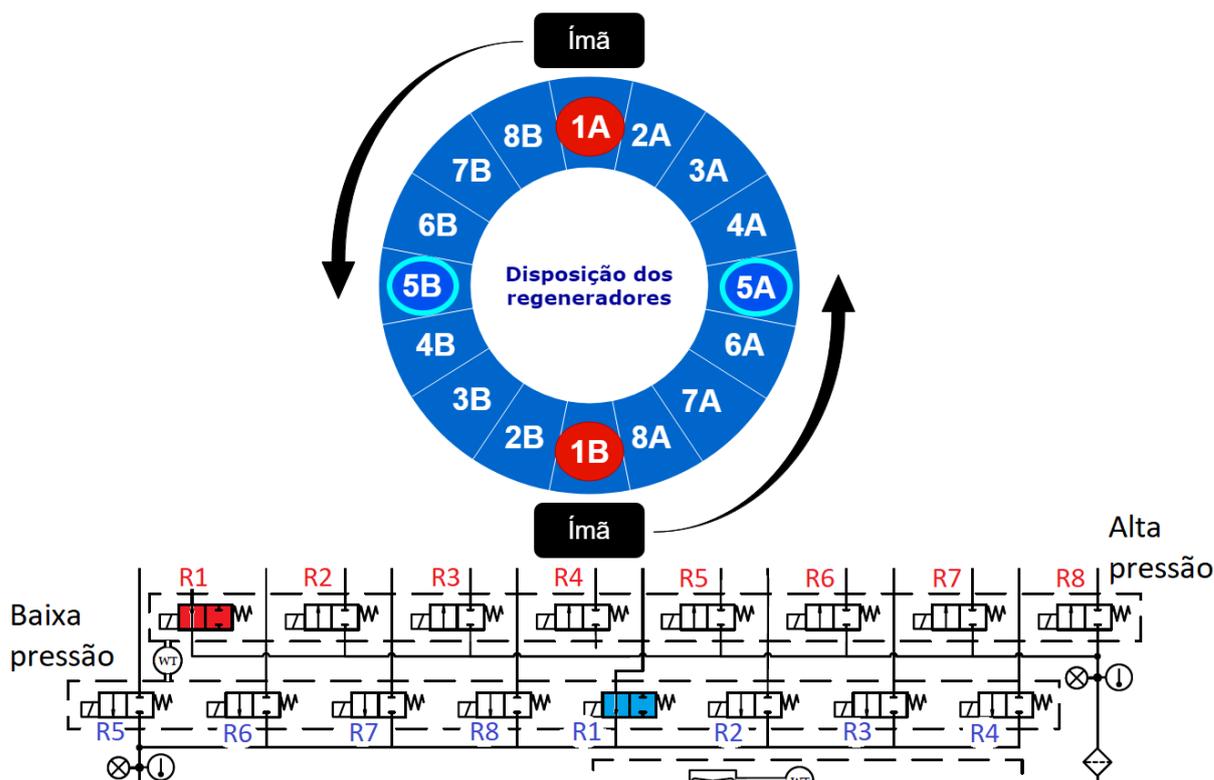
necessidade de uma manutenção, mas além de o relé eletromecânico emitir ruídos sonoros indesejados ele tem um atraso total de 25 ms. Assim, como possui vantagens sobre os outros dois componentes, o relé de estado sólido foi selecionado para realizar o acionamento das eletroválvulas.

Para operar os acionamentos foi desenvolvida uma placa de circuito integrado (PCI) com 8 relés de estado sólido e optoacopladores para acionar as válvulas em pares. Os optoacopladores utilizados são do modelo 4N25 da FAIRCHILD e foram utilizados para possibilitar o acionamento dos relés a partir da porta digital do controlador. O diagrama da figura 21 apresenta a relação entre cada eletroválvula e o respectivo relé que realiza o seu acionamento, nomeados com a letra “R” e um número correspondente ao relé. O diagrama também mostra o que acontece ao acionar o relé R1, por meio de uma representação. Ao acionar R1, as respectivas eletroválvulas são acionadas e acontece o escoamento quente pelo regeneradores 1A e 1B e escoamento frio pelos regeneradores 5A e 5B.

### 4.3 LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO

A lógica de sincronização da URM define os momentos de ativação e desativação dos 8 relés baseada na medição do ciclo magnético. Esses momentos são resultado da comparação do número de bordas medidas e o número de bordas calculadas para a ativação e desativação de cada relé. Seu comportamento é de um

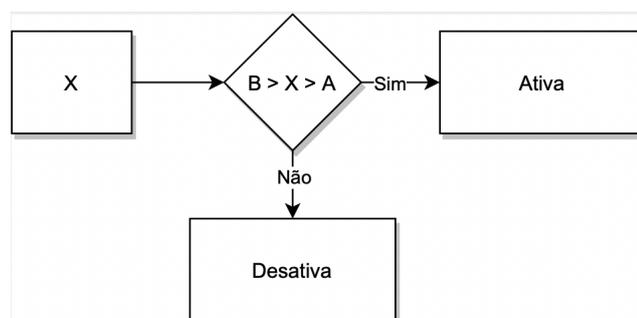
Figura 21 – Resultado do acionamento de 1 relé.



Fonte – Elaborado pelo autor.

comparador e pode ser entendida por meio do diagrama da figura 22, em que a variável  $X$  é a medição do campo magnético,  $A$  é o momento de ativação e  $B$  é o momento de desativação (todas as variáveis em número de bordas). Assim, o controlador armazena em sua memória os valores de  $A$  e  $B$  e ao executar essa lógica ele ativa o relé nos momentos em que  $X$  estiver entre  $A$  e  $B$ .

Figura 22 – Lógica simplificada de comparação da URM.



Fonte – Elaborado pelo autor.

O número de bordas para a ativação e a desativação de cada relé é resultado de

um cálculo que considera o número total de bordas em uma rotação do ímã e a fração de escoamentos desejada. A distância em bordas entre o centro da ativação de um relé e o centro da ativação dos outros dois relés adjacentes serão sempre iguais para um mesmo número total de bordas, sendo independente da fração de escoamentos. Essa distância entre centros em número de bordas pode ser definida como:

$$c = \frac{N_b}{16}, \quad (9)$$

em que  $c$  é a distância entre o centro de duas ativações adjacentes e o escalar 16 vem da multiplicação entre o número de relés (igual a 8) vezes o número de ciclos de campo magnético em uma volta do ímã (igual a 2). Dessa forma, ao estabelecer o centro da primeira ativação ( $C_1$ ), o centro da próxima ativação ( $C_2$ ) estará em  $C_1+c$  bordas, o centro da terceira ativação ( $C_3$ ) estará em  $C_2+c$  bordas e assim por diante.

Ao estabelecer o centro da ativação, para calcular o momento de ativação e desativação do relé basta saber a quantidade de bordas que ele deve ficar ativado. A fração de escoamento define a fração do ciclo magnético em que ocorre escoamento por um regenerador, assim o número de bordas que o relé deve ficar ativado pode ser definido da seguinte forma:

$$P = \frac{K_e N_B}{200}, \quad (10)$$

em que  $P$  é o número de bordas que um relé deve ficar ativo e o escalar 200 é o resultado da multiplicação dos escalares 2 e 100, pois em uma rotação completa do ímã (que possui  $N_B$  bordas) há 2 ciclos magnéticos e porque  $K_e$  é definido em porcentagem. Dessa forma, a ativação do primeiro relé é definida como  $C_1 - \frac{P}{2}$  e a desativação é definida como  $C_1 + \frac{P}{2}$ . Os momentos de ativação e desativação dos outros relés para seus respectivos centros são definidos da mesma forma.

#### 4.4 DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

Esta seção tem como objetivo apresentar as considerações feitas para a definição dos componentes responsáveis pelo processamento dos sinais de controle e aquisição. Para realizar essa seleção, foram pesquisadas soluções disponíveis no mercado que atendiam aos requisitos da URM e avaliados seus pontos positivos e negativos.

A primeira consideração feita é que existe a necessidade de separação do processamento de sinais de controle e de aquisição. Experiências prévias dos pesquisadores envolvidos no desenvolvimento da bancada da URM indicam que centralizar o processamento dos sinais de controle e aquisição em um único componente pode gerar atrasos no sistema de controle e prejudicar os ensaios da bancada. A intenção é que o aparato instrumental da URM permita sua operação mecânica da forma mais

otimizada possível, uma vez que seus subsistemas vêm sendo estudados em detalhes. Por isso, pode-se analisar separadamente as suas necessidades de controle e de aquisição de dados.

Ao analisar as necessidades do componente controle da URM, define-se que ele deve ser capaz de calcular a posição do ímã em relação aos regeneradores, enviar os sinais do acionamento das eletroválvulas nos momentos corretos e realizar 3 objetivos secundários. Para cumprir com os primeiros dois objetivos listados, o componente de controle deve ter disponível 3 entradas digitais para medição dos sinais do encoder e do sensor indutivo e 8 saídas digitais para a ativação e desativação dos relés que acionam as 16 eletroválvulas. Os objetivos secundários são denominados assim por não necessitarem de uma lógica de acionamento tão complexa. Esses objetivos correspondem a: o controle de potência de 2 exaustores, para o qual se prevê 2 saídas analógicas, o controle de vazão por um sinal analógico enviado para o inversor de potência que aciona a motobomba e o controle da frequência de rotação do ímã por meio de um sinal analógico para o servocontrolador. Ao todo, o componente de controle deve possuir no mínimo: 8 saídas digitais, 4 saídas analógicas e 3 entradas digitais.

Além do número de entradas e saídas, o componente de controle deve ter capacidade de identificar os sinais provenientes do encoder, garantir abertura e fechamento da mesma eletroválvula em intervalo mínimo de 150 ms com ajuste fino desse tempo e permitir fração de escoamento mais próxima de 50% possível (conforme os requisitos de operação do quadro 5). Para o ajuste mais fino do tempo de acionamento das eletroválvulas, a configuração ideal do número de pulsos por volta do servomotor é de 4096 pulsos, conforme apresenta a tabela 4. O período de atualização mínimo do dispositivo de controle deve ser pelo menos metade do tempo entre uma borda e outra. Sendo assim, a taxa de monitoramento e processamento do dispositivo de controle deve ser de pelo menos 3,333 MHz para identificar as bordas de subida e descida.

Tabela 4 – Parâmetros resultantes ao alterar  $N_m$ .

Pulsos por giro do motor ( $N_m$ )	Menor ângulo de identificação ( $\theta_i$ )	Número de bordas por volta do ímã ( $N_b$ )	Tempo entre uma borda e outra
8	0,27°	1300	307,692 $\mu$ s
64	0,035°	10400	38,461 $\mu$ s
512	0,0043°	83200	4,808 $\mu$ s
4096	0,000541°	665600	0,6 $\mu$ s

Fonte – Elaborado pelo autor.

Diante dessas considerações, avaliou-se a utilização de uma placa da marca Arduino, que chamou atenção pelo baixo custo frente aos seus recursos de hardware. As placas analisadas foram modelos de ponta de linha disponibilizadas pela empresa por meio do seu site (Arduino, 2021), são elas: ARDUINO DUE e a ARDUINO MEGA 2560

REV3. A primeira delas possui velocidade de *clock* de 84 MHz em um processador *dual core*, 12 entradas analógicas, 2 saídas analógicas e 54 portas digitais configuráveis de entrada ou saída. Dentre as portas digitais, 12 delas possuem saídas com modulação de tamanho de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*). A segunda possui velocidade de *clock* de 16 MHz, 16 entradas analógicas, não possui saídas analógicas e possui 54 entradas ou saídas digitais configuráveis (15 delas com PWM). O problema da falta de saídas analógicas poderia ser contornado pela utilização dos canais digitais PWM para gerar sinais de tensão de 0 V a 5 V.

Outro componente disponível no mercado são placas eletrônicas prontas, para prototipagem, com pinos de entrada e saída para o microcontrolador ESP32. Essas placas chamaram atenção pelo custo similar às placas Arduino bem como por possuírem recursos como Bluetooth e WiFi, tecnologia que as placas Arduino não possuem integradas. O ESP32 possui capacidade para *clock* de até 240 MHz, 18 entradas analógicas, 2 saídas analógicas, 34 entradas ou saídas digitais configuráveis e 10 pinos PWM. Da mesma forma que a placa Arduino, a falta de saídas analógicas poderia ser contornada por meio dos canais PWM com saídas de 0 V a 5 V.

O terceiro componente avaliado, e escolhido como controlador da URM, foi o MyRio-1900 da empresa National Instruments. Esse dispositivo possui velocidade de processamento de 667 MHz com um processador *dual core* e um FPGA integrado. Quanto às suas entradas e saídas, ele possui: 10 entradas analógicas, 6 saídas analógicas, 36 entradas ou saídas digitais configuráveis (8 delas com PWM e 4 delas próprias para leitura de encoder). Os motivos que levaram à escolha desse componente foram o número de portas de entrada e saída, sua velocidade de processamento superior, mas principalmente, a tecnologia do FPGA integrada no seu sistema. Essa tecnologia permite que a sincronização entre a abertura das válvulas e a incidência do campo magnético sobre os regeneradores seja feita de forma totalmente digital e consequentemente determinística. Isso é possível porque os sinais provenientes do encoder, que informam a posição do ímã, assim como o comando de acionamento das eletroválvulas, são sinais digitais. Dessa forma, controles secundários como o acionamento dos exaustores, o controle de vazão, ou então quaisquer outros controles desejados posteriormente não influenciarão de forma alguma na sincronização dos acionamentos com o campo magnético.

Para realizar a leitura dos sinais provenientes da bancada da URM, utilizou-se um chassi cDAQ-9179, de 14 *slots*, conectado via USB a um computador. O componente e os módulos se encontravam disponíveis para utilização no laboratório, sendo necessário apenas adquirir 1 módulo de leituras para termopares. Assim, para possibilitar as medições, foram conectados no componente de aquisição: 3 módulos de medição em tensão, 1 módulo de medição em corrente, 1 módulo de entradas e saídas digitais e o módulo para leitura dos termopares. A distribuição dos transdutores nos

módulos é apresentada na tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição dos componentes nos módulos do sistema de aquisição.

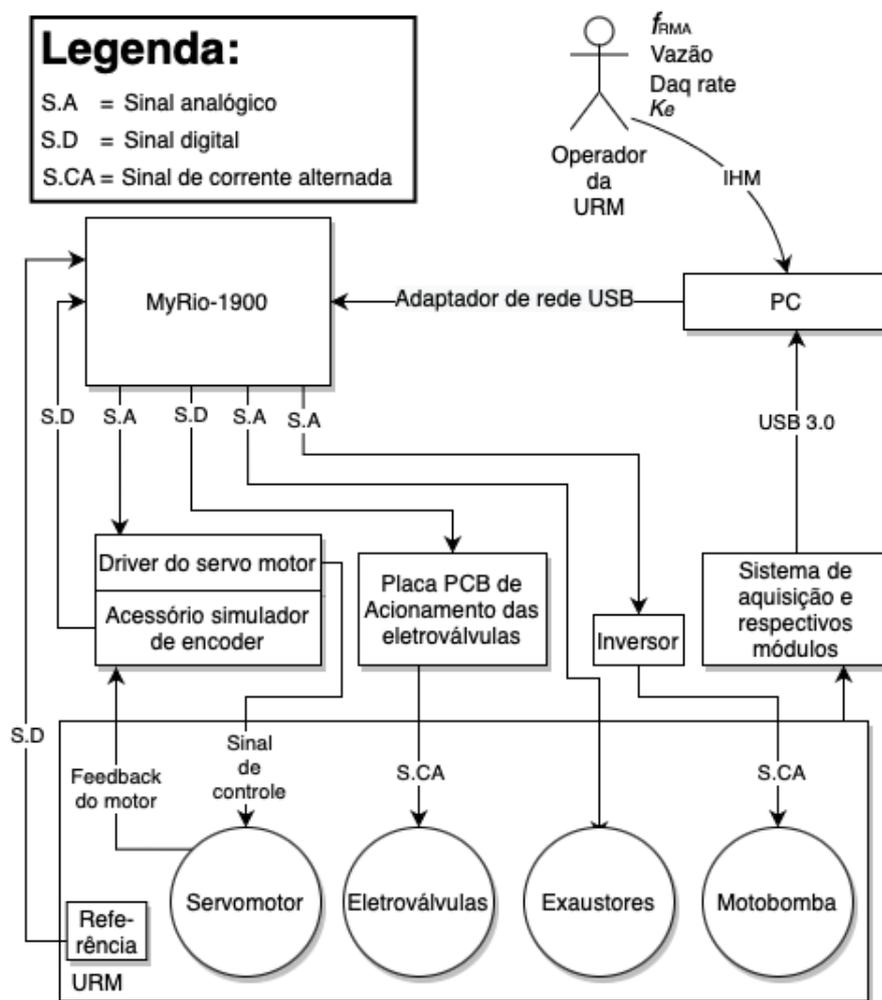
<b>Transdutor</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Módulo NI</b>
Transdutor de pressão	11	Medição em tensão (NI 9205)
Transdutor de torque	1	Medição em tensão (NI 9205)
Transdutor de potência	5	Medição em tensão (NI 9205)
Transdutor de efeito hall	8	Medição em tensão (NI 9205)
Transdutor de vazão	2	Medição em corrente (NI 9203)
Acionamento eletroválvulas	8	Entrada/saída digital (NI 9403)
Simulador de encoder	2	Entrada/saída digital (NI 9403)
Transdutor indutivo	1	Entrada/saída digital (NI 9403)
Termopares	16	Medição de termopar (NI 9213)

Fonte – Elaborado pelo autor.

Conforme definido os componentes de aquisição de dados e controle da URM, é possível visualizar a parte de hardware do sistema de controle e automação conforme apresentado no diagrama da figura 23. As informações de frequência de RMA, vazão pelo circuito hidráulico e frequência de aquisição dos dados (*daq rate*) são inseridas no sistema pelo operador da URM via uma IHM no computador da bancada. Ao receber as informações, o myRio gera os sinais analógicos necessários para acionar o servodriver na frequência de rotação desejada, para a motobomba operar na vazão desejada, e para os exaustores operarem na potência desejada. Além disso, com a leitura dos pulsos provenientes do simulador de encoder, o myRio calcula os momentos corretos para enviar os sinais de comando para os relés de estado sólido que acionam as eletroválvulas.

A medição dos sinais dos transdutores ocorre por meio do dispositivo de aquisição e seus respectivos módulos. Esses dados são apresentados na IHM para visualização do usuário e, caso o usuário deseje, são armazenados no disco rígido do computador.

Figura 23 – Diagrama dos componentes físicos da URM.



Fonte – Elaborado pelo autor.

## 5 SISTEMA DE CONTROLE

Este capítulo tem como objetivo apresentar todos os componentes de *software* desenvolvidos para o sistema de controle da URM. A seção 5.1 apresenta brevemente a arquitetura de hardware do myRio. A seção 5.2 apresenta a arquitetura modular desenvolvida para o software de controle. A seção 5.3 apresenta o funcionamento de cada estrutura modular de integração (chamada *kernel*) criada. A seção 5.4 apresenta a implementação da lógica de sincronização sobre essa arquitetura. A seção 5.5 apresenta a IHM desenvolvida. Por fim, a seção 5.6 apresenta as considerações finais sobre a arquitetura do sistema e da lógica de sincronização desenvolvida.

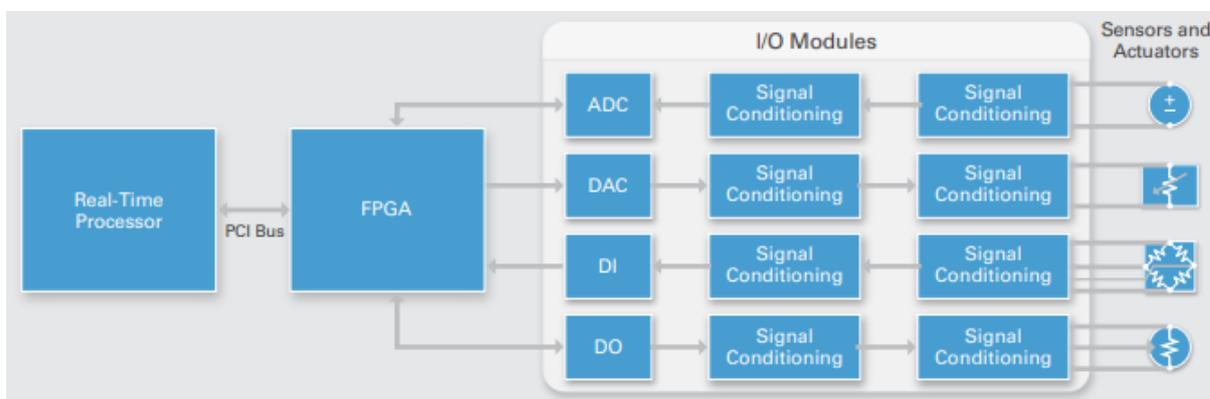
### 5.1 DISPOSITIVO MYRIO-1900

O myRio possui uma arquitetura de sistema embarcado conforme é apresentado no diagrama da figura 24. Ele possui dois componentes de processamento de dados que podem trabalhar de forma independente: um processador e um FPGA. Um programa que é executado pelo processador não interfere na lógica de técnicas digitais que é executada pelo FPGA e vice-versa. Além de processar a lógica digital, o FPGA serve como um portão de acesso aos seguintes recursos de hardware disponíveis no myRio: conversores analógico-digital (AD) e DA digital-analógico (DA), portas de entrada e saída de áudio, acelerômetro e o único botão presente no componente. O processador do myRio faz os processamentos referentes aos cálculos com ponto flutuante da lógica de sincronização e também o processamento da comunicação entre o computador da URM e o FPGA. Assim, uma forma eficiente de utilizar os recursos de hardware disponíveis nesse dispositivo é delegar funções específicas para cada uma das duas partes, de forma que elas interajam uma com a outra somente quando necessário.

### 5.2 ARQUITETURA DO SOFTWARE

O software de controle pode ser dividido em 3 principais módulos: módulo IHM, módulo *Real Time* (RT), e módulo FPGA. O módulo IHM é programado via aplicativo LabVIEW e é executado pelo processador do computador da URM. Esse módulo é responsável pela apresentação de dados do sistema ao usuário, pela interface entre usuário e sistemas de aquisição e controle, e pela lógica de armazenamento dos dados provenientes das medições. O módulo RT é executado no processador do dispositivo myRio e é programado via LabVIEW Real Time. Ele tem como responsabilidades: executar os cálculos da lógica de sincronização, executar os cálculos de conversões do sistema, promover comunicação entre o módulo IHM e o módulo FPGA e vice versa e também executar a lógica de parada do servo motor. Por último, tem-se o módulo

Figura 24 – Diagrama da arquitetura do sistema embarcado do componente myRio-1900.



Fonte – (National Instruments, 2014).

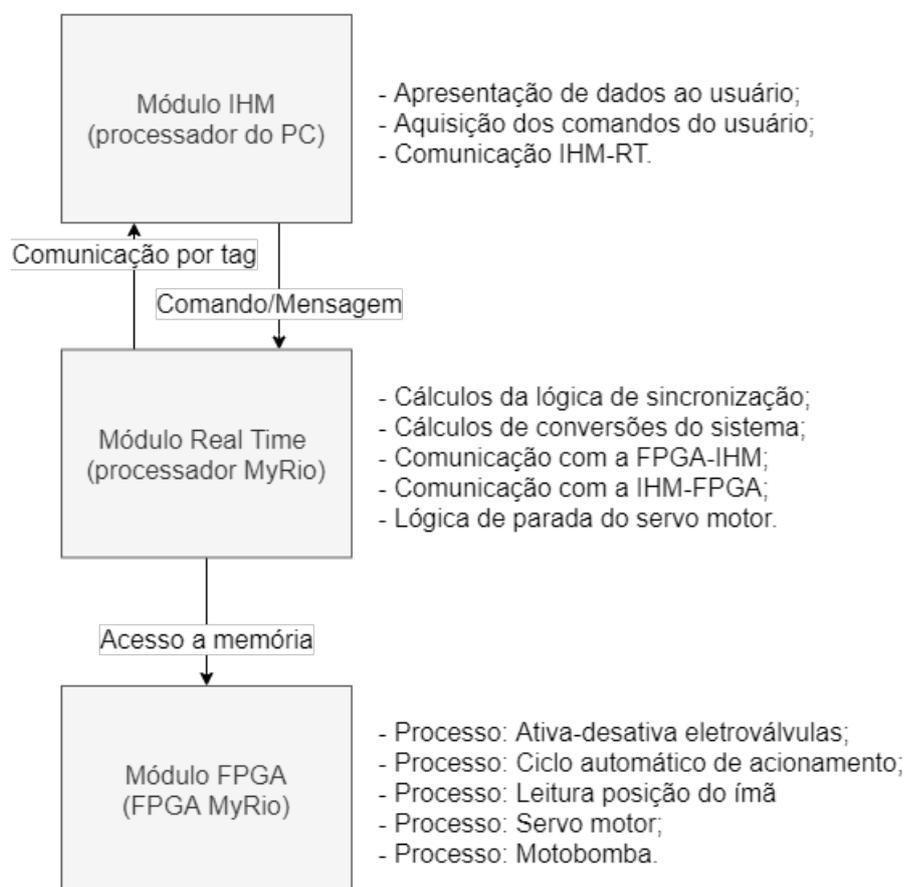
FPGA, que é programado via LabVIEW FPGA e é executado pelo FPGA do myRio. Sua responsabilidade é executar os processos da lógica de sincronização. Um diagrama que resume as funções de cada um dos 3 módulos é apresentado na figura 25.

O caráter modular da arquitetura desenvolvida permite que cada módulo seja executado separadamente. Cada módulo funciona como um bloco que tem variáveis de entrada que são processadas para gerar variáveis de saída. O módulo IHM tem como entradas os comandos do usuário (são exemplos de comandos: alterar a frequência dos ciclos de RMA e alternar o tipo de ciclo de acionamento para automático) e como saída mensagens com um padrão específico para um endereço de rede configurado. Esses padrões específicos são reconhecidos pelo módulo RT, que tem como variáveis de entrada mensagens produzidas pelo módulo IHM. O módulo RT possui como destinatários de suas variáveis de saída tanto o módulo IHM quanto o módulo FPGA. Para o primeiro, a comunicação é feita via *tag*, que é a modificação da informação de um espaço de memória específico configurado no computador da URM a qual o módulo IHM poderá ler posteriormente. A comunicação com o módulo FPGA é feita por meio de acesso direto a memória (DMA, do inglês *Direct Memory Access*), que tem a mesma lógica da *tag*, porém usa a memória interna do dispositivo myRio.

Para que os módulos cumpram suas funções e se comuniquem, eles são compostos por estruturas modulares que desempenham funções específicas. Deseja-se que essas estruturas possam ser reutilizadas em outros programas e que sejam facilmente adaptadas para futuras versões do software de controle. Para isso, cada estrutura modular também possui entradas e saídas definidas.

O módulo IHM é composto por 6 estruturas modulares, conforme apresentado na figura 26. As medições feitas pelo dispositivo de aquisição são tratados por 3 dessas estruturas, uma responsável pela configuração da aquisição e por colocar os dados

Figura 25 – Diagrama da macro estrutura do software do sistema de controle.

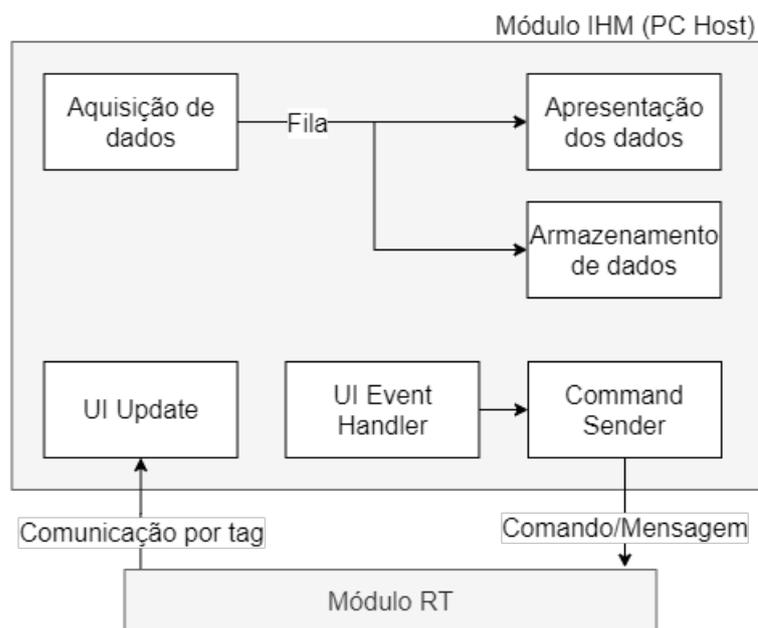


Fonte – Elaborado pelo autor

em uma estrutura de fila, uma segunda responsável pela apresentação desses dados nos diferentes gráficos e caixas de apresentação da IHM e outra responsável pelo armazenamento dos dados no disco rígido do computador. As outras três estruturas são responsáveis pela comunicação da IHM com o módulo RT. A estrutura *UI Update* é responsável pela atualização da IHM com os dados provenientes das *tags* atualizadas pelo módulo RT. O *UI Event Handler* é responsável por tratar os eventos da IHM, que são causados pelas interações do usuário com a IHM. A estrutura *Command Sender* é responsável por transformar um evento específico de atualização da IHM em um comando, ou mensagem, para o módulo RT.

O módulo RT faz a conexão entre os dois outros grandes módulos e é composto por 4 estruturas, conforme apresentado na figura 27. A mensagem proveniente do módulo IHM é lida pela estrutura *Command Parser*, que aciona diferentes *kernels* de acordo com o comando recebido. Essas estruturas são chamadas dessa forma pois são as responsáveis pelos processos de controle intermediários entre o computador da URM e o FPGA do dispositivo. Os *kernels* podem ser executados de forma

Figura 26 – Sub estruturas do módulo IHM.



Fonte – Elaborado pelo autor

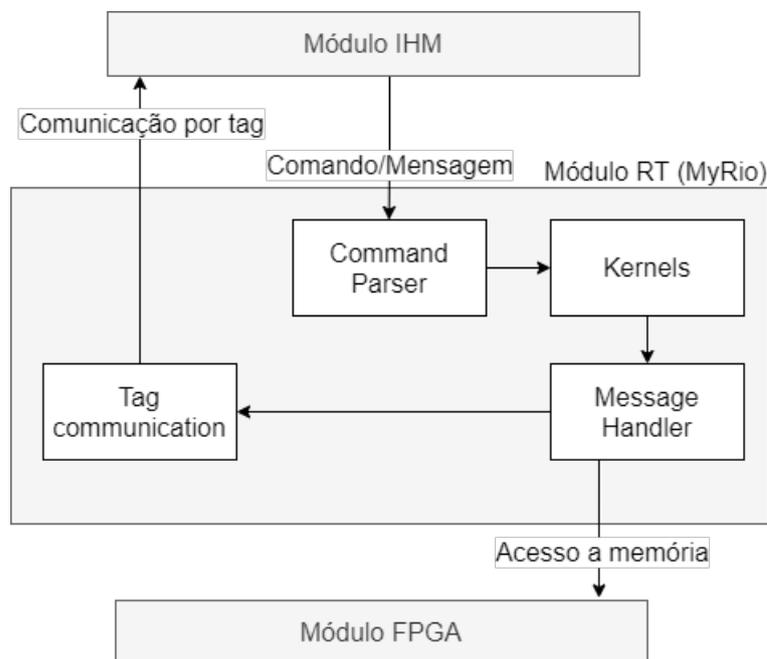
independente e em paralelo quando o *Command Parser* identifica a necessidade. O *Message Handler* lida com as informações que os *kernels* geram e que devem ser encaminhadas para o módulo IHM ou para o módulo FPGA.

O módulo FPGA possui 6 processos associados aos sinais enviados ou recebidos pelas portas do dispositivo myRio. Cada processo programado no FPGA do myRio possui uma função específica e pode possuir como entradas informações provenientes de outros processos ou então informações provenientes de medições de transdutores conectados em suas portas. As saídas desses processos podem ser também informações para outros processos ou então resultar em sinais elétricos em alguma de suas portas. Os processos que possuem como saída sinais elétricos são: *Aciona-desac eletroválvulas*, *Inicializa atuadores*, *Aciona SM* e *Aciona bomba*, conforme apresentado na figura 28. O processo *Lê angulação do ímã* possui como entrada a leitura dos sinais do encoder e como saída informações dessa leitura para o processo *Ciclo automático de acionamento*. Esse último processo contém parte da lógica de acionamentos que é explicada na seção 4.3 e pode ser habilitada ou desabilitada por meio de um comando do usuário na IHM.

### 5.3 KERNELS DESENVOLVIDOS

Quatro *kernels* foram desenvolvidos no módulo RT: *Command Parser*, *Set FPGA*, *Activation Cycle* e *Disable Motor*. O primeiro tem como função ler os coman-

Figura 27 – Sub estruturas do módulo RT.



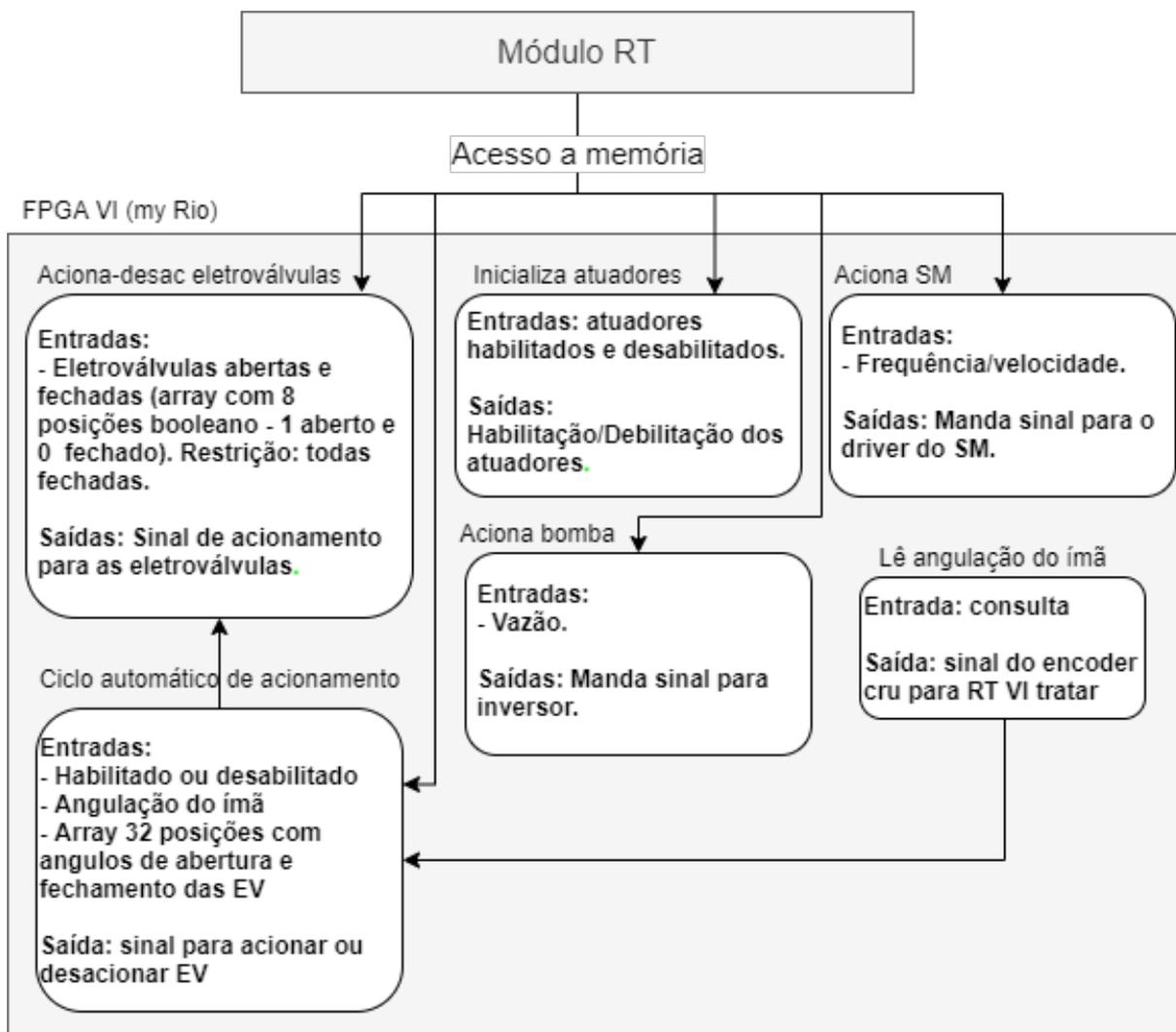
Fonte – Elaborado pelo autor

dos enviados pelo módulo IHM e ativar os outros três *kernels* quando necessário. O segundo tem como funções realizar os cálculos de conversão das variáveis para os formatos que o módulo FPGA trabalha e enviar esses valores convertidos para esse módulo. O terceiro tem como função realizar os cálculos para atualização da estrutura de dados que informa os momentos de acionamento das eletroválvulas em número de bordas de subida ou descida. Por fim, o quarto tem como função garantir que a ação de parada do servo motor aconteça de forma não abrupta.

O *Command Parser* recebe mensagens com o formato "*kernel* específico / ação / parâmetro 1 / parâmetro 2". A primeira seção se refere ao *kernel* que deve ser ativado no módulo RT, a segunda se refere à ação específica que esse *kernel* deve fazer e da terceira em diante são os parâmetros necessários para completar a ação. As mudanças de variáveis que o usuário faz na IHM são traduzidas, quando necessário, nessas mensagens, que se transformam em comandos para o controlador. Esse padrão garante que outras ações sejam facilmente programadas na IHM. Com esse padrão, os cálculos de sincronização e conversão devem continuar sendo feitos apenas no processador do controlador, deixando o computador apenas para o processamento da lógica de armazenamento de dados e apresentação para o usuário.

O *Set FPGA* configura uma única ação intitulada de "set". Essa ação faz com que os parâmetros da IHM sejam convertidos e enviados para o módulo FPGA, o qual só aceita os valores em bits. A tabela 6 apresenta as conversões realizadas para os

Figura 28 – Sub estruturas do módulo FPGA.



Fonte – Elaborado pelo autor

parâmetros dos atuadores da URM. Para a atuação do servomotor, foi selecionada uma saída analógica com conversor D/A de 12 bits, que produz um sinal de tensão de 0 V a 5 V, o qual servirá como referência de rotação para o servo driver. A conversão do valor desejado pelo usuário de frequência RMA para o valor em bits, leva em consideração o valor máximo do motor em hertz, as reduções do sistema e o fato de que 1 volta do ímã geram 2 ciclos de campo magnético sobre os regeneradores. Para a atuação da motobomba, uma saída analógica similar ao do servomotor foi selecionada, a qual servirá como referência de frequência para o inversor de frequência do motor. O valor de tensão de 0 V a 5 V corresponde a faixa de operação programada no inversor para operar de 0% a 100%. Já para a atuação dos exaustores, foram selecionadas duas saídas analógicas de -10 V a 10 V com conversores de 12 bits. No entanto, os relés de ângulo de fase dos exaustores operam apenas entre 0 V e 10 V. Sendo assim, pode-se

considerar que os conversores D/A dessas saídas operam apenas com 11 bits.

Quadro 6 – Conversões feitas no *kernel Set FPGA*.

Atuador	Intervalo da variável desejada (Y)	Intervalo da tensão de saída utilizado	Intervalo de valores para escrever no FPGA (F)	Equação de conversão
Servomotor	0 Hz a 1,641 Hz	0 V a 5 V	0 a 4095	$F = \frac{1}{2000 \cdot 60} \cdot \frac{1}{K_r} \cdot \frac{4095}{2} Y$
Motobomba	0% a 100%	0 V a 5 V	0 a 4095	$F = \frac{4095}{100} Y$
Exaustor 1	0% a 100%	0 V a 10 V	0 a 2047	$F = \frac{2047}{100} Y$
Exaustor 2	0% a 100%	0 V a 10 V	0 a 2047	$F = \frac{2047}{100} Y$

Fonte – Elaborado pelo autor.

Além da conversão dos parâmetros, o *kernel Set FPGA* é responsável por enviar 2 comandos para outros *kernels*. Os comandos em questão são para os *kernels Disable Motor* e *Activation Cycle*. O primeiro comando serve para indicar a necessidade de parada do servo motor e o segundo para solicitar o cálculo dos momentos de fechamento e abertura das eletroválvulas com parâmetros inseridos na IHM.

O *kernel Activation Cycle* é responsável por montar a estrutura com a informação dos momentos de acionamentos. Ele realiza os cálculos e posiciona os valores nos devidos lugares. A figura 29 apresenta a estrutura montada com a entrada de 50% de fração de escoamento e 20800 bordas por volta do ímã em torno do estator. Ao finalizar os cálculos, a estrutura é enviada ao *Set FPGA* para que os parâmetros sejam configurados no módulo FPGA.

O *kernel Disable Motor* tem como objetivo realizar a desaceleração suave do motor quando desativado via software. Ao enviar o comando para desativar o servo motor, seu driver entende como uma desativação instantânea. No entanto, a parada abrupta do motor pode causar dano ao eixo de transmissão. Para evitar um torque muito elevado no momento de parada, o *kernel* em questão envia um comando de referência com velocidade nula para o driver do motor. Assim, ele leva o motor até a velocidade desejada (zero) por meio de uma rampa antes de enviar o sinal para desativação.

#### 5.4 IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO

Para executar a lógica de sincronização o sistema de controle utiliza as estruturas do módulo FPGA: *Lê angulação do ímã*, *Ciclo automático de acionamento* e *Aciona-desac eletroválvulas* e o *kernel Activation Cycle* do módulo RT. As estruturas do módulo FPGA são responsáveis pela medição dos sinais elétricos do encoder e do transdutor de referência, pelo envio do sinal elétrico de acionamento dos relés e também pela comparação do número de bordas com a estrutura calculada pelo módulo RT. O *kernel Activation Cycle* executa os cálculos matemáticos dos momentos de

Figura 29 – Momentos de ativação e desativação das eletroválvulas com 50% de fração de escoamento e 20800 bordas por volta do ímã em torno do estator.

Duracao 1		Duracao 2	
EV1-abertura	EV1-fechamento	EV1-abertura	EV1-fechamento
20800	26000	10400	15600
EV2-abertura	EV2-fechamento	EV2-abertura	EV2-fechamento
19500	24700	9100	14300
EV3-abertura	EV3-fechamento	EV3-abertura	EV3-fechamento
18200	23400	7800	13000
EV4-abertura	EV4-fechamento	EV4-abertura	EV4-fechamento
16900	22100	6500	11700
EV5-abertura	EV5-fechamento	EV5-abertura	EV5-fechamento
15600	20800	5200	10400
EV6-abertura	EV6-fechamento	EV6-abertura	EV6-fechamento
14300	19500	3900	9100
EV7-abertura	EV7-fechamento	EV7-abertura	EV7-fechamento
13000	18200	2600	7800
EV8-abertura	EV8-fechamento	EV8-abertura	EV8-fechamento
11700	16900	1300	6500

Fonte – Acervo do grupo Polomag.

acionamentos para que as estruturas do FPGA foquem nos processos de leitura, envio e comparação de sinais.

A estrutura que contém a informação dos momentos dos acionamentos possui 32 posições de 32 bits. As primeiras 8 posições dessa estrutura são referentes aos momentos de ativação de cada relé na primeira metade da rotação do ímã em torno do bloco estator. As 8 posições seguintes da estrutura contêm os momentos de desativação dos relés na primeira metade. As 16 posições seguintes seguem a mesma lógica, mas para a segunda metade do ciclo de rotação do ímã.

A estrutura de 32 palavras de 32 bits é reescrita na memória do myRio via DMA toda vez que o usuário atualiza os valores de fração de escoamento na IHM. A estrutura não é modificada ao alterar a frequência de RMA, pois depende apenas do número total de bordas em uma rotação do ímã (que é um valor constante) e da fração de escoamentos. Pelo mesmo motivo, não é necessário um módulo para que os acionamentos iniciem seu ciclo apenas em um ângulo específico, conforme foi feito em outras sincronizações apresentadas anteriormente. Assim que os cálculos do módulo RT são finalizados e a estrutura de dados é escrita na memória do myRio, a lógica programada na estrutura Ciclo automático de acionamento do módulo FPGA se encarrega de executar os acionamentos nos devidos números de bordas medidas a partir do referencial.

Para que aconteça um deslocamento de fase nos escoamentos em relação ao campo magnético, basta somar ou subtrair um número de bordas no centro da ativação do primeiro relé ( $C_1$ ). Dessa forma, como o posicionamento dos centros (até então) estão dependentes uns dos outros, toda a estrutura será deslocada o número de bordas adicionado ou subtraído e todas as relações serão mantidas. Isso facilita o incremento futuro da lógica de controle com a funcionalidade de um controle realimentado para centralizar os escoamentos pelos regeneradores com o campo magnético incidente.

Ajustes individuais nos escoamentos podem ser feitos por meio da criação de variáveis auxiliares. Um ajuste individual do momento de acionamento de um relé pode ser desejado, devido às diferentes perdas de carga impostas pelos regeneradores. Para alterar os momentos de acionamentos de um relé em específico, deve ser criada uma variável auxiliar que copie o valor do centro original, calculado normalmente a partir do centro do acionamento anterior, e incremente esse valor a quantidade de bordas desejadas. Para que a relação entre os centros de acionamentos adjacentes sejam mantidas, o cálculo desses posicionamentos deve continuar levando em consideração o parâmetro original sem o incremento.

## 5.5 INTERFACE HUMANO-MÁQUINA

A IHM do sistema permite alterações paramétricas para o controle da operação da URM e a visualização da média e dos valores instantâneos das variáveis. A IHM desenvolvida é apresentada na figura 30. Em seu canto esquerdo ficam todos os controles de configuração da URM. Na parte superior do centro se encontra um diagrama simplificado da URM, com as médias instantâneas de algumas medições. Na parte inferior do centro se encontram gráficos com as medições de cada transdutor no tempo. Na parte da direita se encontra a medição média de 20 ciclos de campo magnético das principais variáveis. O *design* da interface foi adaptado de um *template* disponibilizado pelo grupo Polomag utilizado em outras bancadas experimentais.

Figura 30 – IHM da URM.

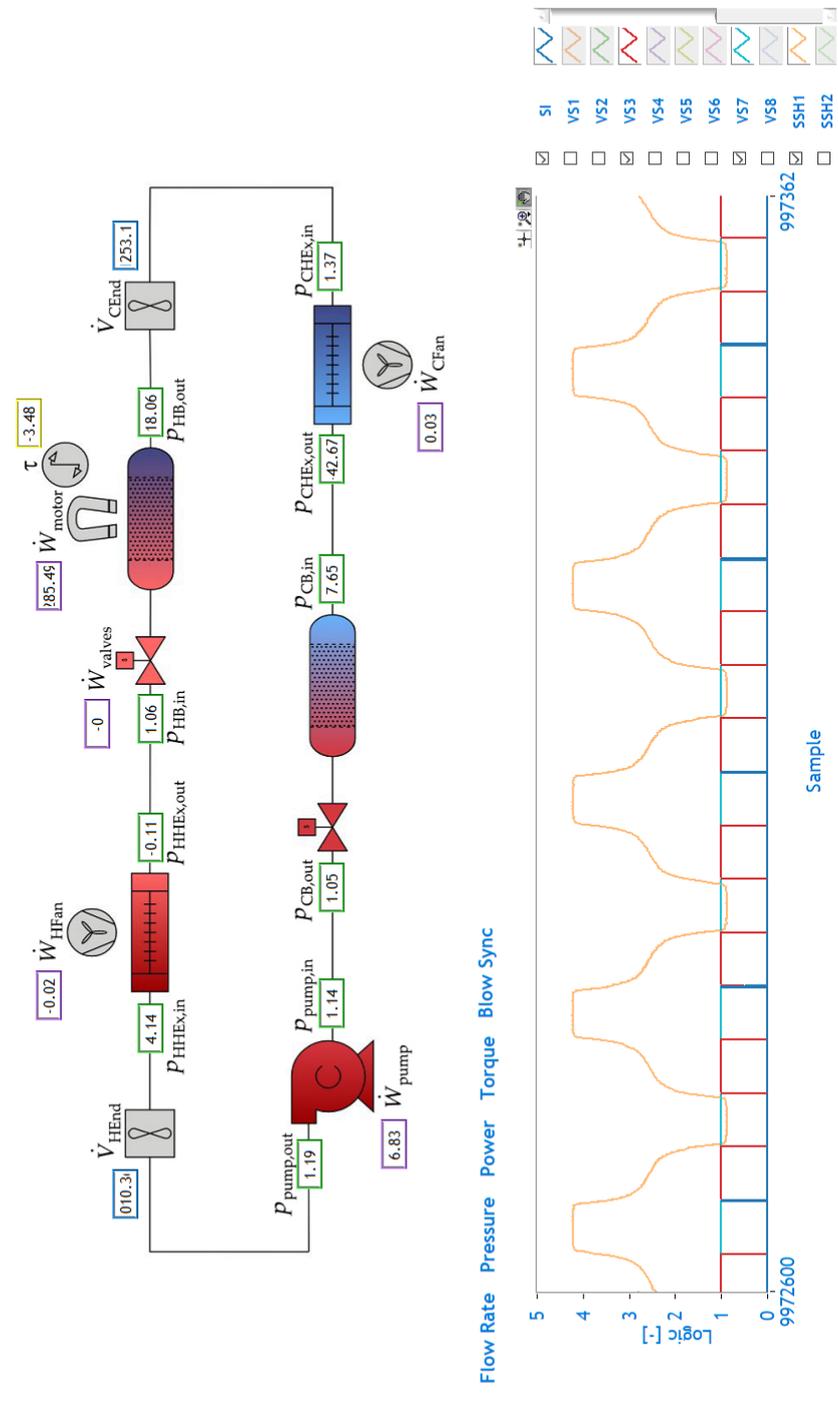
# MAGNETIC REFRIGERATION UNIT

Temperatures Hydraulic and Synchronization

Close

"This is gonna work, Polomag Team."  
"I know it is. Cause I don't know what  
I'm going to do if it doesn't"

Running Time	544.4 s
Connection	Connected
<b>FLOW RATE</b>	
Hot End	1010.36 L/h
Cold End	1293.1 L/h
<b>PRESSURE</b>	
Pump Head	0.06 bar
HHEx Drop	4.25 bar
CHEX Drop	44.04 bar
Pump Out	1.19 bar
<b>POWER</b>	
Motor	-16.41 W
Pump	1.61 W
Hot Fan	0.03 W
Cold Fan	-0.02 W
Valves	-0.00 W
<b>TEMPERATURE</b>	
Hot Ambient	16567.1 °C
Cold Ambient	16561.4 °C
System SPAN	-5.63 °C
Reg. SPAN	56.70 °C
<b>SYSTEM</b>	
Frequency	1.50 Hz
Utilization	-0.33
COP	11605.8
CE	-129.53 kWh
Eta 2nd	-115.53 %



**System**

DAQ rate [Hz] 150

AMR Frequency [Hz] 1.5

File Path G:\Meu Drive\MagChill\URM

File Name

Gap Time [min] 1

Write

**Pump**

Power [%] 1

Start

**Valves**

Blow Fraction [%] 50

System Manual

Start

**Motor**

Stop

**Fans**

Power Hot [%] 100

Power Cold [%] 100

Start

Fonte – Acervo do grupo Polomag.

Na parte de configuração da URM estão os controles do ciclo de refrigeração, de sincronização das eletroválvulas, de vazão, da potência dos exaustores e configurações de aquisição dos dados. Na parte superior das configurações se encontram a frequência de aquisição desejada e a frequência de RMA. Abaixo estão o local do disco rígido que se deseja salvar as aquisições e o nome do arquivo desejado. “*Gap Time*” se refere ao tempo desejado entre uma média das medições de 20 ciclos e outra (essa é uma configuração de aquisição). Logo abaixo encontra-se a configuração da potência da motobomba seguida das configurações de sincronização. Depois estão as configurações da potência dos exaustores.

Nas configurações de sincronização é possível configurar a fração de escoamento desejada e optar pelo acionamento manual das eletroválvulas ou pela sincronização automática. Caso o usuário opte pela sincronização automática, como está apresentado na figura, os botões para acionamento das eletroválvulas de forma manual ficam desativados.

Na parte de medições de variáveis, o diagrama do centro ajuda o usuário a verificar o comportamento do sistema de forma instantânea, enquanto o quadro da direita mostra a média das medições de 20 ciclos de operação. No diagrama é utilizado um código de cores que ajuda a identificar a variável observada. Nesse código: a cor azul corresponde às medições de vazão; verde à pressão; roxo à potência. As medições de temperatura ficam em um outro diagrama, acessível por meio de uma aba nomeada como “*Temperatures*”, sobre o diagrama. Com essas medições o usuário pode acompanhar as médias das medições dos transdutores durante a operação do sistema e acompanhar seu desempenho instantâneo. Enquanto isso, por meio do quadro da direita o usuário pode verificar o comportamento do sistema em uma escala de tempo mais longa.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A arquitetura modular criada para o sistema de controle teve como objetivo evitar atrasos ou lentidões causados pela influência de um processo no outro e facilitar sua expansão. Desde sua concepção em hardware, a estrutura responsável pelo processamento dos sinais de controle está separada das estruturas responsáveis pela aquisição de sinais e IHM. A arquitetura do software do sistema acompanha esse pensamento e é separada em módulos processados por componentes específicos que são ativados somente quando necessário. Esses módulos, assim como seus processos internos, possuem entradas e saídas específicas e definidas, o que permite que possam ser reutilizados ou expandidos por meio de outros módulos ao respeitar os padrões de comunicação apresentados.

A estratégia de sincronização desenvolvida atende os requisitos resumidos no quadro 5. Por meio do sistema de controle criado, o usuário pode optar pelo acio-

namento automático ou manual das eletroválvulas. No acionamento automático, as eletroválvulas são acionadas de acordo com a angulação do ímã em relação ao bloco estator. Ainda nessa opção, os acionamentos levam em consideração a fração de escoamento que pode ser configurada pelo usuário na IHM. A estratégia facilita a expansão prevista do sistema de controle, que visa centralizar periodicamente os escoamentos com o campo incidente nos regeneradores. Para essa expansão foi previsto o acesso a variável responsável pelo posicionamento dos centros de ativação  $C$ , que promovem o deslocamento de fase dos acionamentos em relação ao campo magnético incidente.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo analisar o funcionamento da URM diante do que foi desenvolvido neste trabalho. Na seção 6.1 os sistemas de controle e aquisição são utilizados para definição do número de pulsos por volta do servomotor. Na seção 6.2 são apresentados os ensaios de rotação do ímã para verificação da funcionalidade do controle da frequência de ciclos magnéticos. Na seção 6.3 é feita uma análise da lógica de sincronização. Na seção 6.4 é analisada a efetividade da lógica de conversão para alguns comandos inseridos na IHM. Por fim, a seção 6.5 apresenta as considerações finais do capítulo.

### 6.1 ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PULSOS

Esta seção tem como objetivo relatar os procedimentos feitos para definição do número de pulsos por volta do servomotor e apresentar os respectivos resultados encontrados. Como a resolução da medição do ângulo do ímã diminui com o aumento do número de bordas por volta, os ensaios começaram com a leitura das bordas de subida e descida dos dois canais disponíveis no *encoder*. Os procedimentos e resultados desse ensaio são apresentados na seção 6.1.1. Os resultados demonstraram que ao aumentar o número de pulsos, a variação da contagem do número de bordas por volta do ímã também aumenta. Por esse motivo, o segundo ensaio foi feito com a utilização de apenas um dos canais disponíveis no *encoder*. Procedimentos e resultados desse ensaio são apresentados na seção 6.1.2. Com o intuito de encontrar a menor resolução para a medição da posição do ímã, a seção 6.1.3 apresenta procedimentos e resultados do ensaio feito somente com a medição das bordas de subida dos pulsos de um dos canais. A seção 6.1.4 apresenta uma análise geral dos resultados encontrados nos ensaios com o objetivo de definir a melhor configuração e número de pulsos, visando a menor variação da contagem total de bordas e menor resolução da medição da posição do ímã.

Para configurar o número de pulsos por volta no sistema de controle deve-se alterar a programação do servoconversor e realizar um ajuste na programação do módulo RT. A programação do servoconversor (modelo SCA06) permite ajuste de 8 a 4096 pulsos por volta do eixo de transmissão por meio da IHM do próprio dispositivo. O ajuste no módulo RT deve ser feito no *kernel Activation Cycle*, dado que nele é inserido o valor de bordas totais por rotação do ímã em torno do estator. Esse valor pode ser calculado em função do número de pulsos configurado no servoconversor, por meio da equação (8), apresentada na página 45 deste trabalho.

### 6.1.1 Medição subida e descida de dois canais

O primeiro ensaio foi feito com o sistema de controle medindo bordas de subida e descida dos dois canais do servoconversor. Foram avaliadas as seguintes quantidades de pulsos por volta do servomotor: [8,16,32,64,128,256,512,1024,2048,4096]. Para cada uma dessas quantidades foi avaliado o número de bordas medidas em uma rotação completa do ímã nas frequências de ciclos RMA de: 0,5 Hz, 1 Hz e 1,5 Hz (que correspondem ao dobro da frequência de rotação do ímã).

A primeira constatação desse ensaio foi que até a configuração de 128 pulsos por volta, o número total de bordas medidas era igual ao número de bordas calculadas. A partir da configuração seguinte, 256 pulsos, a contagem de bordas por volta começou a variar. Devido a esse fato, foram registrados as quantidades máximas e mínimas de bordas medidas. A diferença tende a aumentar conforme o número de pulsos configurado aumenta. A tabela 6 apresenta a amplitude dessas diferenças de bordas medidas na forma de ângulo de rotação. A tabela também apresenta a resolução do sistema de sincronização para cada configuração de número de pulsos.

Tabela 6 – Resumo dos resultados do ensaio feito com a medição das bordas de subida e descida dos pulsos de dois canais.

Pulsos motor	Ângulo associado a amplitude da variação	Resolução da medição
4096	0,0387°	0,0005°
2048	0,0411°	0,0010°
1024	0,0194°	0,0021°
512	0,0086°	0,0043°
256	0,0288°	0,0086°
128	0,0000°	0,0173°

Fonte – Elaborado pelo autor.

A segunda constatação foi que a amplitude da variação entre o valor máximo e mínimo de bordas medidas não sofre uma influência linear com o aumento da frequência de rotação. Em algumas configurações de número de pulsos, o aumento da frequência de rotação do ímã resulta no aumento da diferença entre os valores máximos e mínimos de bordas medidas. Em algumas configurações, o aumento da frequência resulta na diminuição da diferença. Em outras configurações, valores médios de frequência resultam em variações maiores.

A terceira constatação é que a configuração de quantidade de pulsos por volta do motor que resulta no menor ângulo medido (melhor resolução) e sem apresentar variação ao longo da operação é a configuração de 128 pulsos. Neste ensaio, essa quantidade de pulsos corresponde a 20800 bordas por volta do ímã. Essa quantidade de bordas por volta resulta em um ângulo mínimo de rotação do ímã de 0,0173°. Esse ângulo mínimo pode ser identificado como a resolução em ângulo do sistema de sincronização.

### 6.1.2 Medição subida e descida de um canal

No segundo ensaio realizado, foram medidas as bordas de subida e descida dos pulsos de um dos canais apenas. Dessa forma, para calcular o número de bordas em uma rotação do ímã divide-se o resultado da equação (8) pela metade, já que um dos canais não é medido. Os cálculos de resolução e do ângulo associado à variação de bordas lidas também levam esse fator em consideração. Este ensaio foi feito da mesma forma que o primeiro no que se refere a variações de quantidade de pulsos por volta e frequência de rotação do ímã.

A configuração de menor resolução que não apresentou variação no número de bordas totais em uma rotação do ímã foi a configuração de 256 pulsos. Apesar de aumentar o número de pulsos, a resolução resultante desse valor corresponde à resolução do ensaio anterior ( $0,0173^\circ$ ). Isso ocorre porque um canal a menos está sendo lido neste ensaio, o que resulta em metade do número de bordas por volta em relação ao ensaio anterior.

Quanto às outras constatações feitas no primeiro ensaio, os comportamentos gerais se repetiram. Quanto maior o número de pulsos configurados, maior é a diferença entre os valores máximos e mínimos de bordas lidas. A relação entre essa diferença e a frequência de rotação do ímã não é proporcional. A tabela 7 apresenta a amplitude dessas diferenças, já na forma de ângulo, para configurações acima de 256 pulsos e a resolução final da medição da posição.

Tabela 7 – Resumo dos resultados do ensaio feito com a medição das bordas de subida e descida dos pulsos de apenas um canal.

Pulsos motor	Ângulo associado a amplitude da variação	Resolução da medição
4096	$0,0274^\circ$	$0,0010^\circ$
2048	$0,0223^\circ$	$0,0021^\circ$
1024	$0,0317^\circ$	$0,0043^\circ$
512	$0,0144^\circ$	$0,0086^\circ$
256	$0,0000^\circ$	$0,0173^\circ$

Fonte – Elaborado pelo autor.

### 6.1.3 Medição subida de um canal

No terceiro ensaio realizado, foram medidas apenas as bordas de subida dos pulsos de um dos canais. Para calcular o número de bordas em uma rotação, dessa vez deve-se dividir por quatro o resultado da equação (8), já que além de um canal a menos, agora estão sendo medidas apenas as bordas de subida. Ademais, os cálculos de resolução e do ângulo associado a variação de bordas lidas devem levar esse fator em consideração. No entanto, este ensaio foi feito da mesma forma que os outros dois ensaios anteriores em configuração de quantidade de pulsos e frequências de rotação.

A resolução alcançada neste ensaio foi quatro vezes maior que a resolução alcançada nos ensaios anteriores ( $0,0692^\circ$ ). A configuração de maior número de pulsos que não apresentou variação foi a configuração de 128 pulsos, que neste ensaio corresponde a 5200 bordas medidas por rotação. Os comportamentos gerais do sistema se repetiram. A tabela 8 apresenta os resultados deste ensaio.

Tabela 8 – Resumo dos resultados do ensaio feito com a medição da borda de subida dos pulsos de um canal.

Pulsos motor	Média dos ângulos associado a variação	Resolução da medição
4096	$0,0158^\circ$	$0,0021^\circ$
2048	$0,0288^\circ$	$0,0043^\circ$
1024	$0,0288^\circ$	$0,0086^\circ$
512	$0,0346^\circ$	$0,0173^\circ$
256	$0,0230^\circ$	$0,0346^\circ$
128	$0,0000^\circ$	$0,0692^\circ$

Fonte – Elaborado pelo autor.

#### 6.1.4 Análise dos resultados

A melhor configuração é definida como aquela que não apresenta variação no número total de bordas medidas por volta do ímã e que resulta na menor resolução de medição. Por isso, tanto o arranjo do primeiro ensaio com uma configuração de 128 pulsos quanto o arranjo do segundo ensaio com uma configuração de 256 pulsos são válidos. Ademais, as constatações sobre os comportamentos gerais semelhantes do sistema nos três ensaios reforçam a validade das duas configurações (com seus devidos arranjos). Com 128 pulsos por rotação do servomotor e 20800 bordas por rotação do ímã, o sistema de sincronização da URM possui uma resolução mínima da medição da posição do ímã de  $0,0173^\circ$ . Com essa resolução e em uma frequência de ciclos de refrigeração de 1,5 Hz, o sistema pode atualizar a posição do ímã a cada 64,1  $\mu$ s.

## 6.2 ENSAIOS DE ROTAÇÃO DO ÍMÃ

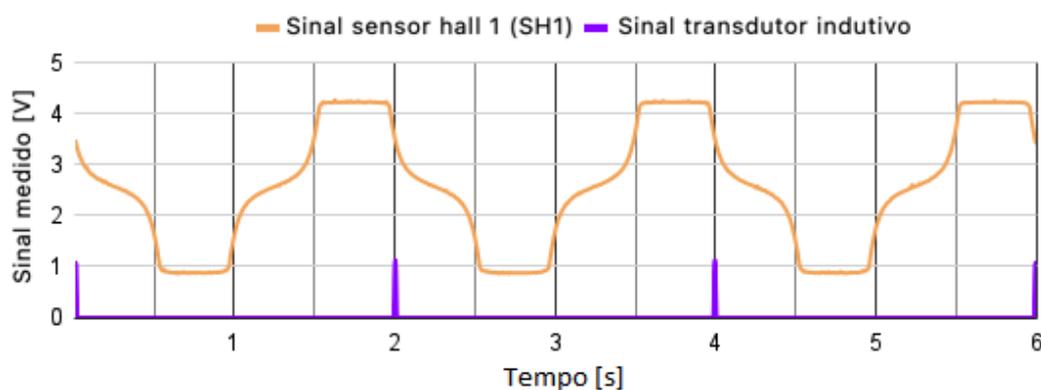
Esta seção tem como objetivo apresentar os ensaios da rotação do ímã em uma frequência configurada pelo operador da bancada por meio da IHM da URM. Para avaliar se o sistema de controle desenvolvido de fato faz com que o ímã rotacione na frequência desejada, os dados provenientes das medições de campo magnético e do transdutor indutivo responsável pelo pulso de referência foram salvos e são analisados nesta seção. Foram configurados, via IHM, três valores de frequência de ciclo magnético: 0,5 Hz, 1 Hz e 1,5 Hz. Por fim, é feita uma análise da resolução mínima da configuração da frequência do campo magnético.

O transdutor de efeito Hall que mede a incidência do campo magnético envia um sinal de tensão de 0,7 V a 4,3 V ao sistema de aquisição. O sinal enviado pelo transdutor de efeito Hall de número 1 (segundo a disposição do diagrama da figura 14 da página 46) apresenta um perfil conforme a linha laranja do gráfico apresentado na figura 31. No eixo vertical, valores acima de 2,5 V correspondem ao campo positivo e valores abaixo desse limite correspondem ao campo negativo. As demais medições realizadas pelo transdutor de efeito Hall e apresentadas neste capítulo já consideram a transformação do sinal de tensão adquirido pelo transdutor em um sinal correspondente da intensidade do campo magnético, expresso em gauss. O sinal proveniente do transdutor (indutivo) de referência da posição do ímã é colocado junto no gráfico, mas representa apenas um evento e sua medição continua sendo apresentada como um pulso nos gráficos, já que a informação relevante é o instante em que o pulso ocorre.

Como observado nos sinais medidos apresentados na figura 32, a configuração da frequência de ciclo magnético desejada corresponde com a frequência de rotação do ímã. É importante lembrar aqui que a cada rotação do ímã acontecem dois ciclos de campo magnético. Dessa forma, em 0,5 Hz de frequência, o sinal de referência é medido a cada quatro segundos e nesse período acontecem dois ciclos magnéticos (dois momentos de baixa intensidade e dois momentos de alta intensidade). Na configuração de 1 Hz, os eventos de referência acontecem a cada dois segundos. Por fim, na configuração de 1,5 Hz os eventos de referência acontecem a cada 1,333 s. Os resultados dessas medições são apresentados na figura 32. Essas medições foram feitas com uma taxa de amostragem de 150 Hz e apresentaram correspondência entre número de amostras esperados (calculados) e medidos.

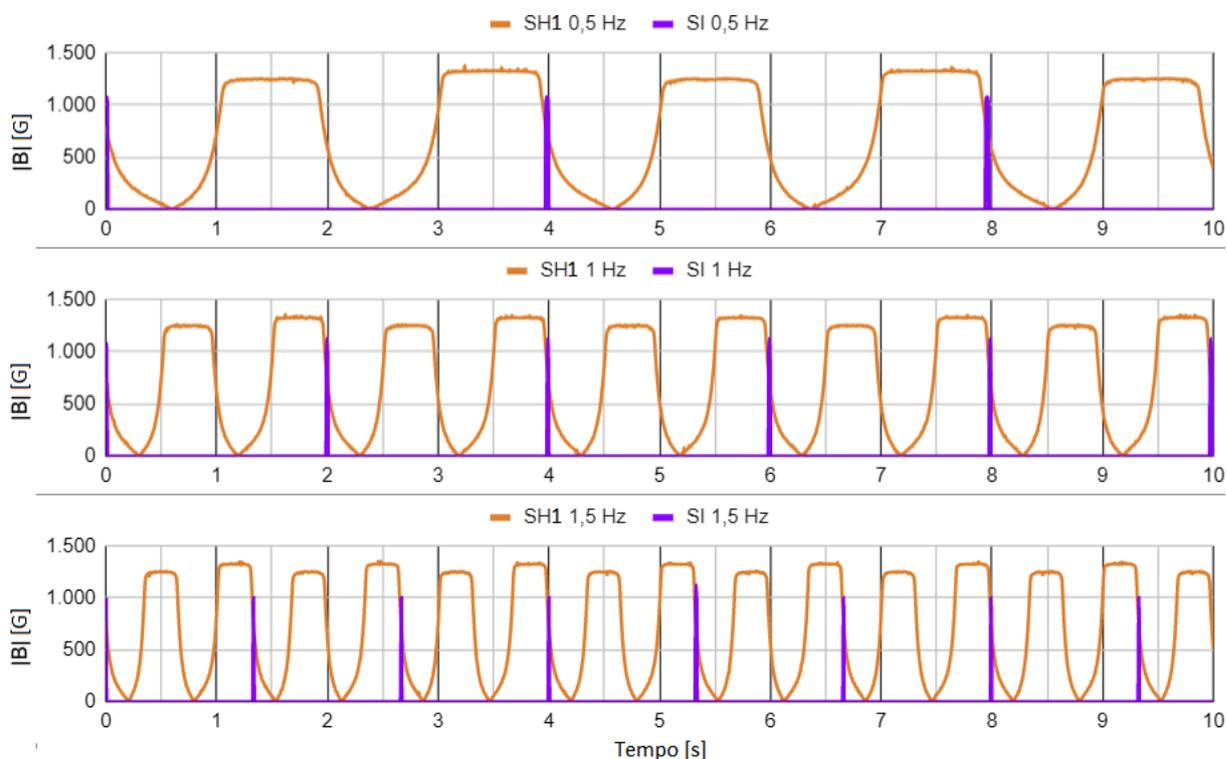
A resolução da frequência de ciclos magnéticos na IHM é de 1,602 mHz e seu limite é proveniente do servoconversor. A resolução da porta de saída analógica do

Figura 31 – Medição feita pelo transdutor de efeito Hall em uma frequência de ciclo magnético de 1 Hz.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Ciclos de campo magnético a 0,5 Hz, 1 Hz e 1,5 Hz.



Fonte – Elaborado pelo autor.

MyRio responsável por enviar o sinal de referência para o servo driver é de 1,221 mV, devido ao seu conversor digital/analógico de 12 bits. A resolução da porta de entrada do servoconversor que lê esse sinal enviado pelo MyRio é de 4,883 mV, devido ao seu conversor analógico/digital de 10 bits. Assim, a limitação da resolução da frequência inserida pelo usuário na IHM é imposta pela leitura de tensão do servoconversor, já que o incremento de 4 valores do dispositivo MyRio resulta no incremento de um valor do servoconversor. A resolução mínima da frequência de ciclo magnético sobre os RMAs pode ser calculada como a divisão entre a frequência máxima de RMA (1,64 Hz) e a quantidade de valores possíveis que o conversor analógico/digital do servoconversor consegue converter (1024 valores), o que resulta em uma resolução de 1,602 mHz. Essa resolução é suficiente para o sistema, uma vez que o grupo de estudos que opera a bancada da URM costuma utilizar 100 mHz de diferença entre um ensaio e outro.

### 6.3 ENSAIOS DA LÓGICA DE SINCRONIZAÇÃO

Esta seção tem como objetivo analisar o funcionamento da lógica de sincronização desenvolvida. Para isso, na seção 6.3.1 são apresentadas as verificações da lógica de controle com o intuito de verificar a correspondência entre a lógica planejada e a lógica implementada. Na seção 6.3.2 são apresentados os ensaios práticos de sin-

cronização. Para finalizar, na seção 6.3.3 são apresentadas as análises de resultados da lógica de sincronização.

### 6.3.1 Concordância lógica

A validade da implementação da lógica desenvolvida pode ser verificada por meio da concordância entre os parâmetros de entrada do sistema e os valores em números de bordas apresentados na interface gráfica do módulo FPGA. Os parâmetros de entrada são: fração de escoamento, número de bordas por volta do ímã e quantidade de bordas que posiciona o primeiro centro, sendo que, em uma utilização normal da URM, apenas a fração de escoamento é configurada e os outros parâmetros são constantes. Como os momentos de ativação e desativação dos relés são apresentados na interface gráfica do FPGA em números de bordas medidas (conforme apresentado na figura 29 da página 67 deste trabalho), pode-se verificar a validade da lógica por meio do cálculo da quantidade de bordas registradas por acionamento e a quantidade de bordas entre dois centros.

Para facilitar a visualização dos ensaios foi construída a tabela 9, que define valores dos parâmetros de saída calculados de acordo com os parâmetros de entrada. As quantidades de bordas medidas entre dois centros e bordas por duração de ativação de relé foram calculadas por meio das equações (9) e (10), apresentadas nas páginas 55 e 55 deste trabalho.

Tabela 9 – Tabela de valores calculados para verificação da implementação da lógica de sincronização.

Índice teste	Bordas por volta do ímã	Fração de escoamento	Deslocamento do 1° centro	Bordas entre centros	Bordas por ativação
1	20800	25%	-2600	1300	2600
2	20800	37%	-2600	1300	3848
3	20800	50%	-2600	1300	5200

Fonte – Elaborado pelo autor.

Os momentos de ativação e desativação dos relés (em números de bordas) resultantes dos parâmetros definidos na tabela 9 são apresentados na tabela 10. Cada relé aparece em duas linhas da tabela porque a primeira vez corresponde aos momentos de ativação e desativação do primeiro ciclo magnético e a segunda vez corresponde ao segundo (já que cada rotação completa do ímã gera dois ciclos magnéticos). A quantidade de bordas em uma duração de escoamento pode ser calculada por meio da subtração do valor do momento de desativação pelo valor do momento de ativação (em bordas) de um mesmo relé, para um mesmo ensaio. A quantidade de bordas entre centros pode ser calculada pela relação:  $|C_i - C_{i+1}|$ , em que  $i$  é um inteiro de 1 a

7. O parâmetro  $C_i$  pode ser calculado por meio da divisão por 2 da soma dos dois momentos (ativação e desativação) do relé  $i$ . Dessa forma, verificou-se a validade da lógica implementada.

Tabela 10 – Momentos de ativação e desativação dos relés (em números de bordas) resultantes dos parâmetros definidos na tabela 9. O índice no título das colunas corresponde ao índice do teste definido na tabela 9.

Relé	Ativa <sub>1</sub>	Desativa <sub>1</sub>	Ativa <sub>2</sub>	Desativa <sub>2</sub>	Ativa <sub>3</sub>	Desativa <sub>3</sub>
1	22100	24700	21476	25324	20800	26000
2	20800	23400	20176	24024	19500	24700
3	19500	22100	18876	22724	18200	23400
4	18200	20800	17576	21424	16900	22100
5	16900	19500	16276	20124	15600	20800
6	15600	18200	14976	18824	14300	19500
7	14300	16900	13676	17524	13000	18200
8	13000	15600	12376	16224	11700	16900
1	11700	14300	11076	14924	10400	15600
2	10400	13000	9776	13624	9100	14300
3	9100	11700	8476	12324	7800	13000
4	7800	10400	7176	11024	6500	11700
5	6500	9100	5876	9724	5200	10400
6	5200	7800	4576	8424	3900	9100
7	3900	6500	3276	7124	2600	7800
8	2600	5200	1976	5824	1300	6500

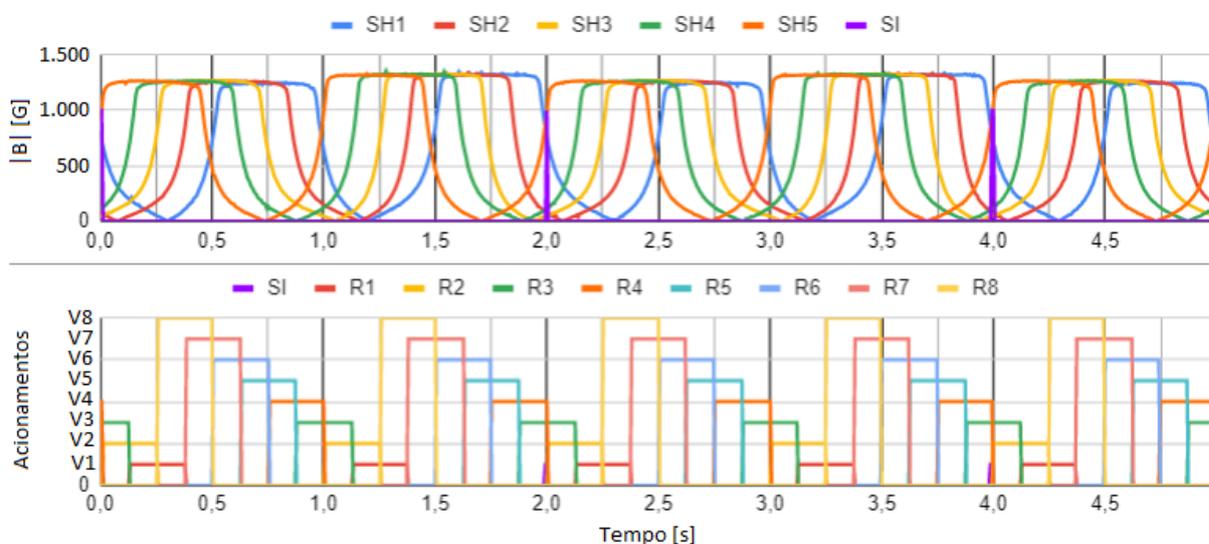
Fonte – Elaborado pelo autor.

### 6.3.2 Ensaios de sincronização

O primeiro ensaio de sincronização buscou analisar se os momentos de acionamento dos relés visualmente correspondem aos momentos de amplitude alta e baixa do campo magnético. A figura 33 apresenta a medição de cinco sensores de efeito Hall, seguidos da medição dos acionamentos. Nessa imagem foram apresentadas apenas cinco medições, das oito disponíveis, pois a imagem com todas as medições dificultava a visualização. Com essas medições é possível determinar a correspondência entre os relés (nomeados no gráfico com a letra "R") e seus respectivos regeneradores. A correspondência entre relé e regenerador acontece quando o acionamento é concêntrico com o momento de alta ou baixa intensidade. Para concentricidade em alta intensidade, o relé será responsável pelo escoamento frio (EF), enquanto para concentricidade em baixa intensidade, ele será responsável pelo escoamento quente (EQ). A tabela 11 resume a associação entre relé e regenerador.

Após a verificação de correspondência entre acionamento e campo magnético, o segundo ensaio buscou verificar a funcionalidade da alteração da fração de escoamento. Para isso foram configuradas diferentes frações de escoamentos para diferentes frequências de RMA. Os ensaios confirmaram a operação correta da funci-

Figura 33 – Ativação dos relés em 5 ciclos de RMA, em 0,5 Hz e 25% de fração de escoamento.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Associação relés e escoamento quente e frio pelos regeneradores.

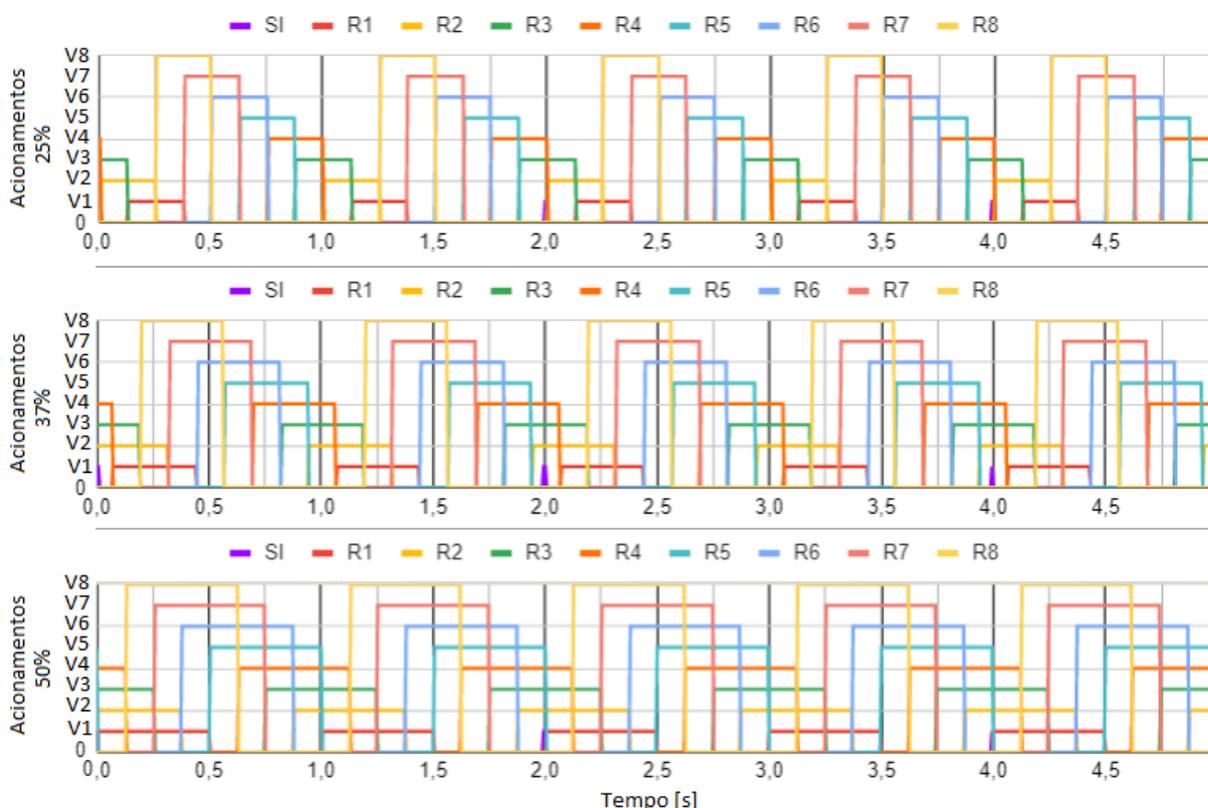
Relé	EQ pelo regenerador	EF pelo regenerador
1	1	5
2	2	6
3	3	7
4	4	8
5	5	1
6	6	2
7	7	3
8	8	4

Fonte – Elaborado pelo autor.

onalidade. A figura 34 apresenta os resultados para três frações (25%, 37% e 50%) em 1 Hz. No primeiro ensaio, os acionamentos dos relés de escoamento quente e frio ficam ativados 0,25 s (25% do ciclo RMA) cada. No segundo, ficam acionados 0,37 s cada (37% do ciclo). Por fim, no terceiro, ficam acionados 0,50 s cada (50% do ciclo).

O último ensaio feito teve como objetivo verificar a funcionalidade do deslocamento de fase entre os acionamentos e o campo magnético. Para isso, foi utilizada a variável de configuração de fase planejada para o sistema. Por meio dessa variável configurou-se quantidades de bordas que correspondem a ângulos conhecidos para verificação da efetividade da configuração. A figura 35 apresenta os ensaios com configurações de 1733 bordas (30° de deslocamento), 2600 bordas (45°) e 5200 bordas (90°). Com os deslocamentos de 45° e 90° observa-se que os acionamentos permanecem concêntricos com o campo magnético, porém em uma posição diferente da

Figura 34 – Ensaio de fração de escoamento a 25%, 37% e 50 % com frequência de 1 Hz.



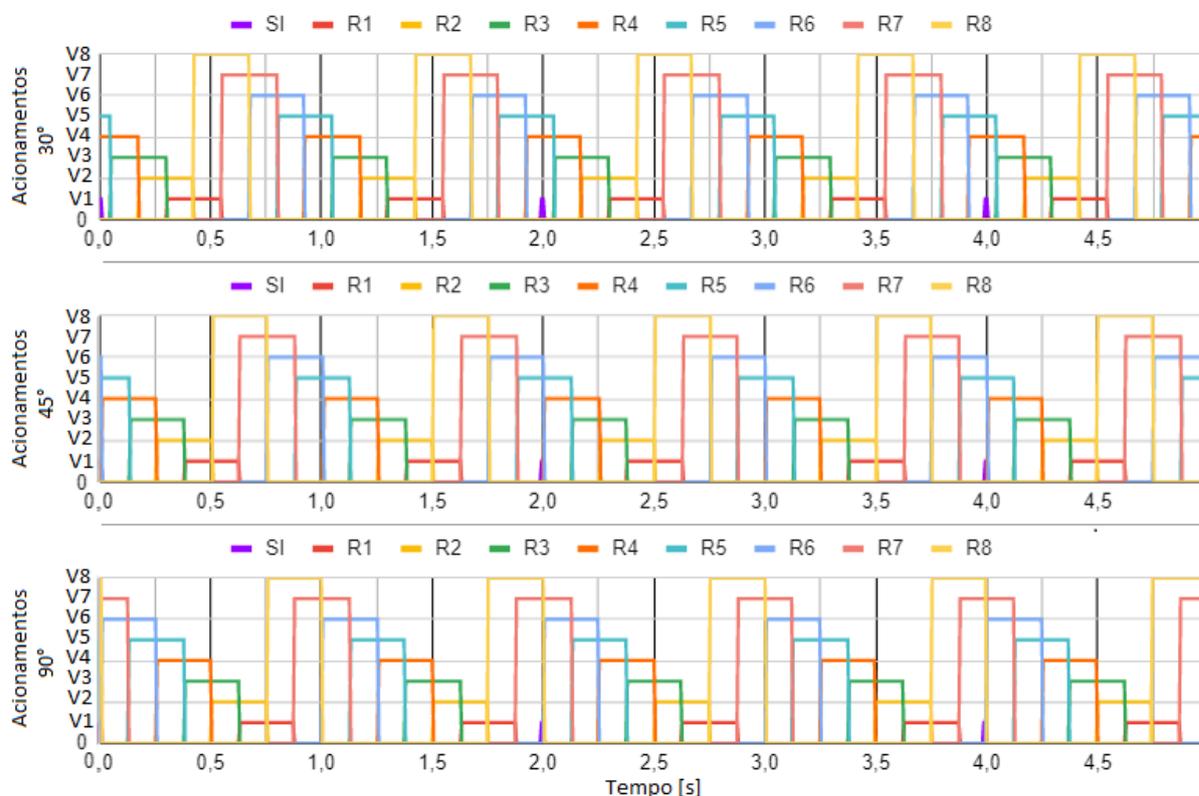
Fonte – Elaborado pelo autor.

tabela 11. Isso é devido ao centro de cada regenerador estar posicionado  $22,5^\circ$  entre si. Constatou-se, dessa forma, a operação da funcionalidade.

### 6.3.3 Análise dos resultados

Diante dos ensaios de correspondência entre campo magnético e acionamentos, ensaios da alteração da fração de escoamento e ensaios de deslocamentos de fase apresentados na seção 6.3.2 pode-se afirmar que a lógica de sincronização está funcionando conforme o planejado. Os sinais digitais enviados pelo *encoder* possibilitam o controle dos acionamentos apenas com a informação da posição do ímã. O deslocamento de fase permite um ajuste fino da centralização dos escoamentos com o campo magnético, seja manualmente, seja por meio de um controle realimentado. Para que a sincronização aconteça é necessário apenas o usuário configurar a fração de escoamento e selecionar o acionamento automático. Ademais, a operação do sistema demonstrou que a sincronização não sofre interferência com a utilização das funções da IHM (alteração de parâmetros, aquisições de dados e visualização de variáveis e medições).

Figura 35 – Ensaio da função de deslocamento de fase de 30°, 45° e 90°.



Fonte – Elaborado pelo autor.

O limite da fração de escoamento estipulado pelo sistema de sincronização é proveniente do atraso de desativação dos relés (sem considerar atrasos de escoamento provenientes da operação do circuito hidráulico). O FPGA do myRio opera com uma taxa de atualização de 5 MHz, que é suficiente para não ser um gargalo para a medição da posição do ímã. A posição do ímã é atualizada em uma frequência de 15,6 kHz em uma frequência de RMA de 1,5 Hz (10400 bordas em 0,667 s). O relé de estado sólido (que opera os acionamentos das eletroválvulas) aciona assim que acontece o comando de acionamento e leva no máximo 15 ms para desativar após o comando de desativação. Para que esse atraso seja compensado, é possível configurar os comandos de desativação 15 ms antes do momento desejado. No entanto, o tempo mínimo de abertura do relé (considerando uma abertura instantânea) é de 15 ms. Dessa forma, a menor fração de escoamento da URM imposta pelo sistema de controle é de 2,25% a 1,5 Hz de frequência de RMA. O que faz com que o sistema de sincronização não inclua mais um atraso no escoamento a 37% de fração de escoamento a 1,5 Hz de ciclo magnético.

Os atrasos de escoamento provenientes da operação do circuito hidráulico como um todo não são tão constantes e previsíveis quanto os atrasos provenientes da aná-

lise do sistema de controle desenvolvido. Apesar de se saber o atraso de escoamento causado pela eletroválvula da URM em algumas frequências de operação, conforme comentado na seção 3.2.2, não se sabe o atraso de escoamento do sistema como um todo em cada frequência de operação e fração de escoamento. Esses atrasos serão revelados apenas após os ensaios da operação hidráulica da URM, que até o momento da conclusão deste documento não haviam acontecido. O que se conhecem são os limites do sistema de controle desenvolvido até então e o atraso de escoamentos causados pela operação da eletroválvula em algumas frequências. Esse atraso proporcionado pela operação da eletroválvula provavelmente será um dos gargalos do sistema que limitará a fração de escoamento, já que sua grandeza está na casa das dezenas de milissegundos. O sistema de sincronização poderá antecipar a abertura e o fechamento dessas eletroválvulas, com limite de 15 ms entre ativação e desativação do relé.

#### 6.4 OUTROS COMANDOS

A avaliação da efetividade dos outros comandos enviados pela IHM pode ser feita por meio da comparação entre as informações inseridas na IHM e os valores observados na interface gráfica do módulo FPGA. Para facilitar a apresentação dos testes, as entradas inseridas na IHM e saídas esperadas na interface do FPGA são apresentadas na tabela 12. Os valores esperados na interface do FPGA são calculados conforme definem as equações de conversão apresentadas no quadro 6, da página 66.

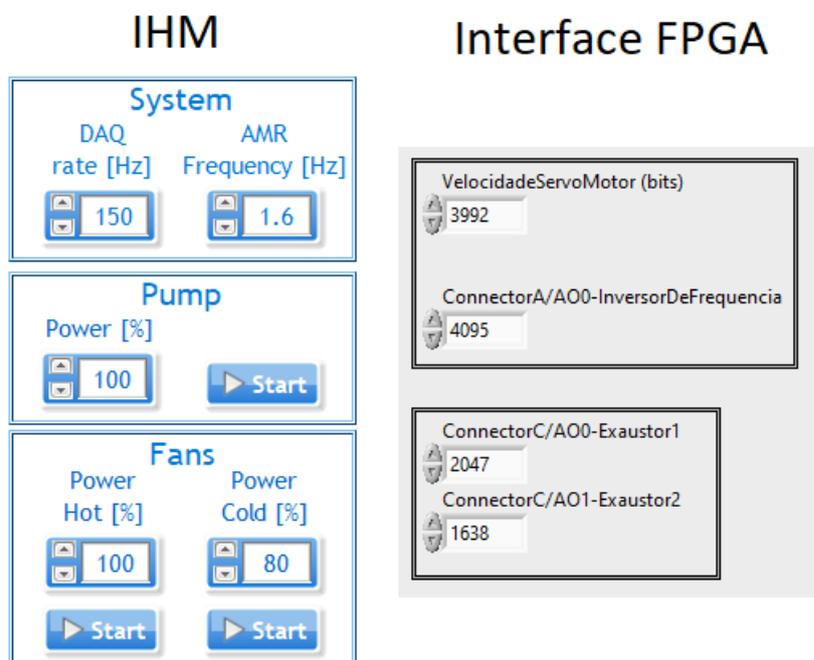
Tabela 12 – Valores inseridos na IHM e valores esperados na interface do FPGA.

Índice teste	Variável	Valor inserido na IHM ( $V_d$ )	Valor esperado no FPGA ( $V_b$ )
1	Rotação Ímã	1,6 Hz	4095
2	Rotação Ímã	1 Hz	2494
3	Potência Motobomba	100%	4095
4	Potência Motobomba	70%	2867
5	Potência Exaustor 1	100%	2047
6	Potência Exaustor 2	80%	1638
7	Potência Exaustor 1	80%	1638
8	Potência Exaustor 2	100%	2047

Fonte – Elaborado pelo autor.

Os resultados dos testes corresponderam ao esperado, conforme é apresentado na figura 36 e na figura 37. As imagens mostram à esquerda um recorte adaptado da IHM com os parâmetros inseridos e à direita um recorte da interface gráfica do FPGA. Em todos os casos, a interface do FPGA apresentou os parâmetros esperados, de acordo com os valores inseridos na IHM.

Figura 36 – Testes parâmetros ímpares.



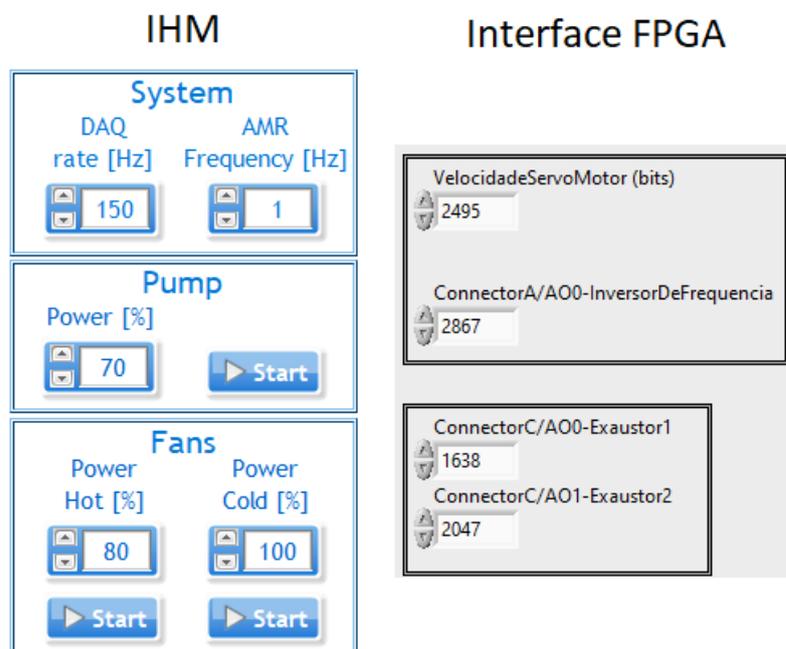
Fonte – Elaborado pelo autor.

O único desses parâmetros que pôde ter seus resultados avaliados de forma mais prática foi a rotação o ímã, conforme apresentado na seção 6.2. Não é possível fazer o mesmo tipo de verificação com a motobomba e com os exaustores pois até o momento as conexões hidráulicas da URM não estão finalizadas e não é possível posicionar os exaustores. A verificação do acionamento da motobomba poderá ser feita por meio da visualização dos dados de pressão ou escoamento. O sistema de aquisição possibilita a aquisição desses dados (a uma taxa de amostragem de 200 KHz). Os exaustores podem ser verificados por meio dos dados dos transdutores de potência, que também têm sua medição adquirida pelo sistema.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Todos os ensaios deste capítulo foram feitos utilizando o sistema de controle, supervisão e aquisição da URM, desde a inserção dos parâmetros de frequência de RMA e fração de escoamento até a aquisição dos dados apresentados. Essa experiência pôde confirmar o funcionamento do software desenvolvido, a sua facilidade de manutenção e incremento. Conforme esperado, em nenhum ponto da operação foi identificada lentidão, nem dessincronização entre os ciclos de acionamento e ciclo magnético ao utilizar os recursos visuais da IHM, salientando o funcionamento da arquitetura de software desenvolvida.

Figura 37 – Testes parâmetros pares.



Fonte – Elaborado pelo autor.

O sistema de sincronização hidráulica-magnética desenvolvido permite a identificação da posição relativa do ímã em relação aos RMAs com resolução mínima de  $0,0173^\circ$ , com atualização de até 15,6 kHz. A menor fração de escoamentos provenientes do sistema de sincronização é de 2,25% em uma frequência de ciclo de RMA de 1,5 Hz. Aliado a isso, está um sistema de controle flexível e incrementável e uma IHM que permite a alteração dos parâmetros de fração de escoamentos, frequência de RMA e vazão, além da visualização de sinais de campo magnético, sinais do encoder e sinais do acionamento das eletroválvulas. Tanto a IHM quanto os sistemas de aquisição e controle estão preparados para as demais medições da tabela 2 da página 41.

Este capítulo contemplou as partes do sistema de sincronização da URM que puderam ser avaliadas até o momento da redação deste documento. Outras partes do sistema dependiam ainda do andamento de outras frentes de trabalho para serem avaliadas. Dessa forma, as medições de pressão, vazão, torque, potência e temperatura não puderam ser incluídas nesta avaliação do sistema, nem o acionamento dos exaustores e da motobomba.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de sincronização hidráulica-magnética para uma unidade de refrigeração magnética do tipo ímã rotativo com 16 RMAs que emprega eletroválvulas. Esse sistema possibilita que a URM faça o ciclo termomagnético de refrigeração magnética em diferentes valores de fração de escoamento, frequência de RMA e vazão, garantindo a harmonia entre os sistemas hidráulico e magnético. Esse sistema também disponibiliza recursos como uma IHM e sistema de aquisição de dados, pois visa a operação de um aparato experimental.

O ponto de partida do desenvolvimento do sistema de sincronização foi o estudo dos sistemas hidráulico e magnético da URM, o qual resultou no levantamento dos requisitos operacionais. Esses requisitos foram separados em cinco categorias, correspondendo a requisitos para a lógica de sincronização, para o componente de controle, para o dispositivo de acionamento das eletroválvulas, para o sistema de aquisição e para a IHM.

Com o conhecimento dos requisitos operacionais da unidade de refrigeração magnética, foi possível definir as estratégias de identificação do ciclo magnético, o componente para o acionamento das eletroválvulas, a lógica de sincronização e os componentes de aquisição e controle. Como as eletroválvulas da URM são do tipo “abre e fecha”, foi definida uma estratégia de identificação do ciclo magnético baseada nos sinais de um encoder incremental, que é conectado diretamente no inversor que rotaciona o ímã. Um sensor indutivo é utilizado para medir o sinal de referência da posição do ímã, possibilitando o conhecimento da posição absoluta do ímã. A fim de conferir o resultado da sincronização hidráulica-magnética, tanto na IHM quanto no pós processamento dos dados de aquisição, são utilizados 8 sensores de efeito Hall posicionados entorno dos RMAs em posições conhecidas.

Para a definição do componente de acionamento das eletroválvulas, foram estudadas as características operacionais de três componentes de comportamento similar a uma chave eletrônica, sendo eles: o TRIAC, o relé mecânico e o relé de estado sólido. Esses três componentes foram aplicados experimentalmente na ativação das eletroválvulas da URM e constatou-se que o relé de estado sólido tem o menor tempo de atraso total, além de não emitir ruídos e ser de fácil substituição. Seu atraso máximo é de 16,67 ms na desativação e constatou-se experimentalmente que esse atraso pode ser evitado se a sua desativação coincidir com a passagem por zero da rede elétrica. Para acionar as eletroválvulas, foi construída uma PCI com 8 relés de estado sólido do modelo testado, os quais fazem o acionamento das eletroválvulas em pares.

A lógica de sincronização entre o sistema hidráulico e magnético desenvolvida se baseia na medição da posição do ímã por meio do encoder e na ativação dos 8 relés que acionam as eletroválvulas em pares. Devido ao caráter digital dos seus

sinais de entrada e saída, a lógica foi concebida visando uma implementação em técnicas de sistemas digitais. Ela foi desenvolvida como um comparador que possui como entradas os momentos de ativação e desativação de cada relé e a contagem de bordas de subida e descida proveniente do sinal enviado pelo encoder.

Para a definição do componente de controle, foram avaliadas as opções disponíveis no mercado que correspondiam ao tipo e ao número de portas eletrônicas para a medição dos sinais. Foram avaliadas a utilização de placas prontas do tipo Arduino e a utilização de placas com microcontroladores ESP32, no entanto optou-se pela utilização do dispositivo MyRio-1900, da empresa National Instruments, devido a sua arquitetura baseada em um núcleo de processamento comum *dual core* e um núcleo de processamento do tipo FPGA específico para o desenvolvimento de sistemas com técnicas digitais.

Para a definição do dispositivo de aquisição considerou-se a integração com o sistema de controle e a disponibilidade de um chassi de aquisição de dados no laboratório. Foram definidos módulos de aquisição em tensão, módulos de aquisição em corrente, módulos de entrada e saídas digitais e módulos para medição de termopares.

A arquitetura de software desenvolvida para integração dos sistemas é modular e expansível. Essa arquitetura foi definida em três grandes módulos que se comunicam entre si somente quando necessário. Um dos módulos é responsável pela IHM e é processado pelo processador do computador da URM. Outro módulo intermediário faz os cálculos das lógicas de sincronização e faz a comunicação entre os outros dois módulos, sendo processado pelo processador do componente myRio. O terceiro módulo é responsável pela execução das lógicas digitais de controle e é processado pelo FPGA do myRio.

Devido à dependência de outras frentes de trabalho, até a finalização deste documento não foi possível avaliar o comportamento dos escoamentos pelos RMAs. Para analisar os resultados deste trabalho, ensaios foram feitos para testar as funcionalidades do sistema. Foi constatado que a estratégia de sincronização realiza os acionamentos das eletroválvulas de acordo com o posicionamento do ímã em relação aos regeneradores e considera os parâmetros de frequência de RMA e fração de escoamento. Utilizando os recursos de supervisão e controle, os limites do sistema de sincronização foram verificados e foi constatado que o sistema possibilita o ajuste fino da fração de escoamento abaixo de 35,7% e possibilita ajustes de posição dos acionamentos em relação ao ciclo magnético com frequência de 15,6 kHz. Nessa etapa de análise também foram analisadas a facilidade de manutenção e a possibilidade de expansão do sistema com a implementação da funcionalidade do deslocamento de fase. Diante desses resultados, verifica-se que o sistema criado atende aos requisitos do sistema resumidos na tabela 5 da página 42.

O sistema desenvolvido possibilita que o laboratório POLO prossiga com os

estudos para a caracterização da URM e, posteriormente, para o desenvolvimento do produto final do refrigerador magnético. Por meio do sistema de sincronização hidráulica-magnética criado, os parâmetros de desempenho da URM podem ser avaliados para diferentes frequências de RMA e frações de escoamento pelos RMAs, utilizando os recursos de controle das variáveis do ciclo magnético, supervisão e aquisição das medições. Além disso, esse trabalho passa a ser uma opção de sistema de sincronização na literatura, agregando conhecimento em uma área pouco estudada.

Os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

- **avaliar lógica de sincronização hidráulica-magnética experimentalmente:** avaliar a lógica de sincronização desenvolvida do ponto de vista dos escoamentos pelos regeneradores;
- **aprimorar o controle com função para centralização de escoamentos:** desenvolver um algoritmo para centralização dos escoamentos pelos RMAs com os períodos de alta e baixa incidência do ciclo magnético. Esse controle teria o sinal de vazão pelos RMAs como variável observada e a fase do ciclo de acionamentos de eletroválvulas como variável manipulada. A variável para controlar o deslocamento da fase já está prevista no sistema de sincronização desenvolvido neste trabalho;
- **avaliar estratégias de controle de temperatura:** avaliar estratégias para o controle de temperatura abaixo da temperatura ambiente. O sistema desenvolvido neste trabalho possibilita a atuação nos parâmetros do ciclo de RMA (frequência de RMA, fração de escoamento e vazão pelos RMAs) que podem ser usadas como variáveis manipuladas para o controle da temperatura ambiente;
- **avaliar técnicas de sincronização visando a aplicação em refrigeradores magnéticos comerciais:** avaliar técnicas de sincronização alternativas visando sistemas de sincronização embarcados para refrigeradores magnéticos comerciais, como por exemplo a construção de placas de circuitos específicos para a sincronização. Os sensores de efeito Hall e o sensor indutivo poderiam ser utilizados como entradas desse sistema hipotético. Uma outra alternativa seria o desenvolvimento de circuitos digitais no FPGA do componente de controle, para avaliação de sistemas de sincronização embarcados digitais.

## 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. ISSN 0140-7007.
- Arduino. *List of Arduino Products*. Italy, 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Products>>.
- BANSAL, P.; VINEYARD, E.; ABDELAZIZ, O. Status of not-in-kind refrigeration technologies for household space conditioning, water heating and food refrigeration. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 1, n. 1, p. 85–101, 2012. ISSN 2212-6090.
- BROWN, S.; DOMANSKI, P. Review of alternative cooling technologies. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, n. 64, 2013-12-18 2013.
- CARDOSO, P. O. *Um sistema à base de eletroválvulas para o gerenciamento hidráulico de regeneradores magnético-ativos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- ENGELBRECHT, K.; ERIKSEN, D.; BAHL, C.; BJORK, R.; GEYTI, J.; LOZANO, J.; NIELSEN, K.; SAXILD, F.; SMITH, A.; PRYDS, N. Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator. *International Journal of Refrigeration*, v. 35, n. 6, p. 1498–1505, 2012. ISSN 0140-7007.
- ERIKSEN, D.; ENGELBRECHT, K.; BAHL, C.; BJORK, R.; NIELSEN, K.; INSINGA, A.; PRYDS, N. Design and experimental tests of a rotary active magnetic regenerator prototype. *International Journal of Refrigeration*, v. 58, p. 14–21, 2015. ISSN 0140-7007.
- FORTKAMP, F.; ERIKSEN, D.; ENGELBRECHT, K.; BAHL, C.; LOZANO, J.; BARBOSA, J. Experimental investigation of different fluid flow profiles in a rotary multi-bed active magnetic regenerator device. *International Journal of Refrigeration*, v. 91, p. 46–54, 2018. ISSN 0140-7007.
- FORTKAMP, F. P.; LANG, G. B.; LOZANO, J. A.; BARBOSA, J. Design trade-offs for an active magnetic regenerator device. *Applied Thermal Engineering*, v. 165, p. 114467, 2020. ISSN 1359-4311.
- GÓMEZ, J. R.; GARCIA, R. F.; CARRIL, J. C.; GÓMEZ, M. R. Experimental analysis of a reciprocating magnetic refrigeration prototype. *International Journal of Refrigeration*, v. 36, n. 4, p. 1388–1398, 2013. ISSN 0140-7007.
- HIRANO, N.; NAGAYA, S.; OKAMURA, T.; KAWANAMI, T.; WADA, H. Development of room temperature magnetic refrigerator. In: *Proceedings in 4th international conference on magnetic refrigeration at room temperature*, n. 1, 2010.
- HOFFMANN, G. *Sistema de acionamento de eletroválvulas para aplicações em refrigeração magnética*. 2017. Projeto de fim de Curso (Graduação) — Universidade Federal de Santa Catarina.

HOFFMANN, G. *Desenvolvimento e avaliação experimental de estratégias de controle para sistemas de refrigeração magnética*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

HUANG, B.; LAI, J.; ZENG, D.; ZHENG, Z.; HARRISON, B.; OORT, A.; van Dijk, N.; BRÜCK, E. Development of an experimental rotary magnetic refrigerator prototype. *International Journal of Refrigeration*, v. 104, p. 42–50, 2019. ISSN 0140-7007.

JACOBS, S.; AURINGER, J.; BOEDER, A.; CHELL, J.; KOMOROWSKI, 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. ISSN 0140-7007. New Developments in Magnetic Refrigeration.

KITANOVSKI, A.; PLAZNIK, U.; TOMC, U.; POREDOŠ, A. Present and future caloric refrigeration and heat-pump technologies. *International Journal of Refrigeration*, v. 57, n. Supplement C, p. 288 – 298, 2015. ISSN 0140-7007.

LOZANO, J. A. *Designing a rotary magnetic refrigerator*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

NAKASHIMA, A. T.; FORTKAMP, F. P.; Sá, N. M. de; SANTOS, V. M. dos; HOFFMANN, G.; PEIXER, G. F.; DUTRA, S. L.; RIBEIRO, M. C.; LOZANO, J. A.; BARBOSA, J. R. A magnetic wine cooler prototype. *International Journal of Refrigeration*, v. 122, p. 110–121, 2021. ISSN 0140-7007.

National Instruments. *NI LabVIEW for CompactRIO Developer's Guide: Recommended labview architectures and development practices for control and monitoring applications*. Austin, 2014. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/products/us/fullcriodevguide.pdf>>.

NIELSEN, K. K.; BAHL, C. R. H.; SMITH, A. *Constraints on the adiabatic temperature change in magnetocaloric materials*. 81. ed. [S.l.], 2010. Physical Review B.

POSSAMAI, F. C.; TODESCAT, M. L. *A review of household compressor energy performance*. 2004. In: International Compressor Engineering Conference.

QIAN, S.; NASUTA, D.; RHOADS, A.; WANG, Y.; GENG, Y.; HWANG, Y.; RADERMACHER, R.; TAKEUCHI, I. Not-in-kind cooling technologies: A quantitative comparison of refrigerants and system performance. *International Journal of Refrigeration*, v. 62, p. 177–192, 2016. ISSN 0140-7007.

ROWE, A.; TURA, A.; DIKEOS, J. *Experimental studies of a near room temperature magnetic refrigeration*. Montreux, SWI: [s.n.], 2005. In: Proceedings 1st International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature.

SANTOS, D. d. *Sistema de gerenciamento hidráulico para uma unidade de refrigeração magnética*. 2020. 121 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

TEYBER, R.; TREVIZOLI, P. V.; 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, n. 1, p. 38–46, 2017.

TREVIZOLI, P. V. *Development of thermal regenerators for magnetic cooling applications*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

TURA, A.; ROWE, A. Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization. *International Journal of Refrigeration*, v. 34, n. 3, p. 628–639, 2011. ISSN 0140-7007.

UNFCCC. *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount*. Bonn, Germany: [s.n.], 2018.

ZHENG, Z.; YU, H.; ZHONG, X.; ZENG, D.; LIU, Z. Design and performance study of the active magnetic refrigerator for room-temperature application. *International Journal of Refrigeration*, v. 32, p. 78–86, 01 2009.