

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

**Wesley André Bortolozo Junior**

**Projeto e Implementação de uma Bancada de  
Certificação de Bebedouros tipo Pressão**

Florianópolis  
2017

**Wesley André Bortolozo Junior**

**Projeto e Implementação de uma Bancada de  
Certificação de Bebedouros tipo Pressão**

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

Orientador(a): Prof. Hector Bessa Silveira

Florianópolis  
2017

**Acadêmico: Wesley André Bortolozo Junior**

## **Projeto e Implementação de uma Bancada de Certificação de Bebedouros tipo Pressão**

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

Florianópolis, 10 de fevereiro de 2018.

### **Banca Examinadora:**

Marco Aurélio Schmitz  
Orientador na Empresa  
Embraco

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

Prof. Ahryman Nascimento  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Bruno Fontana  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina

Angelo Frigeri Araujo  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

O presente trabalho trata do projeto e implementação de uma bancada de certificação da Capacidade de Refrigeração de bebedouros do tipo pressão para o Laboratório de Aplicação, atendendo à norma NBR 16236. A bancada desenvolvida incorpora controladores de temperatura e pressão da água que supre a entrada dos bebedouros e conta também com a automação de todos os passos envolvidos ao longo dos ensaios pela implementação de um sistema a eventos discretos.

Este trabalho foi inteiramente desenvolvido no Laboratório de Aplicação – Whirlpool S.A. – Unidade Embraco de Compressores e Soluções em Refrigeração. O Laboratório Aplicação é responsável por testar produtos diversos de seus clientes, como geladeiras, freezers, bebedouros, ilhas de refrigeração, entre outros. Com o objetivo de Aprimorar a qualidade, eficiência e confiabilidade dos testes de bebedouros, o Laboratório de Aplicação se interessou pelo desenvolvimento de um método prático e sistemático de ensaio para determinar a Capacidade de Refrigeração de bebedouros por pressão.

Grosseiramente falando, quanto maior a Capacidade de Refrigeração de um bebedouro, maior é o volume de água que ele consegue refrigerar dentro de um certo intervalo de tempo. Tal parâmetro é exibido no selo de desempenho do produto final. A definição precisa da Capacidade de Refrigeração de um bebedouro e os ensaios para sua determinação são regulamentados pela norma NBR 16232.

O software da bancada foi inteiramente desenvolvido em plataforma LabVIEW, a qual possibilita uma fácil integração com dispositivos de instrumentação e controle, além de ser apropriado para desenvolver interfaces gráficas de maneira rápida e amigável para o usuário.

**Palavras-chave:** Automação de Ensaios. Controle. Sistemas a eventos discretos. Bebedouros. Instrumentação. LabVIEW.

## ABSTRACT

The present work deals with the design and implementation of a bench of certification of the Cooling Capacity of pressure-type drinkers for the Application Laboratory, according to the norm NBR 16236. The developed bench incorporates controllers of temperature and water pressure that supplies the entrance of the drinkers and also has the automation of all the steps involved throughout the trials by the implementation of a discrete events systems.

This work was entirely developed in the Application Laboratory - Whirlpool S.A. - Embraco Unit of Compressors and Refrigeration Solutions. The Application Laboratory is responsible for testing various products of its customers, such as refrigerators, freezers, drinking fountains, cooling islands, among others. In order to improve the quality, efficiency and reliability of drinking trough tests, the Application Laboratory was interested in the development of a practical and systematic test method to determine the Cooling Capacity of drinking troughs.

Grossly speaking, the higher the Cooling Capacity of a water cooler, the greater the volume of water it can cool within a certain time interval. This parameter is displayed on the final product performance label. The precise definition of the Cooling Capacity of a drinking fountain and the tests for its determination are regulated by the standard NBR 16232.

The bench software was fully developed in the LabVIEW platform, which enables easy integration with measurement and control devices, and is suitable for quickly and friendly developing graphical user interfaces.

**Key-words:** Automation of Tests. Control. Discrete event systems. Drinking fountains. Instrumentation. LabVIEW.

## Sumário

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	8
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Motivação.....	11
1.2 Breve Descrição do Problema.....	12
1.3 Objetivos .....	12
1.4 Técnicas e Métodos Utilizados.....	13
1.5 Organização do Documento.....	14
2 DESCRIÇÃO DO PROBLMA E SOLUÇÃO PROPOSTA.....	15
2.1 Escopo da norma .....	15
2.2 Termos e definições.....	16
2.2.1 Aparelho tipo gravidade.....	16
2.2.2 Aparelho por pressão .....	16
2.2.3 Capacidade de refrigeração .....	16
2.2.4 Consumo de energia para a capacidade de refrigeração .....	16
2.2.5 Consumo de energia para a manutenção da temperatura .....	16
2.2.6 Eficiência energética .....	16
2.2.7 Tempo de inicialização do aparelho .....	16
2.2.8 Ciclo de retirada de água.....	17
2.3 Requisitos gerais de ensaio .....	17
2.3.1 Medição de pressão .....	17
2.4 Métodos de Ensaio .....	18
2.4.1 Procedimentos.....	18
2.5 Interpretações da Norma e Proposta de Solução .....	21
3 PROJETO DOS CONTROLADORES E DA MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS .....	25
3.1 Modelagem Incremental e Projeto de Controladores PI.....	25

3.2 Malha de Controle de Pressão .....	26
3.2.1 Modelagem de $G2s$ - $PV02$ em relação a $u2t$ .....	28
3.2.2 Projeto do Controlador $C2s$ para $G2s$ .....	31
3.2.3 Validação de $C2s$ – O sistema de Controle na Prática.....	38
3.3 Malha de Controle de Temperatura.....	38
3.3.1 Modelagem Dinâmica da Temperatura Interna do Tanque.....	40
3.3.2 Projeto do Controlador $C1s$ para o modelo $G1s$ .....	43
3.3.3 Simulações para validação do sistema de controle de $H1s$ em plataforma MATLAB e Simulink:.....	46
3.4 Automação do Ensaio - Um sistema orientado a eventos discretos:..	48
3.4.1 O que é uma Máquina de Estados Finitos? .....	48
3.4.2 Diagrama de Transição de Estados – O Grafo orientado da Máquina de estados. ....	51
3.4.3 Descrição dos Estados da FSM:.....	53
3.4.4 Tabelas de transição de Estados:.....	59
3.4.5 Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado:.....	63
3.5 Desenvolvimento do Software em plataforma LabVIEW .....	64
3.5.1 Display do Software .....	64
3.5.2 Fluxo de Dados do Software.....	66
4 HARDWARES UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO E CONTROLE .....	70
4.1 Um Chassi CompactDAQ USB de 8 Slots.....	70
4.1.1 Sistemas CompactDAQ .....	70
4.1.2 Chassis e controladores CompactDAQ.....	71
4.2 Dois Módulos NI 9219 - Universal Analog Input .....	71
4.3 Um módulo NI 9472 – Digital Outputs .....	72
4.4 Um módulo NI 9263 – Analog Outputs .....	73

5 COMPONENTES UTILIZADOS NA BANCADA E DIAGRAMAS DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS .....	75
5.1 Dispositivos de Segurança.....	75
5.1.1 Contactor Siemens 3TF30.....	75
5.1.2 Termostato Mecânico de Temperatura – Thermic.....	77
5.2 Atuadores e Dispositivos eletrônicos de acionamento .....	79
5.2.1 Acoplador a Relé RS30 .....	79
5.2.2 Relé de Estado Sólido Opto 22 Modelo 5126 – Componente utilizado para regular a potência da Carga Resistiva .....	81
5.2.3 Válvula Proporcional Eletrônica Bürkert .....	85
5.2.4 Válvula Solenoide Danfoss EVR3 – Duas Vias .....	86
5.2.4 Válvula Solenoide Parker Série 30 – Três Vias .....	90
5.2.5 Bomba Hidráulica 12V DC Sem Escovas .....	91
5.3 Transdutores e Instrumentos de Medição .....	93
5.3.1 Termopares tipo “T” – Omega Engineering .....	93
5.3.2 Sensor de Proximidade Capacitivo - Omron E2K-X4ME1 .....	94
5.3.3 Transmissores de Pressão Velki PAAHPX.....	96
5.4 Diagramas de Acionamentos Elétricos .....	97
5.4.1 Diagrama Elétrico Geral: Acionamentos e Sinais de Controle.....	97
5.4.2 Diagrama lógico de Acionamentos – Atuadores ON/OFF .....	98
5.4.3 Diagrama lógico de Acionamentos – Atuadores Analógicos .....	98
6 BANCADA IMPLEMENTADA E RESULTADOS OBTIDOS .....	100
6.1 Fotos da bancada .....	100
6.2 Resultados obtidos de Ensaios .....	113
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
REFERÊNCIAS .....	120



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- \**BCB* – Bancada de Certificação de Bebedouros.
- \**UFSC* – Universidade Federal de Santa Catarina.
- \**FSM* – Finite State Machine.
- \**TC* – Thermocouple (termopar).
- \**PI* – Pressure Indicator (indicador de pressão).
- \**PT* – Pressure Transmitter (transmissor de pressão).
- \**LI* – Level Indicator (indicador de nível).
- \**LI* – Level Transmitter (transmissor de nível).
- \**SSR* – Solid State Relay (relé de estado sólido).
- \**SV<sub>01</sub>* – Solenoid Valve 01 (válvula solenoide 01).
- \**SV<sub>02</sub>* – Solenoid Valve 02 (válvula solenoide 02).
- \**SV<sub>03</sub>* – Solenoid Valve 03 (válvula solenoide 03).
- \**Prop.V.* – Proportional Valve (válvula proporcional). Esta é a válvula de controle.
- \**S01* – Sistema 01, o tanque de tratamento de água.
- \**S02* – Sistema 02, o bebedouro a ser certificado.
- \**u<sub>1</sub>(t)* – Sinal de controle número 01, utilizado na malha de controle temperatura. Este sinal está normalizado na faixa de 0 – 100%.
- \**u<sub>2</sub>(t)* – Sinal de controle número 02, utilizado na malha de controle pressão. Este sinal está normalizado numa faixa de 0 – 100%.
- \**PV<sub>01</sub>* – Process Variable 01, que é a variável de processo número 01, a temperatura na saída do tanque (S01).
- \**ΔPV<sub>01</sub>* – É a variação da variável de processo número 01 durante um ensaio em malha aberta para levantamento do modelo do processo.
- \**PV<sub>02</sub>* – Process Variable 02, que é a variável de processo número 02, a pressão na entrada do bebedouro (S02).
- \**ΔPV<sub>02</sub>* – É a variação da variável de processo número 01 durante um ensaio em malha aberta para levantamento do modelo do processo.
- \**Δu<sub>1</sub>(t)* – É a variação da variável manipulada número 01 durante um ensaio em malha aberta para levantamento do modelo do processo.

\* $\Delta u_2(t)$  – É a variação da variável manipulada número 02 durante um ensaio em malha aberta para levantamento do modelo do processo.

\* $G_2(0)$  – Ganho estático do modelo de primeira ordem levantado de  $PV_{02}$  em relação à variável manipulada  $MV_{02}$  na Seção 3.2.1. Por definição,  $G_2(0) = \frac{\Delta PV_{02}}{\Delta u_2}$ .

\*  $t_{5\%M.A.}$  = Tempo decorrido, imediatamente após incrementado o valor da variável manipulada, para que a variável de processo atinja 95% do seu valor em regime permanente em malha aberta.

\*  $t_{5\%M.F.}$  = Tempo decorrido, imediatamente após incrementado o valor do Set Point, para que a variável de processo atinja 95% do seu valor em regime permanente em malha fechada.

\*  $t_0$  = Tempo em que houve o incremento/decremento de controle.

\*  $t_f$  = Tempo de acomodação, que é o tempo necessário para que a variável de processo alcance uma faixa em torno do seu valor em regime permanente, para sistemas com dinâmica estável.

\*  $L$  = Atraso do sistema em questão, em segundos.

\*  $T_s$  = Período de atualização do loop de controle, em segundos.

\*  $\tau_2$  – Constante de tempo de  $G_2(s)$  na Seção 3.2.1.

\*  $PdMF_1(s)$  – Polinômio desejado em malha fechada usado no projeto de  $C_1(s)$  na Seção 3.3.2.

\*  $PdMF_2(s)$  – Polinômio desejado em malha fechada usado no projeto de  $C_2(s)$  na Seção 3.2.2.

\*  $T_0$  – Temperatura no ponto de linearização para levantar um modelo incremental na Seção 3.3.1.

\*  $U_0$  – Sinal de controle no ponto de linearização para levantar um modelo incremental na Seção 3.3.1.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração são tecnologias desenvolvidas e aplicadas com o objetivo de reduzir a temperatura interna de um determinado produto em relação à temperatura ambiente. Podem-se encontrar sistemas de refrigeração integrados tanto ao maquinário industrial quanto a produtos domésticos, abrangendo uma imensa gama de aplicações fundamentais para manutenção da sociedade contemporânea. Dentre as principais aplicações às quais os sistemas de refrigeração atuam, podemos citar a climatização de ambientes, conservação de alimentos e controle de processos.

Durante a etapa de desenvolvimento destes sistemas de refrigeração, os fabricantes precisam determinar parâmetros de desempenho além de verificar se o produto atende às normas técnicas que regulamentam a comercialização destes produtos, que é a etapa de certificação. Segundo a própria Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *“certificação é um processo no qual uma entidade independente (3ª parte) avalia se determinado produto atende às normas técnicas. Esta avaliação se baseia em auditorias no processo produtivo, na coleta e em ensaios de amostras. O resultado satisfatório destas atividades leva à concessão da certificação e ao direito ao uso da Marca de Conformidade ABNT em seus produtos”*.

No âmbito da certificação, o Laboratório de Aplicação da Embraco atua como a entidade independente que se baseia em normas técnicas para realizar a certificação de diversos tipos de refrigeradores advindos de empresas parceiras, e esta etapa de certificação é crucial importância na cadeia de desenvolvimento do produto, pois a etapa da certificação não só verifica de maneira sistemática e confiável se um determinado produto está apto a ser comercializado, como também define diretrizes de ensaio utilizadas para extrair parâmetros de desempenho do produto, e estes parâmetros de desempenho são usados na etapa de desenvolvimento de produto. A seguir mostra-se um diagrama que representa este compromisso entre as etapas certificação, desenvolvimento de produto e produção, que estão correlacionadas:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

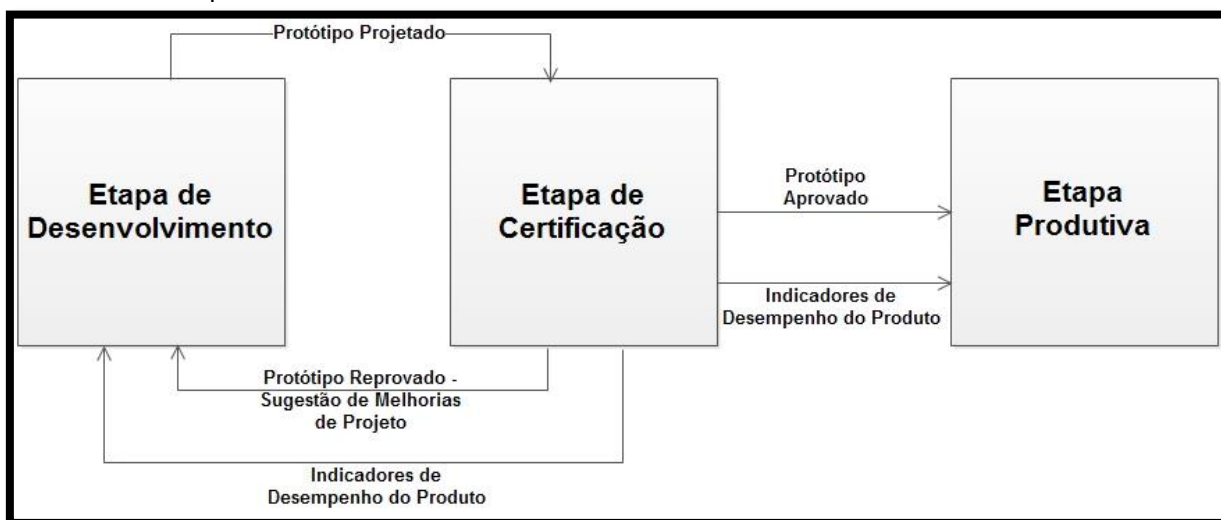


Figura 1- Etapas de Desenvolvimento, Certificação e Produção de um produto.

Devido à importância da realização da certificação de produtos de refrigeração, e a consequente determinação de parâmetros de desempenho, o Laboratório de Aplicação da Embraco detém e desenvolve tecnologias de ensaios utilizados para realizar a certificação de produtos e a determinação de parâmetros como capacidade de refrigeração, eficiência energética, e dentre outros, nos mais variados sistemas de refrigeração que são comercializados no mercado, como geladeiras, ilhas de refrigeração e bebedouros. Desta forma através do Laboratório de Aplicação a Embraco mantém parceria com diversas empresas atuantes no setor de refrigeração, executando tanto trabalhos de desenvolvimento de produto quanto de certificação de qualidade de produtos já existentes.

### 1.1 Motivação

Olhando para as necessidades do mercado de refrigeração, a Embraco notou uma crescente demanda de bebedouros e purificadores residenciais nos últimos anos dentro do mercado brasileiro, e com o objetivo de se manter atualizada em relação aos procedimentos de certificação que são aplicados no mercado, modificações normativas ocorreram no ano de 2013 em relação a certificação de bebedouros, o que motivou a Embraco a se adequar a estas novas normas.

Para identificar parâmetros de desempenho de bebedouros até então, o time do Laboratório de Aplicação da Embraco se guiava pela norma internacional (**ARI 1010 / ASHRAE 18**), O ARI (American Refrigeration Institute) é um instituto

americano que define os padrões de ensaio de desempenho para bebedouros, enquanto ASHRAE é a sigla criada em 1959 para a união de duas sociedades até então distintas, a American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHAE) e a The American Society of Refrigerating (ASRE), a qual tem por objetivo alavancar as ciências de aquecimento, ventilação, ar condicionado e refrigeração para servir a humanidade e promover um mundo sustentável. Mas a partir de dezembro de 2013, foi lançada a norma **ABNT NBR 16236 – Aparelho de fornecimento de água para consumo com refrigeração incorporada – Requisitos de desempenho**, sendo esta uma norma mais atual e criteriosa para regulamentar os padrões de ensaio para determinação de parâmetros de desempenho de bebedouros, especificamente para os produtos comercializados no Brasil.

Como uma nova norma entraria em vigor para determinar parâmetros de desempenho de bebedouros, novos requisitos de ensaio são demandados por esta nova norma, tendo assim motivação para que o Laboratório de Aplicação desenvolva uma nova tecnologia de ensaio que se alinhe com as diretrizes da norma NBR 16236.

## 1.2 Breve Descrição do Problema

Com a intenção de seguir a norma NBR 16236 como nova referência de certificação de bebedouros, o time do Laboratório de Aplicação decidiu que seria necessário desenvolver uma nova tecnologia de ensaio que atendessem aos requisitos citados nesta norma.

Todos os tópicos da norma NBR 16236 que são relevantes para o presente trabalho serão apresentados no Capítulo 2, pois é desta norma que será identificado o corpo do problema a ser resolvido neste trabalho, será a partir dos requisitos de ensaio da norma que extrairemos uma possível solução para desenvolver uma tecnologia de ensaio.

## 1.3 Objetivos

De maneira sucinta, a norma NBR 16236 prevê a possibilidade de extrair três parâmetros a partir dos procedimentos de ensaio listados no seu conteúdo, que são Capacidade de Refrigeração, Eficiência Energética e Consumo de Energia. Estes

três parâmetros são extraídos ao realizar o ensaio de Capacidade de Refrigeração, e para tal, a norma exige três principais requisitos:

- A norma exige que seja controlada a **temperatura da água que entra no bebedouro** durante os ensaios, portanto esta é uma variável a ser controlada.
- Outra exigência da norma é o controle da **pressão de suprimento da água que entra no bebedouro** durante os ensaios, portanto esta é outra variável a ser controlada.
- Ainda nos requisitos de ensaio da norma, existem passos de preparação e execução a serem seguidos durante o ensaio de Capacidade de Refrigeração, e estes procedimentos não necessariamente precisam ser feitos de forma automatizada, pois no passado procedimentos deste tipo eram manualmente realizados, mas é desejável que estes passos sejam automatizados de alguma forma pela tecnologia a ser incorporada.

#### 1.4 Técnicas e Métodos Utilizados

Para controlar tanto a variável de temperatura quanto a de pressão da água que supre o bebedouro durante o ensaio de Capacidade de Refrigeração, utilizaremos a teoria de controle realimentado, pois trataremos tanto o sistema de controle de temperatura quanto o de pressão como dois sistemas SISO (Single Input Single Output), lineares contínuos e invariantes no tempo. E para tanto, no Capítulo 3 da monografia proporemos dois controladores P.I. (Proporcional e Integral) como solução de controle.

Já ao que tange a automatização dos procedimentos de preparação e execução do ensaio de Capacidade de Refrigeração previsto na norma, proporemos uma Máquina de Estados Finitos que comandará os atuadores lógicos da bancada. A Máquina de Estados também será exposta no Capítulo 3 da monografia.

É importante também citar o desenvolvimento do software por trás desta tecnologia, pois tanto a parte de aquisição, controle e comando de sistemas discretos foi implementada em linguagem LabVIEW, pois inteligência da bancada em última análise advém do software se comunicando com os componentes físicos da bancada.

## 1.5 Organização do Documento

Esta monografia está dividida da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a descrição da norma NBR 16236 e dela como se extrai o problema tratado no presente trabalho, e solução proposta para este problema.

No Capítulo 3 apresenta-se o projeto dos controladores em malha-fechada para uma variável de temperatura e outra de pressão, além do desenvolvimento de uma Máquina de Estados Finitos que é projetada para automatizar uma série de passos que devem ser realizados ciclicamente ao longo do ensaio de capacidade de refrigeração. Ainda no capítulo 3 descreve-se brevemente o desenvolvimento do software em plataforma LabVIEW, que implementa de forma integrada o módulo e aquisição dos sinais, controle e comando do sistema a eventos discretos.

No Capítulo 4 apresentam-se os hardwares usados para aquisição e controle da tecnologia desenvolvida.

No Capítulo 5 apresentam-se os componentes utilizados na bancada e diagramas de acionamentos elétricos.

No Capítulo 6 apresenta-se a banca implementada e resultados, com algumas fotos da bancada real e alguns gráficos de relatórios reais encaminhados à clientes, não explicitando informações sigilosas.

No Capítulo 7 apresentam-se as considerações finais, possíveis melhorias e problemas enfrentados.

## 2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo, traremos o desenvolvimento efetivo do projeto, no que tange às ideias e as metodologias formais propostas para construir a bancada de certificação de bebedouros.

Este capítulo está organizado da seguinte forma:

O tópico **2.1 Escopo da norma** explica para quais produtos e quais os objetos que a NBR 16236 se aplica.

O tópico **2.2 Termos e definições** lista uma série de definições que são adotadas pela norma para construir suas próprias regras, as quais devem ser seguidas nos procedimentos de certificação.

O tópico **2.3 Requisitos gerais de ensaio** menciona como deve ser tratada a variável de pressão de suprimento de água ao longo do ensaio de Capacidade de Refrigeração.

O tópico **2.4 Métodos de ensaio** especifica quais são as condições de temperatura tanto do ambiente de ensaio, quanto da água de suprimento para o bebedouro a ser certificado. Neste tópico existe uma tabela que relaciona os tipos de bebedouros, tipos de ensaios e condições de temperatura tanto de ambiente quanto água de suprimento.

O tópico **2.5 Interpretação da Norma e Proposta de Solução** faz um resumo de quais foram os parâmetros de projeto extraídos da norma a serem incorporados na tecnologia a ser desenvolvida, e propõe uma possível solução com um diagrama de processos representando como será a bancada na sua forma final.

Para que se entenda e se extraia quais são os objetivos de projeto a serem desenvolvidos neste trabalho, primeiramente é necessário que se conheça em detalhes os pontos importantes da norma NBR 16236, norma que regulamenta quais são os requisitos de ensaio a serem respeitados para determinação de parâmetros de desempenho de bebedouros. Dito isto, segue o detalhamento da norma:

### 2.1 Escopo da norma

Esta Norma se aplica a todo aparelho de fornecimento de água para consumo humano com refrigeração incorporada, para uso em ambiente interno e/ou externo, acessível pelo consumidor no local de consumo. Descreve o método e requisitos de



ensaio para a determinação da capacidade de refrigeração, eficiência energética e consumo de energia.

Os Objetivos desta Norma são:

- Estabelecer os tipos de aparelhos para os quais se aplica esta Norma;
- Especificar os métodos de ensaios a serem utilizados;
- Especificar o método para o cálculo de resultados.

## **2.2 Termos e definições**

### **2.2.1 Aparelho tipo gravidade**

Aparelho que utiliza um garrafão ou compartimento para o armazenamento de água a ser resfriada e não ligada à rede hidráulica.

### **2.2.2 Aparelho por pressão**

Aparelho conectado à rede hidráulica, que possui ou não um compartimento para armazenamento de água a ser resfriada.

### **2.2.3 Capacidade de refrigeração**

Quantidade de água refrigerada pelo aparelho, expressa em litros por hora, conforme o ensaio.

### **2.2.4 Consumo de energia para a capacidade de refrigeração**

Quantidade de energia elétrica consumida para se obter a capacidade de refrigeração, expressa em quilowatt hora, conforme o ensaio.

### **2.2.5 Consumo de energia para a manutenção da temperatura**

Quantidade de energia elétrica consumida pelo aparelho para a manutenção da temperatura da água expressa em quilowatt hora por mês, conforme o ensaio.

### **2.2.6 Eficiência energética**

Razão entre o consumo de energia e a capacidade de refrigeração do aparelho, expressa em quilowatt por litro, conforme o ensaio.

### **2.2.7 Tempo de inicialização do aparelho**

Tempo, declarado pelo fabricante no manual de instruções, para o aparelho iniciar o fornecimento de água gelada, expresso em minutos.

### 2.2.8 Ciclo de retirada de água

Período compreendido entre o início de duas retiradas de água consecutivas, declarado pelo fabricante.

## 2.3 Requisitos gerais de ensaio

### 2.3.1 Medição de pressão

Durante o ensaio, a pressão de fornecimento de água deve ser constante obrigatoriamente e igual a  $100kPa$ , com tolerância de  $\pm 5\%$ , quando aplicável.

**Observação:** na Seção [2.3.1](#) como não foi especificado na norma se a pressão em questão é Absoluta ou Manométrica (Relativa). Se levarmos em consideração que  $100kPa$  absoluto equivale a  $1atm$ , não faz sentido prático o controle da pressão de suprimento a  $1atm$  absoluto, pois essa é a própria pressão atmosférica, e assim não haveria fluxo de água algum entre a entrada e a saída do bebedouro neste caso. A outra opção que faz sentido físico é de que esta especificação de pressão seja de  $100kPa$  Relativo, ou seja,  $100kPa$  em relação à pressão atmosférica, o que conferiria  $2atm$  absoluto de pressão de suprimento ao sistema, e esta é a interpretação que utilizaremos neste trabalho.

## 2.4 Métodos de Ensaio

### 2.4.1 Procedimentos

Fonte: Figura adaptada da norma NBR 16236.

Tipo de ensaio	Tipo de aparelho	Temperatura °C		
		Ambiente	Água de entrada	Água gelada
Capacidade de Refrigeração	Gravidade	32,0	32,0	10,0
	Pressão		27,0	
Manutenção da Temperatura	Gravidade	25,0	25,0	-
	Pressão			-

Figura 02- Requisitos de temperatura necessários para realizar os testes Capacidade de Refrigeração e Manutenção da Temperatura. Figura retirada da NBR 16236.

Em suma, extrai-se da Tabela 1 que, para realizar a certificação dos bebedouros tanto tipo Pressão quanto tipo Gravidade, primeiramente deve-se garantir o controle de algumas variáveis para reproduzir o teste, como a temperatura do ambiente aos quais os bebedouros estarão expostos, e a temperatura da água entrando no bebedouro. Atendendo estes requisitos, dois serão os testes realizados para seguir os padrões da norma, que são: **Capacidade de Refrigeração** e **Manutenção da Temperatura**.

Dentro os dois tipos de bebedouros contemplados na norma, somente nos interessará neste trabalho os **Bebedouros por Pressão**, pois para os bebedouros tipo gravidade a empresa já possui uma tecnologia mais simples que atende aos requisitos da norma para realizar os ensaios, mas a tecnologia para realizar a certificação de bebedouros por pressão ainda não existe dentro da empresa.

Dando continuidade à interpretação dos dados fornecidos pela Tabela 1, primeiramente é necessário criar um estágio de tratamento e controle de temperatura da água que vai suprir o bebedouro a ser testado, para que o bebedouro de teste receba água a 27°C (+ – 0,5°C) no caso de **bebedouros por**

**pressão** (que é o tipo de interesse neste trabalho), e  $32^{\circ}\text{C}$  ( $+ - 0,5^{\circ}\text{C}$ ) no caso de **bebedouros tipo gravidade**. A temperatura do ambiente deve ser também controlada e mantida constante numa temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$  para o teste **Capacidade de Refrigeração**, e  $25^{\circ}\text{C}$  no teste **Manutenção da Temperatura**. A manutenção da temperatura do ambiente em que o bebedouro estará imerso também não será contemplado neste trabalho, visto que a tecnologia já existe dentro da empresa. Por fim devemos verificar, segundo uma sequência de passos estabelecidos no tópico **5.2.1.2 Procedimentos** da norma, se o bebedouro consegue manter a água refrigerada numa temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$  na saída para um determinado volume de água retirado do bebedouro por hora, em retiradas discretas simulando retiradas de copos de água.

Ao final dos ensaios de **Capacidade de Refrigeração e Manutenção da Temperatura**, baseando-se na Tabela 1 para a realização dos ensaios, parâmetros como *Capacidade de refrigeração*; *Consumo de energia para a capacidade de refrigeração*; *Consumo de energia para a manutenção da temperatura* e *Eficiência energética*, como apresentados no tópico **3.2 Termos e definições da norma**, serão levantados do bebedouro, parâmetros estes essenciais para realizar a certificação do bebedouro segundo a norma em questão.

- **Localização do assunto no espaço, no tempo e no contexto do Curso:**

Contextualizando o desenvolvimento deste trabalho do ponto de vista da empresa Embraco, dentro do Laboratório de Aplicação ao qual estou iniciei meu trabalho em 2017, já existem equipamentos apropriados para realizar a certificação de outros sistemas comerciais de refrigeração, como geladeiras e ilhas de refrigeração, mas pra bebedouros ainda não existia tecnologia disponível para realizar certificações. No contexto do curso, muitos conceitos estudados foram utilizados durante o desenvolvimento do projeto, como modelagem de sistemas dinâmicos orientados a eventos discretos, modelagem de sistemas contínuos, calibração de sistemas de medição, instrumentação aplicada a aquisição de dados e controle, modelagem e implementação de máquina de estados finitos, implementação de sistemas de controle realimentado aplicados a malhas de temperatura e pressão.

- **Importância do assunto e justificativa da escolha:**

Sabe-se que a certificação é uma ferramenta fundamental para as organizações que querem conseguir destaque no cenário nacional e, conseqüentemente, no internacional. Afinal, a organização que procura se adequar a alguma norma e, por consequência dessa adaptação, obtém e mantém a certificação, cria um grande diferencial competitivo frente aos seus concorrentes, deste modo muitos fabricantes de dispositivos refrigeradores buscam por procedimentos de certificação dos seus produtos para aumentar a confiabilidade dos mesmos.

A certificação configura uma forma de organização empresarial – de se colocar as coisas nos seus devidos lugares de maneira sistêmica. Ajuda as companhias a entender o que se passa internamente e, de certa forma, orienta no tratamento dos processos e ações que devem ser executados para que não conformidades não ocorram novamente. Além disso, auxilia as organizações a desenvolver um apreço maior pelos seus clientes, auxiliando no desenvolvimento de lideranças, e contribui para o envolvimento das pessoas.

Podemos destacar ainda outros benefícios obtidos com o processo de certificação: grande oportunidade para impulsionar a imagem da organização; aumento da satisfação dos clientes; mudança de foco da correção para a prevenção; mobilização em torno de um objetivo comum; e redução de desperdícios e custos.

## **5.2 Realização dos ensaios**

### **5.2.1.2 Procedimentos**

Ligar o aparelho e regular para a vazão máxima, desde que seja superior a 30L/h. Para aparelhos por pressão, ajustar a entrada para 100kPa.

Posicionar o termostato conforme declarado pelo fabricante, quando aplicável. No caso do fabricante não declarar o posicionamento, ensaiar o aparelho com o termostato na posição máxima.

Aguardar o tempo de inicialização do aparelho, conforme declarado pelo fabricante.

**Passo 1:** Após o tempo de inicialização do aparelho, o volume de descarte é coletado e descartado.

**Passo 2:** Imediatamente após, retirar a máxima quantidade de água do aparelho até que a Água atinja  $10^{\circ}\text{C} + 0,5^{\circ}\text{C}$ . Durante toda a retirada, a água deve estar abaixo de  $10^{\circ}\text{C} + 0,5^{\circ}\text{C}$ . Este volume de água deve ser desconsiderado para os cálculos de capacidade.

**Passo 3:** Aguardar o ciclo de retirada de água declarado pelo fabricante.

**Passo 4:** Retirar o volume de água declarado pelo fabricante, desde que seja maior ou igual a 200 mL. Durante toda a retirada, a água deve estar abaixo de  $10^{\circ}\text{C} + 0,5^{\circ}\text{C}$ , exceto durante a retirada do volume de descarte.

**Passo 5:** Repetir os passos 3 e 4 até que se tenha quatro retiradas consecutivas. “Se as quatro retiradas forem realizadas em um período de tempo menor que 1h, devem ser realizados quantos ciclos forem necessários até que se atinja ou ultrapasse este tempo.”

## 2.5 Interpretações da Norma e Proposta de Solução

Baseando-se no que está escrito na Seção 5.2 da norma, que foi exposto acima, precisaremos implementar:

A) Um sistema de controle de pressão, para controlar a pressão do suprimento da água que chega ao bebedouro, pressão esta a ser controlada em  $100\text{kPa}$ , dentro de uma faixa de incerteza de 5%.

B) Um sistema de controle orientado a eventos discretos para implementar sistematicamente os passos de 1 a 5, que estão descritos na Seção 5.2.1.2 da norma.

C) Baseando-se na Figura 01, na Seção 1.4 deste documento, precisaremos de um sistema de controle de temperatura para controlar a temperatura da água que supre o bebedouro em questão, temperatura esta que deve ser controlada em  $27^{\circ}\text{C}$ , dentro de uma faixa de incerteza de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Dados os itens A, B e C citados acima, para abordagem e solução do problema proporemos os seguintes módulos de solução:

**(1º) Tanque de climatização:** para controlar a temperatura da água que suprirá os bebedouros como requisitado na letra **C** da Seção 2.5 propõe-se um tanque com ação dupla, ação de aquecimento e ação de refrigeração. Por questões de simplicidade de implementação e modelagem do processo, manipularemos somente o sinal de controle enviado ao atuador de aquecimento (carga resistiva), enquanto a potência de refrigeração do sistema será mantida em nível constante o tempo todo. Portanto, teremos um sistema realimentado em malha fechada para controle da temperatura da água do tanque em relação a variável manipulada.

**(2º) Controle da pressão de suprimento:** para controlar a pressão de suprimento como requisitado na letra **A** da Seção 2.5, utilizaremos um sistema com uma bomba hidráulica e uma válvula proporcional inteligente, cuja regulação da abertura desta válvula implicará no controle da pressão de suprimento da água que entra no bebedouro, sendo este então um sistema de controle realimentado em malha fechada.

**(3º) Automação dos passos referentes ao ensaio de Capacidade de Refrigeração da Norma NBR16236:** com o objetivo de realizar de forma automática os cinco passos conforme a letra **C** da Seção 2.5, proporemos um sistema de controle orientado a eventos discretos na seção **(3.4.2) Diagrama de Transição de Estados do Capítulo 3**, com atuadores discretos que serão três válvulas solenoides (duas válvulas de duas vias, e a outra de três vias), e um transdutor digital de presença que será empregado para medição de volume de água retirado do bebedouro. Estes elementos serão comandados por uma Máquina de Estados Finitos, cujo projeto e desenvolvimento se darão no **Capítulo 3**. Note ainda que pelo fato da bomba hidráulica citada no tópico **(2º)** também ser um atuador discreto, a FSM projetada também agirá sobre a bomba.

O diagrama do processo mostrado na Figura 03 abaixo ilustra a solução proposta, com os sinais de medição, controle e atuadores empregados, onde:

- \*  **$SV_{01}$**  = Válvula Solenoide 01 de duas vias, ON/OFF.
- \*  **$SV_{02}$**  = Válvula Solenoide 02 de duas vias, ON/OFF.
- \*  **$SV_{03}$**  = Válvula Solenoide 03 de três vias, ON/OFF.
- \* ***Prop. V.*** = Válvula Proporcional, esta é a válvula de controle.
- \* ***Hydraulic Pump*** = Bomba Hidráulica.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

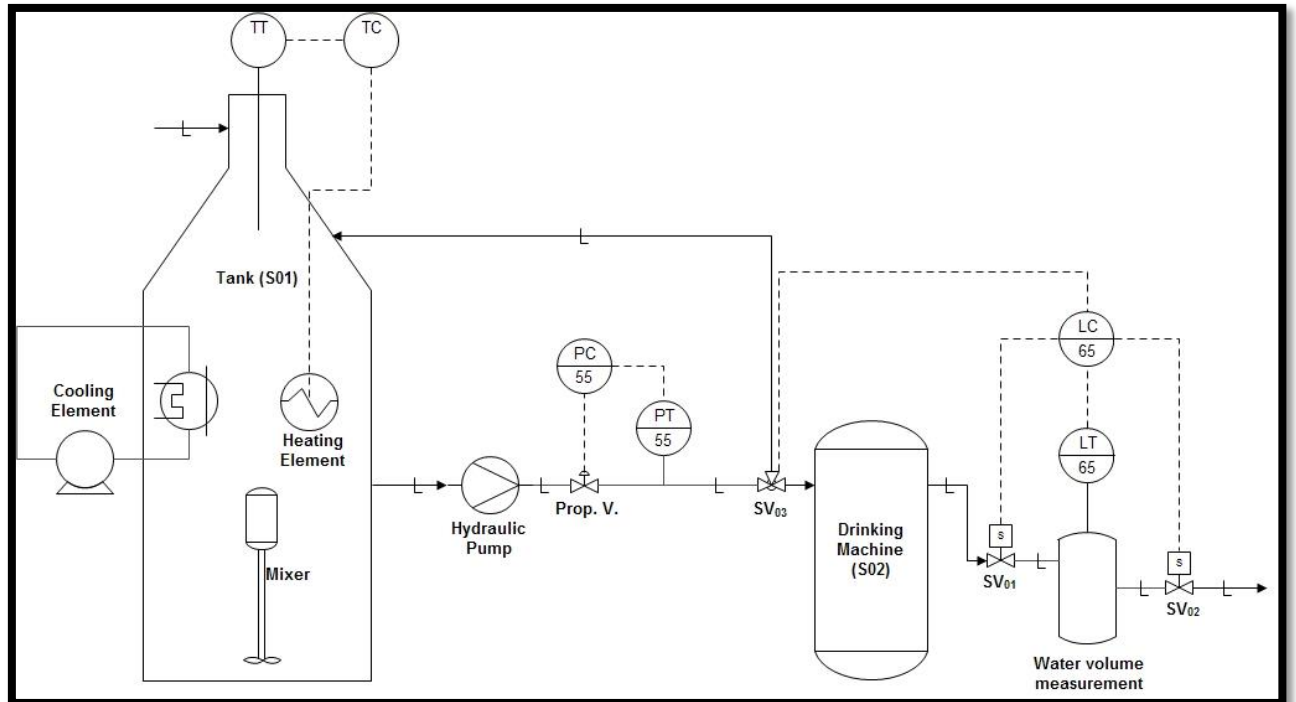


Figura 03 - Diagrama processos que mostra o que será implementado como solução para o trabalho presente.

A seguir uma breve explicação sobre o processo da Figura 03 será feita, contextualizando os elementos da figura com a solução de controle proposta.

Para implementar a malha de controle de Pressão, utilizaremos como atuadores uma bomba hidráulica (**Hydraulic Pump**) e uma válvula proporcional com acionamento eletrônico (**Prop. V.**), e para medição da pressão utilizaremos um transdutor de pressão tão próximo quanto possível ao ponto de suprimento do Sistema 02(S02).

A bomba hidráulica estará diretamente conectada à saída do Sistema 01(S01) em uma ponta, e em outra ponta estará conectada à válvula proporcional. A válvula proporcional estará conectada entre a bomba hidráulica e o transdutor de pressão, e ao fim da linha de pressão teremos o transdutor de pressão conectado entre a válvula proporcional e a válvula solenoide 03(**SV<sub>03</sub>**), que é uma válvula de três vias e tem o objetivo de deixar o fluido da linha de pressão circulando para o tanque (S01) durante o tempo que não há circulação direta para dentro do bebedouro (S02). Este procedimento de recirculação de água evita que fique fluido estagnado na mangueira de suprimento de água durante o tempo que não há água



entrando/saindo do bebedouro, pois se o fluido ficar estagnado na mangueira no período entre retiradas de água, ele tende a equalizar sua temperatura com a temperatura ambiente do ensaio (temperatura esta que é  $32^{\circ}C$ ).

Uma vez que a bomba esteja ligada com potência constante, devido à faixa de abertura proporcional da válvula podemos regular a pressão que é imposta na entrada do Sistema 02, utilizando assim a tensão de controle  $u_2(t)$  da válvula proporcional como nossa variável manipulada para a malha de controle de pressão.

Já para o sistema de controle de temperatura da água que é enviada para a entrada do bebedouro, tem-se um sensor de temperatura que mede a temperatura interna do da água do tanque **Tank(S01)**, esta medição é enviada ao controlador de temperatura, ao qual age sobre a potência da carga resistiva (**Heating Element**) que está em contato com a água do tanque.

Por fim, podemos ver que na extrema direita da Figura 03 existe uma medição do nível de água do sistema de medição de volume, que juntamente com temporizadores comanda o funcionamento das três válvulas  $SV_{02}$  e  $SV_{03}$ . Note que **Drinking Machine(S02)** da Figura03 é a representação de um bebedouro qualquer a ser certificado.

### 3 PROJETO DOS CONTROLADORES E DA MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS

#### 3.1 Modelagem Incremental e Projeto de Controladores PI

Em 3.2 e 3.3, abordaremos ensaios em malha aberta para identificação dos modelos das variáveis de processo em relação às variáveis manipuladas. Uma vez realizados os ensaios, proporemos modelos incrementais em torno de um ponto dentro da faixa de trabalho.

Portanto, para dar continuidade ao trabalho definiremos as seguintes notações:

\* $G_1(s)$  é o função de transferência do modelo da variável de temperatura  $PV_{01}$  em relação ao sinal de controle  $u_1(t)$ .

\* $G_2(s)$  é o função de transferência do modelo da variável de pressão  $PV_{02}$  em relação ao sinal de controle  $u_2(t)$ .

\* $C_1(s)$  é o função de transferência do controlador em malha fechada para controlar o comportamento dinâmico de  $G_1(s)$ .

\* $C_2(s)$  é o função de transferência do controlador em malha fechada para controlar o comportamento dinâmico de  $G_2(s)$ .

\* $H_1(s)$  é a função de transferência do sistema de controle de temperatura em malha fechada de  $PV_{01}$  em relação ao sinal de referência *SetPoint01*.

\* $H_2(s)$  é a função de transferência do sistema de controle de pressão em malha fechada de  $PV_{02}$  em relação ao sinal de referência *SetPoint02*.

Os métodos de modelagem para os sistemas a seguir se baseiam em técnicas lineares (LATHI,2007), (HECTOR BESSA SILVEIRA,2014). Portanto, consideraremos que o comportamento dos sistemas a seguir em torno de um ponto de trabalho é linear e invariante no tempo, passível de ser modelado com funções de transferência.

Uma vez proposto os modelos  $G_1(s)$  e  $G_2(s)$ , projetaremos controladores lineares  $C_1(s)$  e  $C_2(s)$  baseados em algoritmos P.I. adequados para atender as especificações propostas para cada modelo levantado. A Figura 4 ilustra de um

sistema de controle realimentado clássico baseado em controladores tipo P.I.D., os quais são muito utilizados para controle de sistemas industriais.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

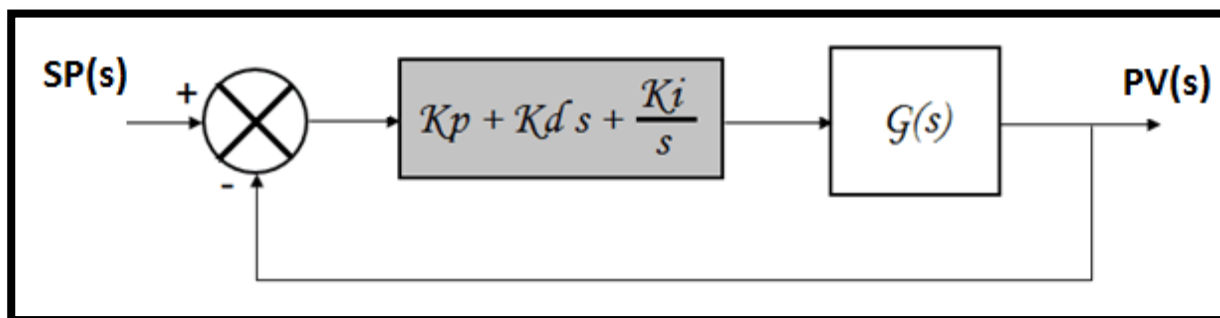


Figura 4-Representação de um sistema de controle realimentado, onde  $G(s)$  é a planta realimentada com um controlador PID  $C(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}$ , onde  $K_p$  é a ação proporcional,  $K_d s$  é a ação derivativa e  $\frac{K_i}{s}$  é a ação integral.

**Os requisitos de projeto para este sistema é seguimento de referência, e rejeição de perturbações tipo degrau em regime permanente.** Não existe especificação para a constante de tempo do sistema em malha fechada, portanto utilizaremos um valor condizente com as propriedades intrínsecas do sistema em malha aberta. Por exemplo, se ao realizarmos o ensaio em malha aberta para determinação do modelo de  $G_2(s)$ , e propusermos constante uma de tempo  $\tau_2$  para descrever seu comportamento transitório, podemos tomar  $\tau_2$  como base para o projeto do sistema de controle em malha fechada e definir que  $H_2(s)$  tenha sua constante de tempo igual à metade de  $\tau_2$ , ou igual a  $\tau_2$ , pois como foi anteriormente dito, como não existe a priori uma especificação para a constante de tempo do sistema em malha fechada, podemos usar algum valor condizente com as propriedades intrínsecas do sistema em malha aberta.

### 3.2 Malha de Controle de Pressão

O sinal de controle de pressão no diagrama da Figura 5 é  $u_2(t)$ .

Com o sistema físico pronto, fizemos um ensaio em malha aberta para determinar analisar o comportamento dinâmico de  $PV_{O_2}$  em relação a decrementos

de 5% de  $u_2(t)$ , além de determinar os limites físicos inerentes ao sistema, que se pode observar na Figura 6 quando  $u_2(t)$  equivale a 100% e a 0%, como mostra-se na figura abaixo:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

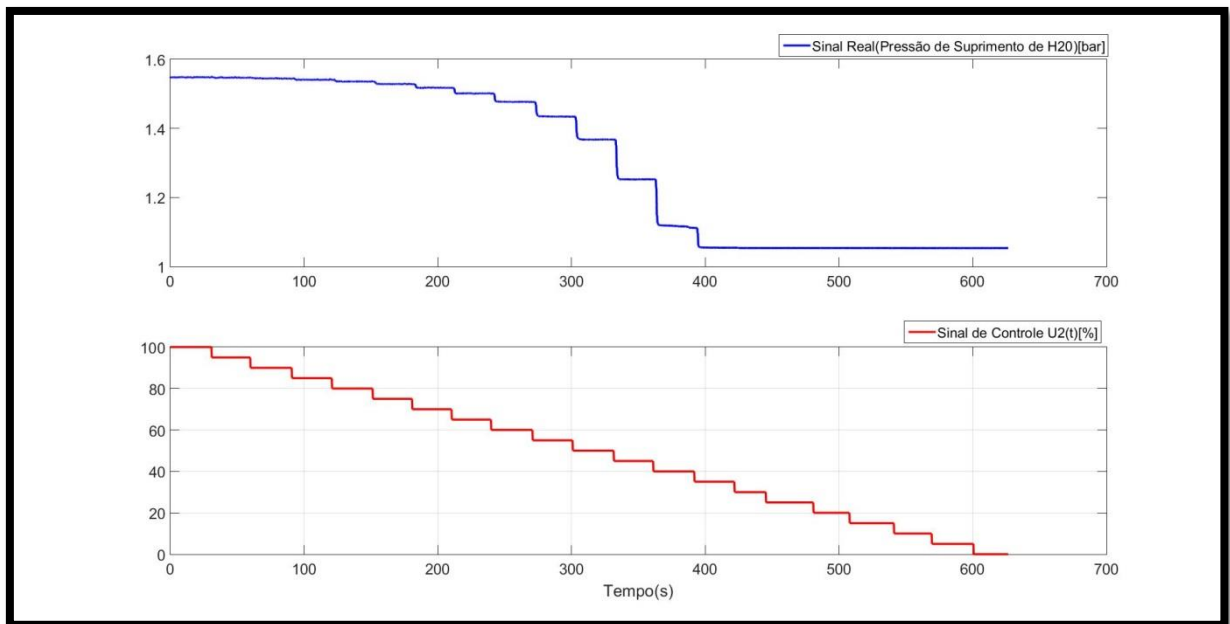


Figura 5-Ensaio em malha aberta realizado com decrementos de 5% do sinal de controle na curva em vermelho, e o comportamento dinâmico da variável de processo (pressão) em azul. Ensaio com duração de 620 segundos no total.

**Limitações do sistema físico:** O valor máximo do sinal de pressão que pode ser extraído do sistema físico ocorre quando a válvula está toda aberta, que se pode identificar no gráfico acima como sendo o momento em que o sinal de controle  $u_2(t)$  está em 100%, e nesse instante o valor médio do sinal de pressão é de 1,55 bar.

O valor mínimo do sinal de pressão que pode ser extraído do sistema físico ocorre quando a válvula está toda fechada, que se pode identificar no gráfico acima como sendo o momento em que o sinal de controle  $u_2(t)$  está em 0%, e nesse instante o valor médio do sinal de pressão é de 1,05 bar.

Como foi explicado na Seção 1.3.1, desejamos que o sistema de controle opere em torno de 2 bar, o valor máximo da pressão que o sistema físico atinge deveria ultrapassar os 2 bar, coisa que não ocorre. Devido a limites físicos do

sistema, é impossível mantê-lo em torno de  $2 \text{ bar}$  como deseja-se segundo o requisito 1.3.1 da norma NBR16236.

Entretanto, como não há disponibilidade de outros recursos para sanar este problema, neste trabalho será modelado o sistema em torno de um ponto de operação dentro da faixa existente, e será modelado um controlador apto a cumprir especificações de controle dentro desta faixa, e, no futuro, quando a melhoria do sistema mecânico for feita, o sistema de controle projetado deve ser capaz de rastrear o SetPoint e rejeitar perturbações em regime permanente.

### 3.2.1 Modelagem de $G_2(s)$ - $PV_{O_2}$ em relação à $u_2(t)$

Dando continuidade ao processo de modelagem do sistema, dado faixa de trabalho que tem-se, e analisando o comportamento dinâmico do sistema pela Figura 5, percebemos que o mesmo possui duas não linearidades evidentes. Uma delas é a variação do ganho estático do sistema ao longo da faixa de trabalho, por exemplo, na região entre 55% e 35% de  $u_2(t)$ , o ganho estático do sistema é muito mais que na região onde  $u_2(t)$  se confina entre 75% e 55%, até que o sistema atinge uma região de zona morta abaixo de 35% de  $u_2(t)$ .

Escolhendo então uma região com ganho estático intermediário, vamos escolher o ponto de trabalho  $u_2(t) = 60\%$  e  $PV_{O_2} = 1.476$ , e então vamos aplicar um decremento de controle de 5% em  $u_2(t)$ . O resultado deste procedimento fica explícito na Figura 6:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

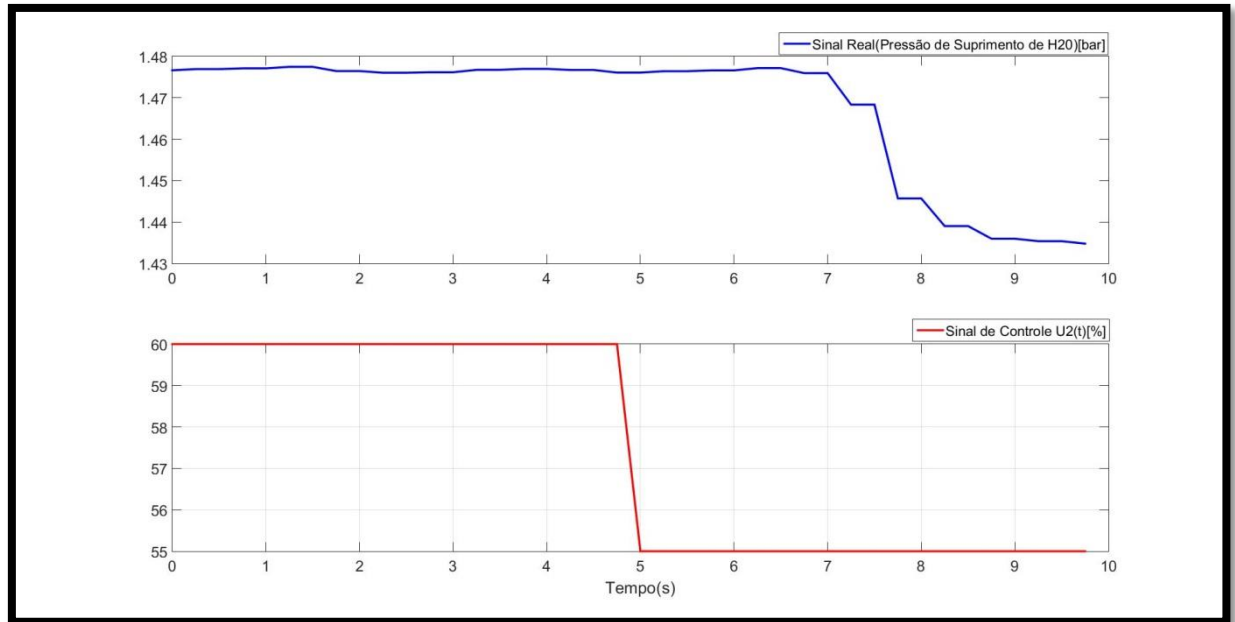


Figura 6- Decremento de 60% para 55% do sinal de controle no ensaio ilustrado na Figura 5.

Observe que na Figura 6 houve um degrau de 60% para 55% de  $u_2(t)$  aos 4,75 segundos, e  $PV_{O_2}$  só começa a responder aos 6,5 segundos, conferindo assim um atraso de 2 segundos da resposta de  $PV_{O_2}$  em relação à  $u_2(t)$ .

De maneira geral, processos industriais podem ser bem modelados por uma função de transferência de primeira ordem em conjunto com um atraso, de forma que este tipo de modelo é bem aceito pela principalmente em controle de processos (CHIEN; FRUEHAUF, 1990). Tomando isto como base e inspecionando a Figura 6, proporemos um modelo de primeira ordem com atraso de  $PV_{O_2}$  em relação à  $u_2(t)$ :

$$G_2(s) = \frac{G_2(0)}{\tau_2 s + 1} e^{-Ls},$$

Sendo:  $G(0)$  o ganho estático da função de transferência.

$\tau$  é a constante de tempo da função de transferência.

$L$  é o atraso do sistema, em segundos.

Portanto, extrairemos da Figura 6 os parâmetros necessários para construir o modelo baseado na função de transferência  $G_1(s)$ :

$$* L = 2[s],$$

$$* t_0 = 4,75[s],$$

$$* t_f = 9,75[s],$$

$$* \Delta t = t_f - t_0 = 5[s],$$

$$* P.V.(t_0) = 1,476[bar],$$

$$* P.V.(t_f) = 1,434[bar], \text{ considerado já em regime permanente.}$$

$$* \Delta P.V. = P.V.(9,75) - P.V.(4,75) = 1,434 - 1,476 = -0,042[^\circ C],$$

$$* M.V.(t_0^-) = 60[\%],$$

$$* M.V.(t_0^+) = 55[\%],$$

$$* \Delta M.V. = M.V.(t_0^+) - M.V.(t_0^-) = -5[\%],$$

$$* \text{Ganho estático } G_2(0) = \frac{\Delta P.V.}{\Delta M.V.} = 8,4 \cdot 10^{-3},$$

\*Para determinar a constante de tempo do sistema  $\tau$ , sabemos que para modelos de primeira ordem,  $t_{5\%} = 3\tau \Leftrightarrow \tau = \frac{t_{5\%}}{3}$ .

Como  $\Delta P.V. = -0,042 \rightarrow 0,95\Delta P.V. = -0,04$ , que ocorrem em  $t' = 8,5[s]$ .

Descontando o tempo em que o incremento de controle ocorreu  $t_0$ , e o atraso

**L:**

$$t_{5\%M.A.} = t' - (t_0 + L) = 8,5 - (4,75 + 1,75) = 2 \Leftrightarrow \tau_2 = 0,666[s].$$

Portanto:

$$G_2(s) = \frac{8,4 \cdot 10^{-3}}{0,666s + 1} e^{-2}.$$

Repare que o atraso do sistema grande ( $L > 2\tau_2$ ) em relação a constante de tempo do sistema  $L = 3\tau_2 = t_{5\%M.A.}$ .

É comum em processos industriais que se disponha somente de um controlador PID para controlar processos com atrasos dominantes (processos em que  $L > 2\tau$ ), e a solução adotada para contornar este problema é diminuir o ganho proporcional do controle e/ou aumentar o tempo integral de maneira que o sistema de controle em malha fechada funcione de maneira estável, entretanto o comportamento transitório do sistema se torna muito lento (NORMEY-RYCO; CAMACHO, 1998).

Fonte: Elaborado pelo Autor.

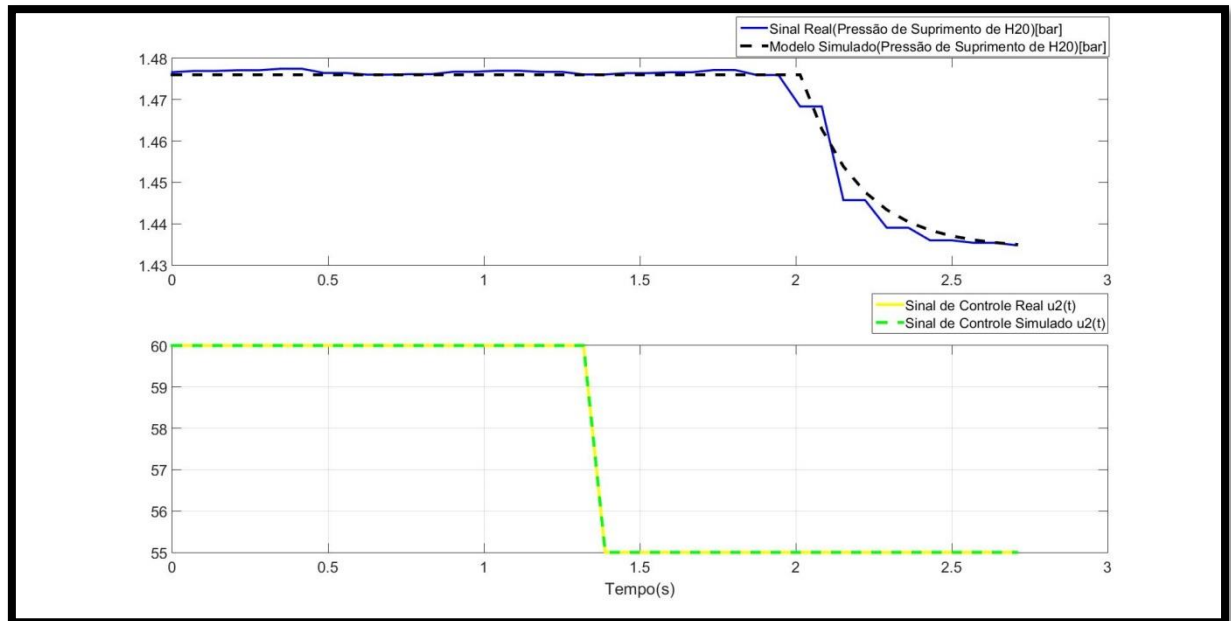


Figura 7-Comparação entre o Modelo proposto  $G_2(s)$  simulado em ambiente MATLAB/SIMULINK em relação ao sinal real do sistema  $PV_{02}$ . Em preto pontilhado tem-se o sinal simulado, e em azul tem-se o sinal real de  $PV_{02}$  em relação a um decréscimo de 5% de  $u_2(t)$ .

### 3.2.2 Projeto do Controlador $C_2(s)$ para $G_2(s)$

Dado que  $G_2(s)$  foi modelado como uma dinâmica de primeira ordem sem zeros e com atraso, vamos abordar este problema de controle projetando um controlador  $C_2(s)$  levando em consideração que  $G_2(s)$  não tivesse atraso (chamaremos este outro modelo de  $\widetilde{G}_2(s) = \frac{8,4 \cdot 10^{-3}}{0,666s+1}$ , ou seja, que  $G_2(s)$  fosse um modelo de primeira ordem sem atraso, com o detalhe de que, como foi citado no tópico último parágrafo na Seção 3.2.1, devemos ter o cuidado de projetar o controlador para suavizar o efeito do atraso no regime transitório do sistema, e a tática para isto é projetar um controlador com ação de controle suficientemente conservativa.

Para termos uma métrica de o quão conservativo deverá ser nosso controlador, vamos propor dois diferentes projetos de controle, um com  $t5\%MF_2 = 1 \cdot t5\%MA_2$  e outro com  $t5\%MF_2 = 2 \cdot t5\%MA_2$ , ou seja, no primeiro cenário o tempo



de resposta projetado para o sistema em malha fechada vai ser igual ao tempo de resposta em malha aberta, e no segundo cenário o tempo de resposta projetado para o sistema em malha fechada vai ser duas vezes mais lento que o tempo de resposta em malha aberta. Faremos simulações na plataforma MATLAB-Simulink destes dois sistemas de controle, os quais serão projetados nos parágrafos que seguem.

Analisando  $\widehat{G}_2(s)$  sem o atraso, utilizando um controlador  $C_2(s)$  somente com a parcela proporcional e integral é suficiente para que os polos da função de transferência do sistema em malha fechada  $H_2(s)$  sejam reais e estejam contidos no semiplano complexo negativo, o que garante que o sistema em malha fechada seja estável em regime permanente e sem oscilações em regime transitório. Portanto:

$$\therefore C_2(s) = kp + \frac{ki}{s} = \frac{kp(s + \frac{ki}{kp})}{s} = \frac{kp(s + z_c)}{s} = \frac{kpNc}{Dc},$$

Lembrando que nosso modelo em questão é:

$$\therefore \widehat{G}_2(s) = \frac{G_2(0)}{\tau_2 s + 1} = \frac{G_2(0)/\tau_2}{s + 1/\tau_2} = \frac{kg}{s + pg} = \frac{kgNg}{Dg},$$

Fechando a malha:

$$\begin{aligned} \therefore H_2(s) &= \frac{Y}{R} = \frac{CG}{1 + CG} = \frac{\frac{kpkgNcNg}{DcDg}}{1 + \frac{kpkgNcNg}{DcDg}} = \frac{kpkgNcNg}{DcDg + kpkgNcNg}, \\ \therefore \frac{Y}{R} &= \frac{kpkgNc}{s(s + pg) + kpkg(s + z_c)} = \frac{kpkgNc}{s^2 + spg + skpkg + kpkgz_c}, \\ &\therefore Pmf_1(s) = s^2 + s(pg + kpkg) + kpkgz_c, \end{aligned}$$

\*Projeto por realocação de polos, com polos desejados reais e iguais em malha fechada:

\*Polinômio desejado em malha fechada:

$$* PdMF_2(s) = (s + pd_2)^2 = s^2 + 2pd_2s + pd_2^2,$$

\*Por igualdade polinomial de entre  $Pmf_2(s)$  e  $PdMF_2(s)$ , tem-se que:

$$* 2pd_2 = pg + kpk_g \Leftrightarrow kp = \frac{2pd_2 - pg}{k_g} \quad (1),$$

$$* pd_2^2 = kpk_g z_c \Leftrightarrow z_c = \frac{pd_2^2}{kpk_g} \quad (2),$$

\*Com dinâmica dominante de polos reais e iguais, em malha fechada:

$$t5\%MF_2 = 4,8\tau_{MF_2} = \frac{4,8}{pd_2} \Leftrightarrow pd_2 = \frac{4,8}{t5\%MF_2} \quad (3),$$

\*Como  $t5\%MF_2$  é escolhido, em (3)  $pd_2$  fica determinado. Por retrossubstituição,  $k_g$  é determinado em (1) e, por conseguinte  $z_c$  é determinado em (2).

\*Ainda tem-se que:

$$z_c = \frac{ki}{kp} \Rightarrow ki = z_c kp \quad (4),$$

\*Aplicando os cálculos acima para o primeiro cenário, tem-se que:

$t5\%MF_2 = 1$ .  $t5\%MF_2 = 2s$ , de (1), (2), (3) e (4) decorre que:

$$pd_2 = 0,8,$$

$$kp = 261,905,$$

$$z_c = 0,5818,$$

$$ki \left[ \frac{1}{s} \right] = 152,38 \Leftrightarrow Ti[s] = \frac{kp}{ki} = 1,7187,$$

\*Como período de atualização do loop de controle usaremos:

$$Ts_2^1 = \frac{t5\%MF_1}{40} = 0.15,$$

$$\therefore C_2(s) = \frac{261,905(s + 0,5818)}{s}.$$

E finalmente, a função de transferência em malha fechada  $H_2(s)$ :

$$H_2(s) = \frac{1,1(s + 0,5818)}{(s + 0,4)^2}.$$

A seguir faremos uma simulação de decremento de 0,05 na referência do sistema de controle e observaremos como  $H_2(s)$  se comporta para o primeiro cenário:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

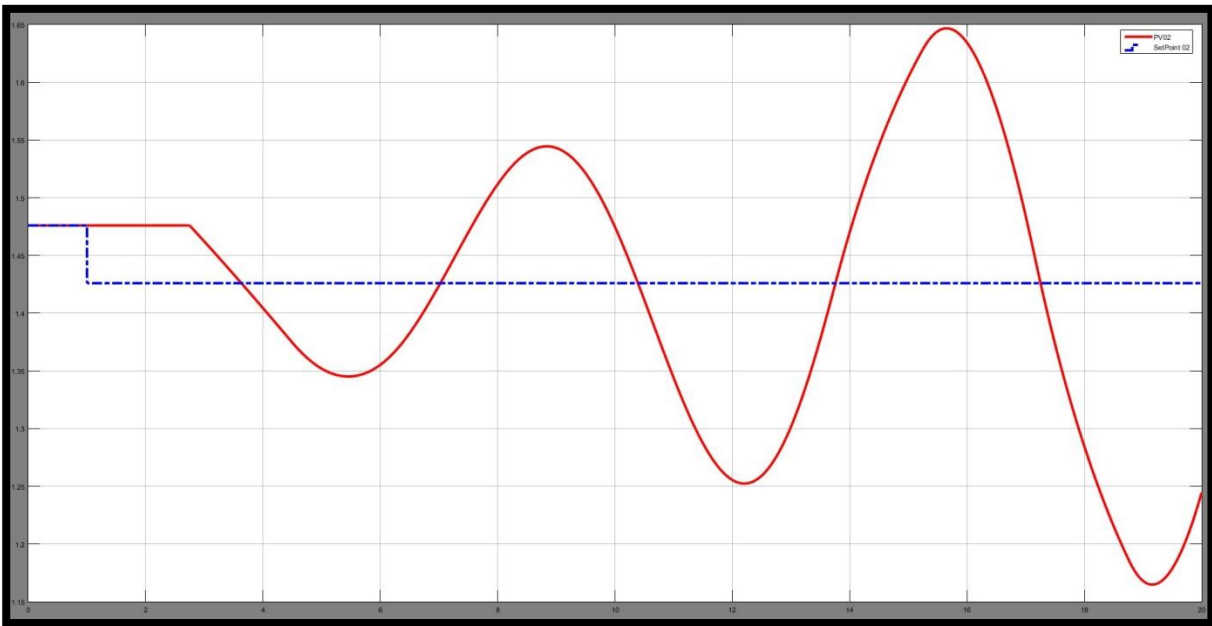


Figura 8-Simulação de  $H_2(s)$  para um decremento de 0,05 no valor do SetPoint em ambiente SIMULINK. Em vermelho tem-se o sinal da variável controlada e em azul pontilhado tem-se o decremento de controle, a simulação durou 20 segundos.

Como pode-se ver na Figura 8, para o projeto de realocação de polos com  $t5\%MF_2 = 1$ .  $t5\%MA_2$ (primeiro cenário), o sistema em malha fechada ficou instável. A seguir faremos uma análise do sinal de controle simulado deste cenário:

Fonte: Elaborado pelo Autor.



Figura 9-Sinal de controle para a simulação feita e ilustrada na Figura 8.

Veja que o sinal do controle ao longo do tempo instabiliza, atingindo os limites de saturação. Vamos agora abordar este problema no segundo cenário e comparar os resultados em relação ao primeiro cenário.

\*Aplicando os cálculos do projeto por realocação de polos para o segundo cenário, tem-se que:

$$t5\%MF_2 = 2. t5\%MF_2 = 4s, \text{ de (1), (2), (3) e (4) decorre que:}$$

$$pd_2 = 0,4,$$

$$kp = 71,4286,$$

$$z_c = 0,533,$$

$$ki[1/s] = 38,0952 \Leftrightarrow Ti[s] = \frac{kp}{ki} = 1,8750,$$

\*Como período de atualização do loop de controle usaremos:

$$Ts_2^2 = \frac{t5\%MF_1}{40} = 0,3.$$

$$\therefore C_2(s) = 71,4286 + \frac{38,0952}{s} = \frac{71,4286(s + 0,533)}{s}.$$

E finalmente, a função de transferência em malha fechada  $H_2(s)$ :

$$H_2(s) = \frac{0,3(s + 0,533)}{(s + 0,4)^2}.$$

Na Figura 10 abaixo se realizou a simulação de  $H_2(s)$  para um decremento de 0,05 no valor do SetPoint:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

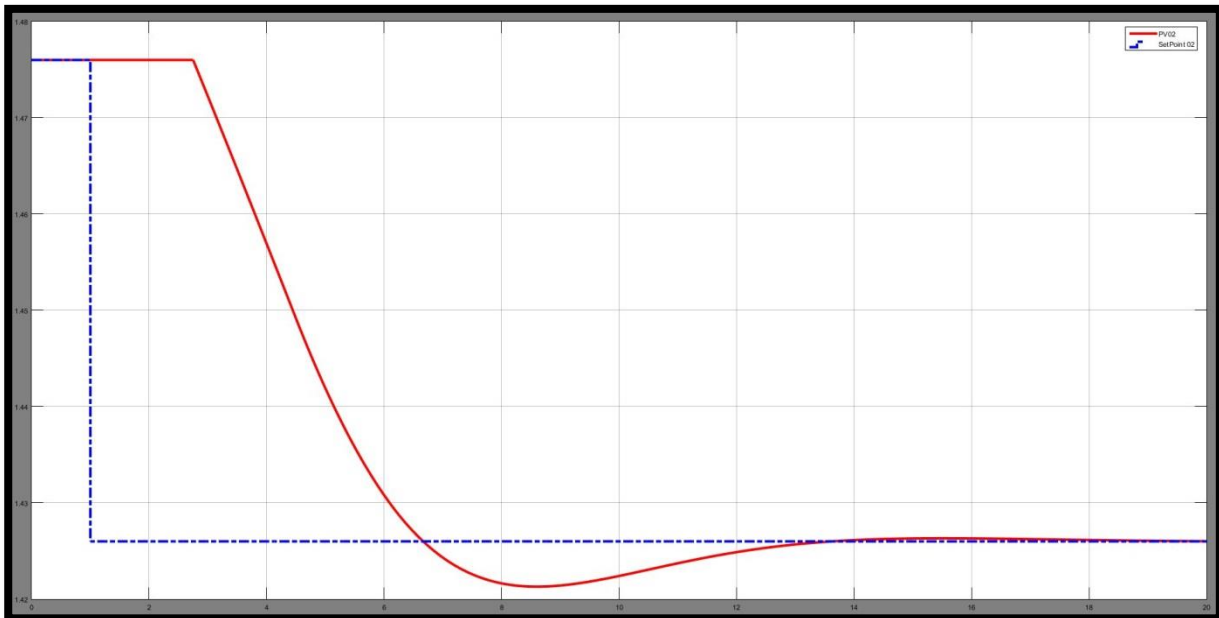


Figura 10- Simulação de  $H_2(s)$  para um decremento de 0,05 no valor do SetPoint em ambiente SIMULINK.

Como pode-se ver na Figura 10, para o projeto de realocação de polos com  $t_{5\%MF_2} = 2 \cdot t_{5\%MA_2}$  (segundo cenário), o sistema em malha fechada ficou estável, e como foi previsto no último parágrafo da Seção 3.2.1, o  $kp$  do projeto do segundo cenário diminuiu em relação ao do primeiro cenário ( $kp$  diminuiu de 261,905 para 71,4286) além do tempo integral  $Ti$  ter aumentado do primeiro para o segundo cenário ( $Ti$  passou de 1,7187 para 1,8750).

O resultado disso foi um controle mais conservativo e lento, porém estável.

A seguir faremos uma análise do sinal de controle simulado deste cenário:

Fonte: Elaborado pelo Autor.

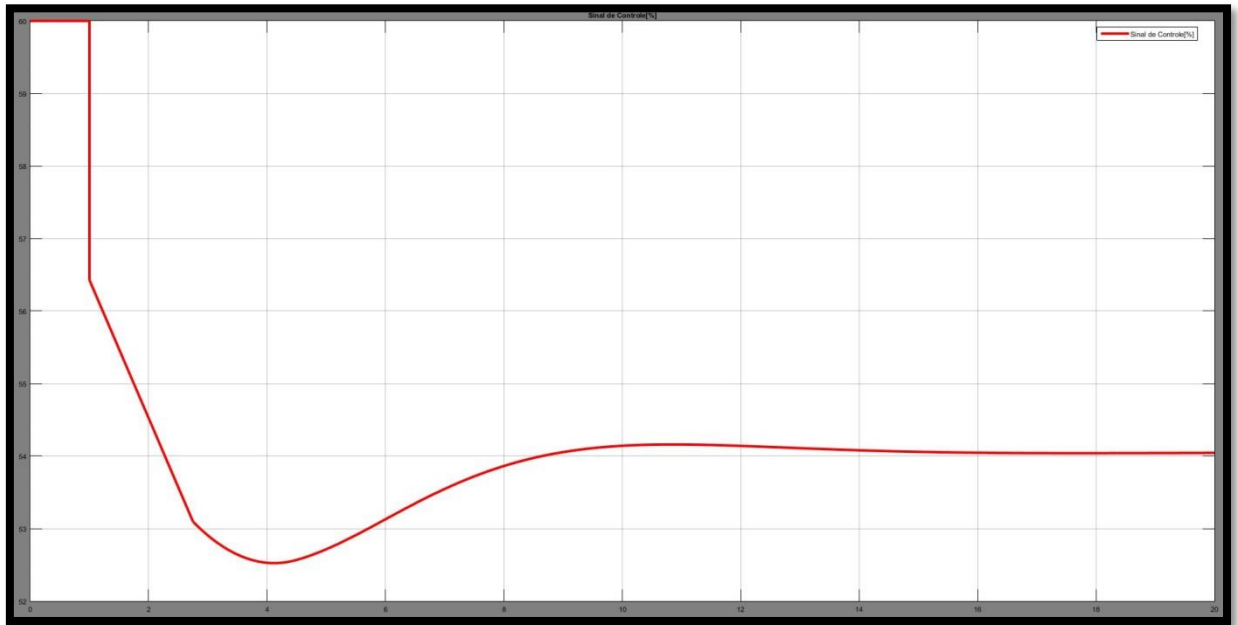


Figura 11-Sinal de controle para a simulação feita e ilustrada na Figura 10.

Perceba que diferentemente do sinal de controle do primeiro cenário, no cenário cujo  $t_{5\%MF_2} = 2.t_{5\%MA_2}$  o sinal de controle é mais conservativo e vai diminuindo suas variações ao longo do tempo, chegando a um patamar de regime permanente em torno de 15 segundos de simulação. Portanto usaremos o projeto desenvolvido no segundo cenário para este trabalho.

### 3.2.3 Validação de $C_2(s)$ – O sistema de Controle na Prática

Fonte: Elaborado pelo Autor.

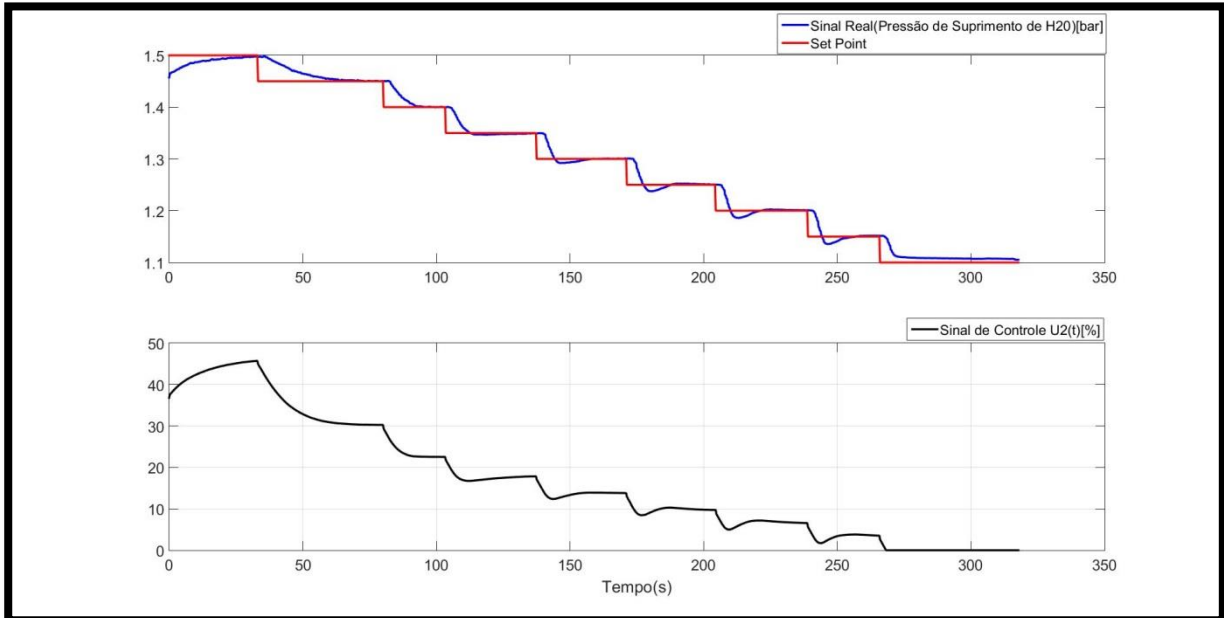


Figura 12-Resultados do sistema de controle real implementado, com incrementos de 0,05 no SetPoint, varrendo os limites máximos e mínimos do sistema.

Como observado na Figura 12, o sistema em malha fechada na prática consegue rastreamento de SetPoint com uma dinâmica suave próxima ao ponto de linearização, e a medida que nos afastamos deste ponto o sistema apresenta sobressinal às mudanças de SetPoint, devido à não linearidade do sistema.

### 3.3 Malha de Controle de Temperatura

Para implementar a malha de controle de Temperatura, desenvolveu-se um dispositivo que consiste num tanque de água (S02) que possa ora refrigerar a água, e ora possa aquecer a água (atuação dupla), para que o sinal de controle possa tanto aquecer quanto refrigerar a água interna ao tanque, propriedade está desejável para sistemas de controle de temperatura.

Dito isto, como mostrado na Figura 02, o dispositivo é o Tanque (S01), que consiste num reservatório de água diretamente conectado à rede hidráulica para

suprimento de água, e internamente possui um circuito de refrigeração clássico, cujo evaporador do circuito de refrigeração mantém-se trocando calor com a água do tanque, e ao mesmo tempo existe uma carga resistiva para gerar calor e trocar calor com a água do tanque.

Por mérito de simplicidade de implementação (mesmo não sendo uma implementação ótima do ponto de vista de eficiência energética), a solução de controle para manutenção da temperatura da água deste tanque é a seguinte: mantêm-se o circuito de refrigeração constante e ligado permanentemente (portanto existe uma potência constante que retira calor da água do tanque), enquanto variamos o sinal enviado para a carga resistiva ( $u_1(t)$ ), sinal este que utilizamos para controlar a potência instantânea entregue a ela, potência esta usada para aquecimento da água. A temperatura medida que será efetivamente controlada é a temperatura da água imediatamente na saída do tanque ( $PV_{01}$  da Figura 02), enquanto  $u_1(t)$  é o sinal de controle número 01, que é a variável manipulada utilizada para controlar  $PV_{01}$ .



### 3.3.1 Modelagem Dinâmica da Temperatura Interna do Tanque

Fonte: Elaborado pelo Autor.

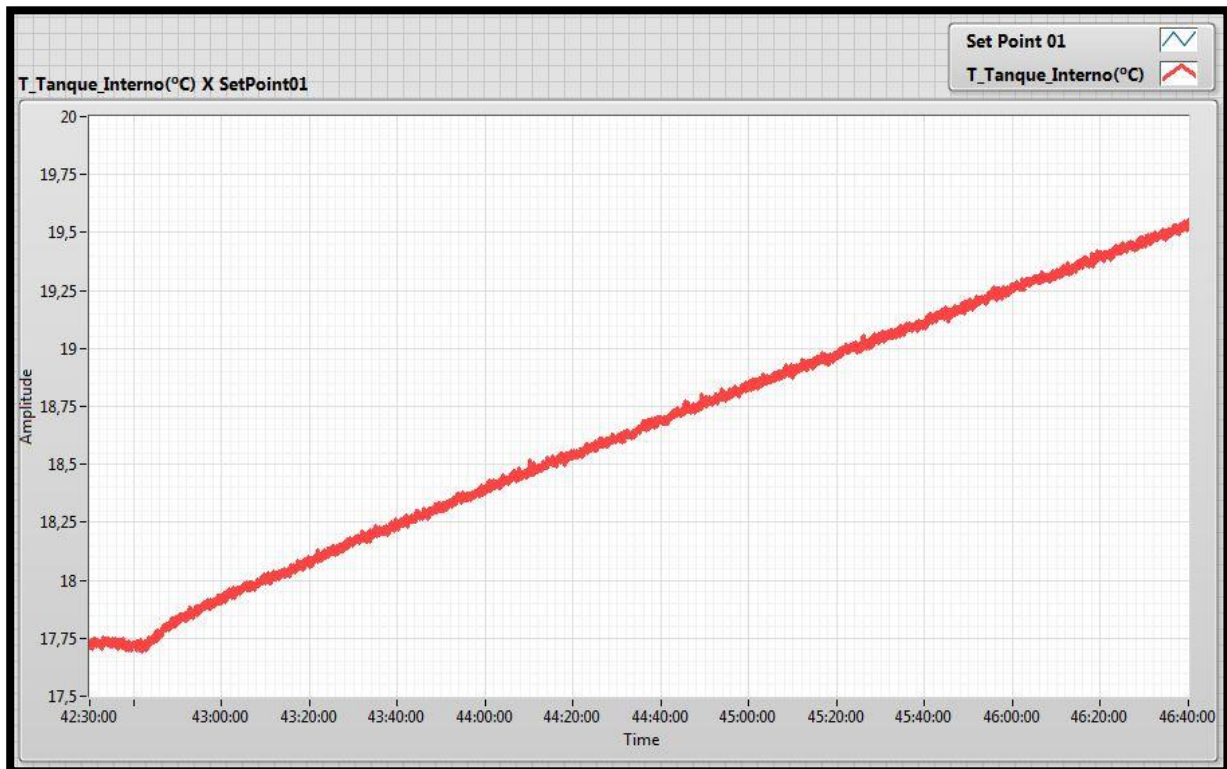


Figura 13 - Medição da  $PV_{01}$  (Temperatura) no ensaio em malha aberta realizado para identificar seu modelo em relação à  $u_1(t)$ . O gráfico acima foi diretamente retirado do software em LabVIEW usado para realizar esta medição.

Fonte: Elaborado pelo Autor.



Figura 14 - Medição de  $u_1(t)$  no ensaio em malha aberta realizado para identificar seu modelo  $G_1(s)$ . O gráfico acima foi diretamente retirado do software em LabVIEW usado para realizar esta medição.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

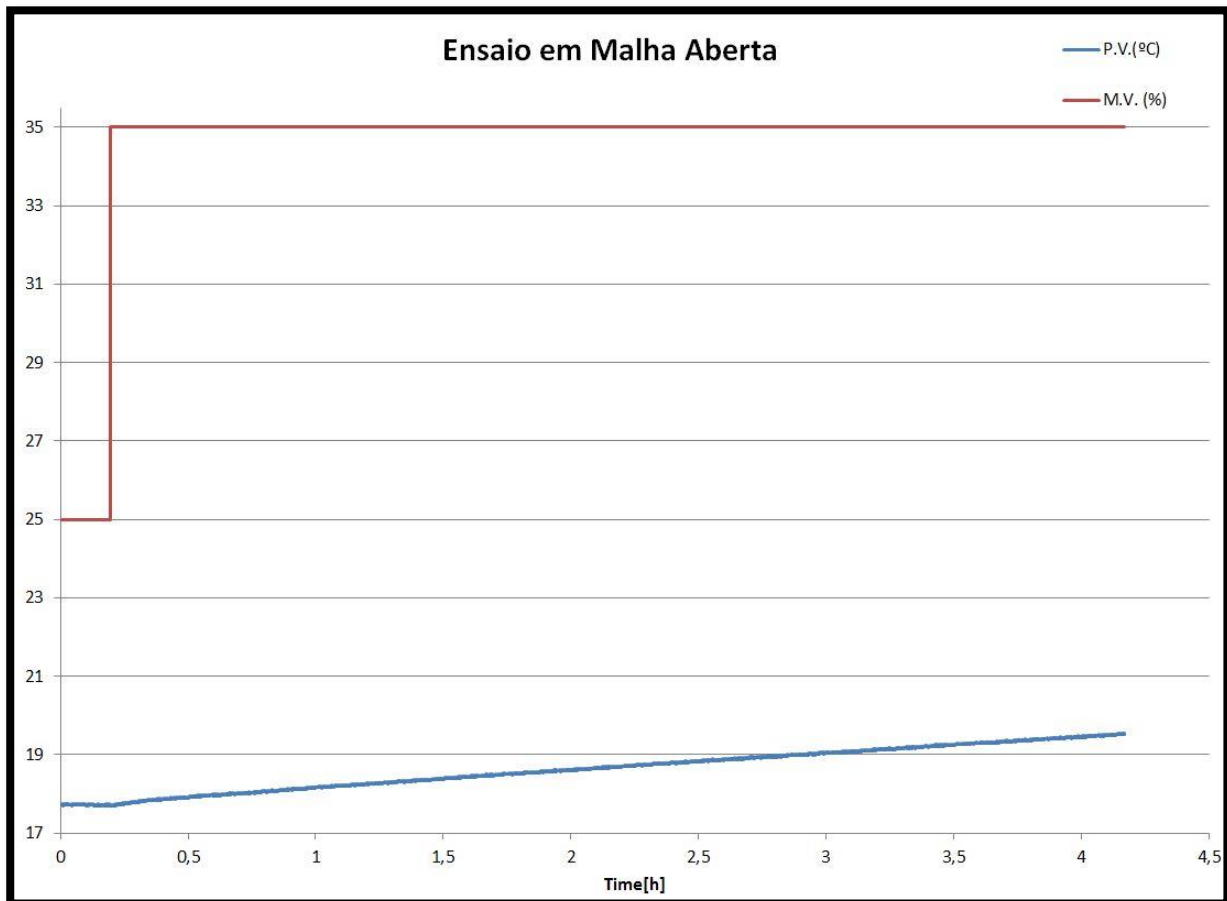


Figura 15-Medições da  $PV_{01}$  (Temperatura) e do sinal de controle  $u_1(t)$  no ensaio em malha aberta realizado para identificar o modelo  $G_1(s)$ . Gráfico construído a partir dos sinais aqisitados das Figuras 10 e 11.

O Ensaio da Figura 12 foi realizado no entorno do ponto de linearização  $(T_0; U_0) = (17,69; 25)$ .

Por inspeção, a curva da  $PV_{01}$  ao longo do tempo em relação ao incremento da  $u_1(t)$  se aproxima de uma curva de dinâmica dominante integradora, que pode ser modelada por uma função de transferência  $G_1(s)$  da forma:

$$G_1(s) = \frac{kg_I N g}{Dg} = \frac{kg_I}{s},$$

Tal que:

$$kg_I = \frac{\Delta PV_{01}}{\Delta u_1(t)} / \Delta t$$

$$Ng = 1,$$

Portanto, extrairemos da Figura 15 os parâmetros necessários para construir o modelo baseado na função de transferência  $H_1(s)$ :

$$* t_0 = 0,196[h],$$

$$* t_f = 4,166[h],$$

$$* \Delta t = t_f - t_0 = 3,97[h] = 14292[s].$$

$$* PV_{01}(t_0) = 17,71[^\circ C],$$

$$* PV_{01}(t_f) = 19,52[^\circ C],$$

$$* \Delta PV_{01} = PV_{01}(t_f) - PV_{01}(t_0) = 1,81[^\circ C].$$

$$* u_1(t_0^-) = +25[\%],$$

$$* u_1(t_0^+) = +35[\%],$$

$$* \Delta u_1 = u_1(t_0^+) - u_1(t_0^-) = +10[\%].$$

$$* kg_I = \frac{\Delta PV_{01}}{\Delta u_1} / \Delta t = 1,266 \cdot 10^{-5}.$$

$$\therefore G_1(s) = \frac{1,266 \cdot 10^{-5}}{s}.$$

### 3.3.2 Projeto do Controlador $C_1(s)$ para o modelo $G_1(s)$

Como citado na Seção 3.1, os requisitos deste de projeto para este sistema são seguimento de referência, e rejeição de perturbações tipo degrau em regime permanente, e não existem especificações rigorosas quanto ao regime transitório do sinal a ser controlado. Dado que  $G_1(s)$  foi modelado como uma dinâmica integradora dominante pura, um controlador  $C_1(s)$  somente com a parcela proporcional e integral é suficiente para que os polos da função de transferência do sistema em malha fechada  $H_1(s)$  sejam reais e estejam contidos no semiplano complexo negativo, o que garante que o sistema em malha fechada seja estável em regime permanente e sem oscilações em regime transitório. Análises de sobressinal e tempo de

estabilização do sistema em malha fechada serão abordadas a seguir abaixo. Como proposto:

$$C_1(s) = kp + \frac{ki}{s} = \frac{kp(s + \frac{ki}{kp})}{s} = \frac{kp(s + z_c)}{s} = \frac{kpNc}{Dc},$$

Fechando a malha:

$$\begin{aligned} \therefore H_1(s) &= \frac{Y}{R} = \frac{CG}{1 + CG} = \frac{\frac{kpkgNcNg}{DcDg}}{1 + \frac{kpkgNcNg}{DcDg}} = \frac{kpkgNcNg}{DcDg + kpkgNcNg}, \\ \therefore \frac{Y}{R} &= \frac{kpkgNc}{s^2 + kpkg(s + z_c)} = \frac{kpkgNc}{s^2 + kpkg s + kpkg z_c}, \\ \therefore Pmf_1(s) &= s^2 + kpkg s + kpkg z_c. \end{aligned}$$

\*Projeto por realocação de polos, com polos desejados em malha fechada reais e iguais:

\*Polinômio desejado em malha fechada:

$$* PDMF_1(s) = (s + pd_1)^2 = s^2 + 2pd_1 s + pd_1^2,$$

\*Por igualdade polinomial de entre  $Pmf_1(s)$  e  $PDMF_1(s)$ , tem-se que:

$$* 2pd_1 = kpkg \Leftrightarrow kp = \frac{2pd_1}{kg} \quad (1),$$

$$* pd_1^2 = kpkg z_c \Leftrightarrow z_c = \frac{pd_1^2}{kpkg} \quad (2),$$

\*Com dinâmica dominante de polos reais e iguais, em malha fechada:

$$t_{5\%}MF_1 = 4,8\tau_{MF_1} = \frac{4,8}{pd_1} \Leftrightarrow pd_1 = \frac{4,8}{t_{5\%}MF_1} \quad (3),$$

\*Como  $t_{5\%}MF_1$  é escolhido, em (3)  $pd_1$  fica determinado. Por retrossubstituição,  $kg$  é determinado em (1) e, por conseguinte  $z_c$  é determinado em (2).

\*Ainda tem-se que:

$$z_c = \frac{ki}{kp} \Rightarrow ki = z_c kp \quad (4),$$

\*Escolhendo  $t_{5\%MF_1} = 2h = 7200s$ , de (1), (2), (3) e (4) decorre que:

$$pd_1 = 6,66 \cdot 10^{-4},$$

$$z_c = 3,333 \cdot 10^{-4},$$

$$kp = 105,31.$$

$$ki = 0,0351 \Leftrightarrow Ti[s] = \frac{kp}{ki} = 3000.$$

$$Ts_1[s] = \frac{t_{5\%MF_1}}{20} = 360.$$

$$\therefore C_1(s) = 105,31 + \frac{0,0351}{s} = \frac{105,31(s + 3,333 \cdot 10^{-4})}{s}.$$

E finalmente, a função de transferência em malha fechada  $H_1(s)$ :

$$H_1(s) = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}(s + 3,33 \cdot 10^{-4})}{(s + 6,66 \cdot 10^{-4})^2}.$$

Observação: Perceba que  $H_1(s)$  apresenta um zero dominante ( $s + 3,33 \cdot 10^{-4}$ ), que causará sobressinal na resposta ao degrau de  $H_1(s)$ , o que refletirá em sobressinal para mudanças de SetPoint do sistema em malha fechada, problema este que poderia ser sanado com o projeto e implementação de um Filtro de Referência. Mas como não há a possibilidade de mudança de SetPoint durante a ocorrências dos ensaios de Capacidade de Refrigeração com bebedouros(o SetPoint vai ser manter em 27 o tempo todo), e a bancada somente será considerada apta a operar um ensaio quando o sinal de temperatura tiver atingido seu valor em regime permanente (27°C), o fato de haver sobressinal em regime transitório para mudanças de SetPoint tipo degrau em nada afeta os ensaios realizados ou os objetivos a serem cumpridos pela bancada, portanto o zero dominante pode ser relevado para efeitos práticos desta aplicação.

3.3.3 Simulações para validação do sistema de controle de  $H_1(s)$  em plataforma MATLAB e Simulink:

**OBS:** O sinal real de  $PV_{01}$  em malha fechada será apresentado em um gráfico de um ensaio oficial da bancada, no Capítulo 6.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

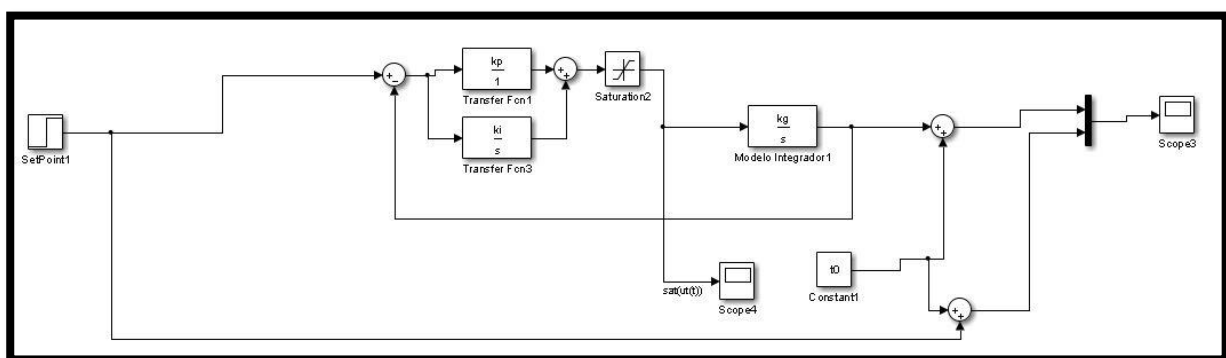


Figura 16-Diagrama de blocos utilizado para simular o sistema de controle em malha fechada de  $H_1(s)$ , usado na plataforma MATLAB/Simulink.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

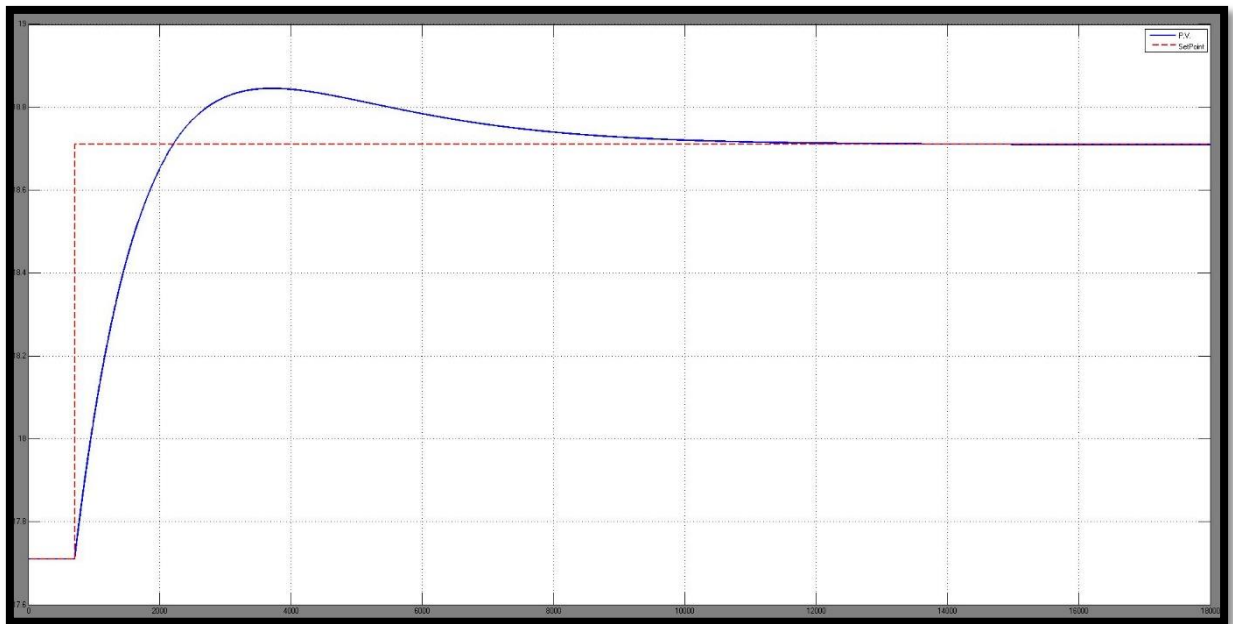


Figura 17-Simulação da resposta de  $H_1(s)$  a um degrau unitário, em vermelho pontilhado tem-se o sinal do Set Point, e em azul o Sinal de  $PV_{01}$ . Esta simulação tem o  $\Delta t$  de 5 horas.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

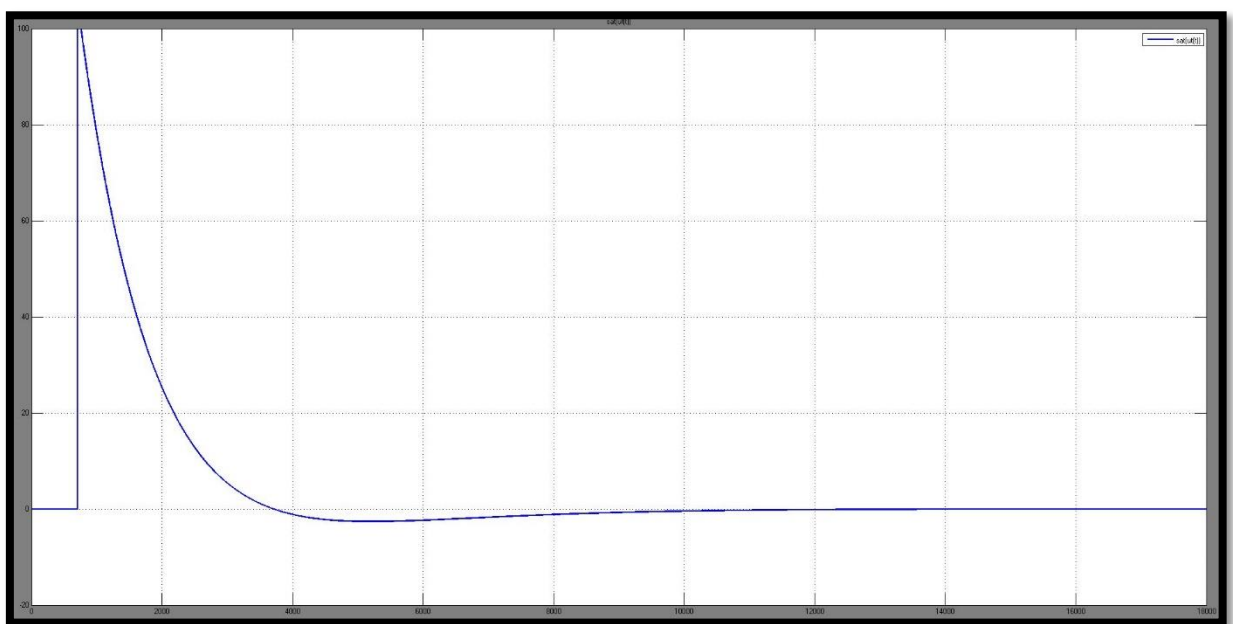


Figura 18-Sinal de controle  $u_1(t)$  referente à simulação da Figura 14.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

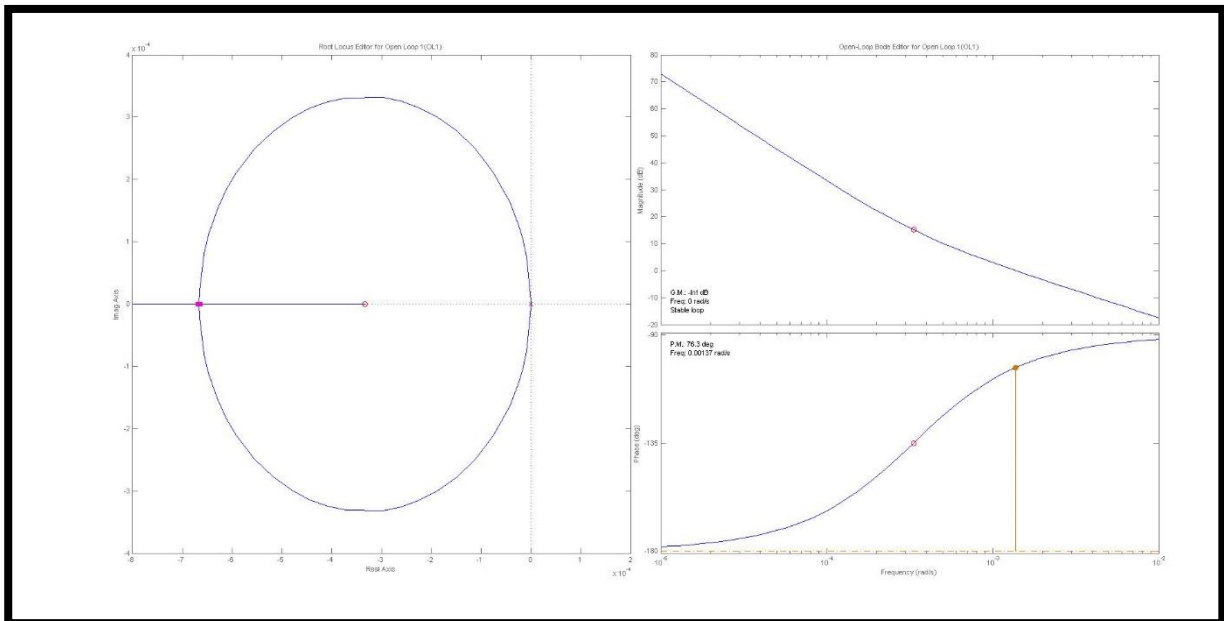


Figura 19-Lugar das raízes e diagrama de bode traçado na ferramenta 'sisotool' da plataforma MATLAB referente à  $H1(s)$ . Repare que, como mostrado no diagrama de lugar das raízes, os pólos são reais e iguais (em rosa preenchido), porém existe um zero (em rosa vazado) mais próximo ao eixo imaginário que os pólos, implicando que a resposta temporal ao Degrau Unitário apresenta sobressinal, como foi ilustrado na Figura 17.

### 3.4 Automação do Ensaio - Um sistema orientado a eventos discretos:

#### 3.4.1 O que é uma Máquina de Estados Finitos?

Considere a Figura 20 abaixo, onde um Sistema de Controle controla uma aplicação qualquer:

Fonte: F. WAGNER; R. SCHMUKI; T. WAGNER; P. WOLSTENHILME(2006).

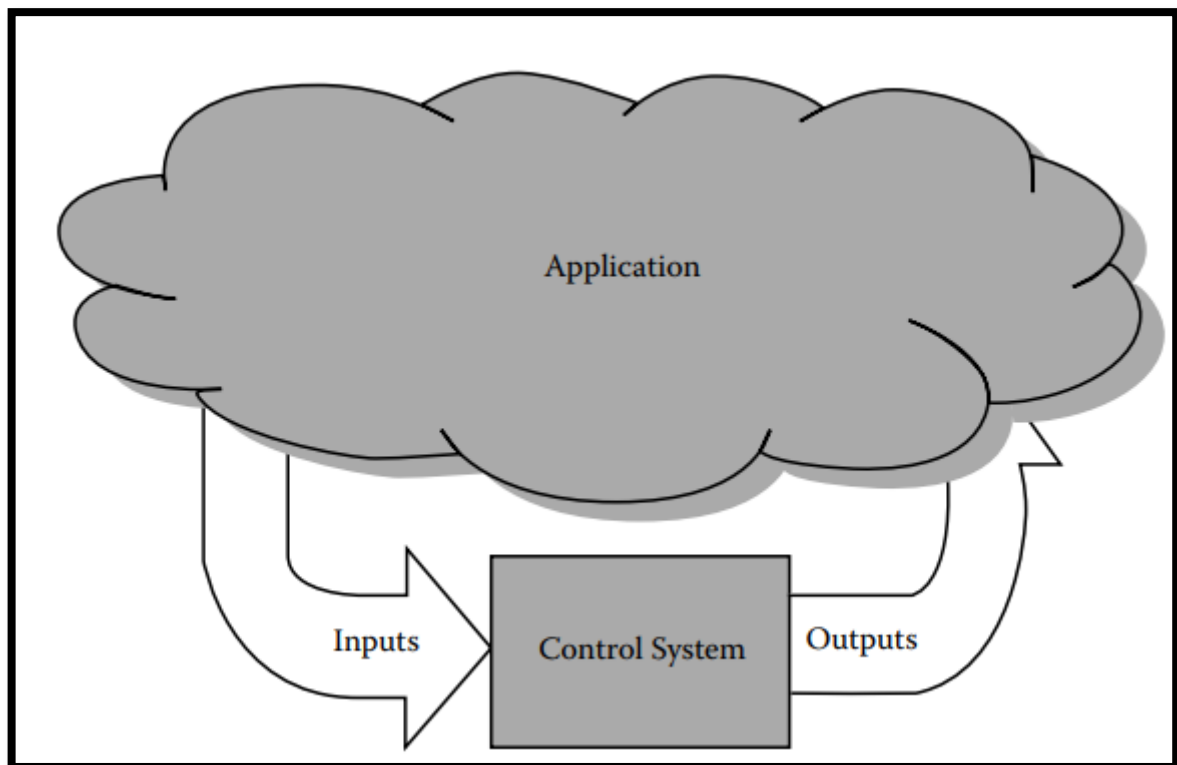


Figura 20-Illustração de um sistema de controle para uma aplicação qualquer.

O sistema de controle recebe um número de estímulos (Entradas) da Aplicação e produz ações (Saídas) para afetar a aplicação. O sistema de controle aplica o controle utilizando condições lógicas simples da forma:

*Se (Condições das Entradas) Então Saídas*

As condições de entrada são expressões lógicas formuladas de acordo com Álgebra Booleana. Alguns exemplos de condições de entrada são:

\*Válvula Aberta

\* Válvula Aberta OR Timer Expirado

\* Válvula Aberta AND Temperatura OK, onde OR e AND são operadores lógicos. Todos os argumentos nestas expressões são valores lógicos, valores Booleanos (VERDADEIRO,FALSO). Este modelo simples é suficiente para descrever o comportamento de sistemas discretos simples. Um dos modelos mais poderosos é a Máquina de Estados Finitos (FSM), que é usada para descrever comportamento em todas as situações que forem descritas pelo projetista.

A máquina de estados finitos introduz o conceito de um estado como informação de sua história passada. Todos os estados representam todas as possíveis situações as quais a máquina de estado pode estar. Portanto, ela contém memória: como a máquina de estado pode ter atingido a situação atual. Assim que se começa a aplicação, o estado transita de tempos e tempos, e desta forma as saídas dependem das entradas e do passado que a máquina de estados percorreu.

Um sistema de controle determina suas saídas baseado nas suas entradas. Se os valores de entrada presentes são suficientes para determinar completamente os valores de saída, o sistema é dito combinacional, e neste caso o conceito de estado não se aplica. Se o sistema de controle precisar de informações adicionais sobre a sequência de mudanças nas entradas para determinar as saídas, este sistema então é dito sequencial. **Seguindo a ideia de circuitos sequenciais, máquina de estados dita é a lógica que dita o comportamento do sistema.**

O funcionamento de uma máquina de estados pode ser descrito na Figura 21:

Fonte: Figura retirada do livro *Modeling Software with Finite State Machines, A Practical Approach*.

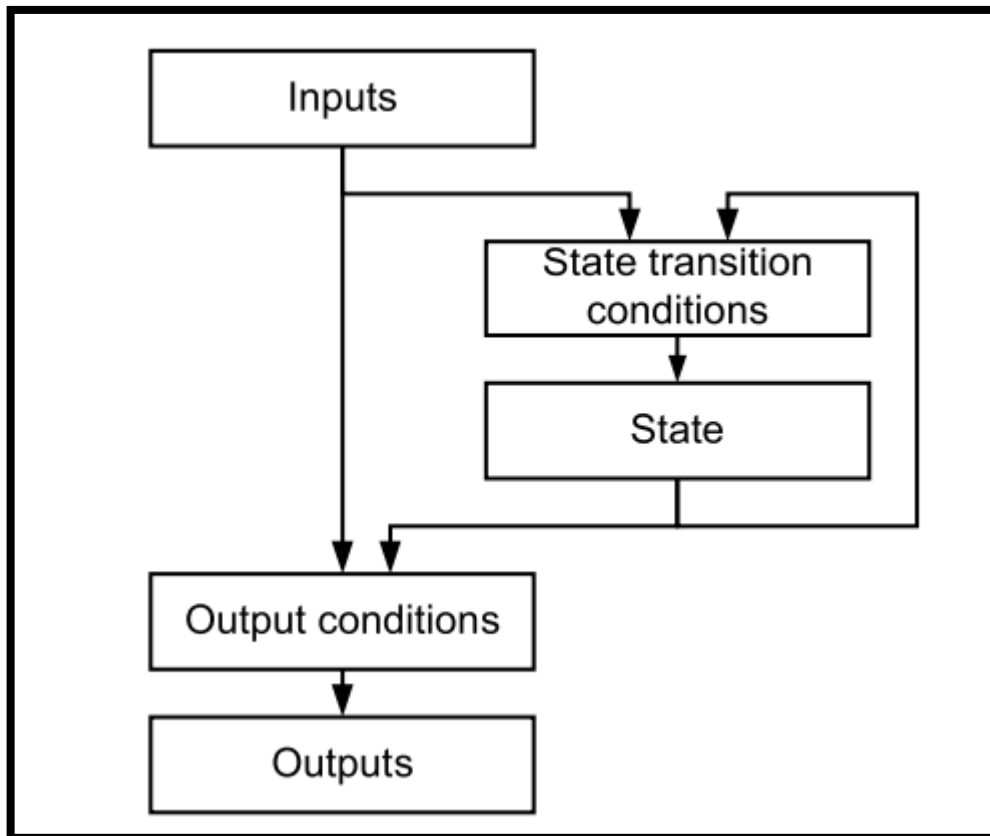


Figura 21 – Ilustração do funcionamento de uma máquina de estados.

A história das mudanças dos valores de entrada para determinar o comportamento da máquina de estados é armazenado em variáveis de estados internas. Tanto as condições para transição entre estados quanto às condições de saída são funções das entradas e do estado atual.

3.4.2 Diagrama de Transição de Estados – O Grafo orientado da Máquina de estados.

O grafo de transição de estados utiliza dois elementos básicos: um círculo que denota um estado e um arco direcionado que denota a transição de um estado A para um estado B. As condições para ocorrência de transições ficam escritas sobre os arcos. O grafo que representa a máquina de estados da bancada desenvolvida neste trabalho encontra-se na Figura 20:



*\*t<sub>7</sub> = temporizador que implementa um timeout do estado S<sub>07</sub>.*

*\*T = variavel que compara a medição da saída da água do bebedouro com 10°C.*

*\*t<sub>5</sub> = temporizador do estado S<sub>06</sub>.*

*\*t<sub>3</sub> = temporizador do estado S<sub>08</sub>.*

*\*T.R. ou t<sub>1</sub> = Tempo de Retirada. Temporizador entre as retiradas de água.*

*\*I = Incremento, variavel incrementada no estado S<sub>05</sub>.*

*\*I.P. = Inicio Programado.*

*\*L.S. = Level Signal.*

*\*T.I. = Tempo de Inicialização.*

### 3.4.3 Descrição dos Estados da FSM:

#### 3.4.3.1 Estado Inicial (S<sub>01</sub>):

O estado S<sub>1</sub> é o estado inicial da FSM, além de ser o estado para o qual o sistema retorna no final dos seus ciclos. Além disso, se o botão Reset for pressionado em qualquer momento da aplicação, portanto em qualquer estado (**RESET Global**), o sistema retornara para o estado S<sub>1</sub>.

Fonte: Figura retirada diretamente do software de Aquisição e Controle em LabVIEW, o qual foi elaborado pelo Autor.



Figura 23-Botão START, presente no Layout Do Usuário VI principal da aplicação.

No estado S<sub>1</sub>, os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”, e neste estado o sistema permanece aguardando que se pressione o botão Start, caso contrário o sistema permanece no estado S<sub>01</sub>.

Caso o botão Start seja pressionado e o botão Início Programado esteja em nível lógico alto, a FSM transita para o estado S<sub>12</sub>.

Caso o botão Start seja pressionado e o botão Início Programado esteja em nível lógico baixo, a FSM transita para o estado S<sub>07</sub>.

### 3.4.3.2 Estado Retira Volume Inicial ( $S_{02}$ ):

Este estado implementa o “Passo 2” do tópico “5.2.1.2 Procedimentos” da norma NBR 16236, que diz o seguinte: “Passo 2: *Imediatamente após, retirar a máxima quantidade de água do aparelho até que a água atinja 10°C. Durante toda a retirada, a água deve estar abaixo de 10°C + 0,5°C. Este volume de água deve ser desconsiderado para os cálculos de capacidade.*”

De agora em diante chamaremos de **Volume Inicial** ao que a norma define como “retirar a máxima quantidade de água do aparelho até que a água atinja 10°C”, trecho citado no parágrafo acima.

O estado  $S_{02}$  responde ao nível lógico do sinal  $T$ . Caso  $T$  esteja em nível lógico alto,  $S_{02}$  transita para  $S_{03}$ , caso contrário  $S_{02}$  permanece no mesmo estado.

No estado  $S_{02}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”, portanto neste estado o sistema retira água do bebedouro até que o sinal  $T$  sinalize que a temperatura na saída do bebedouro atingiu 10°C como pedido no [Passo 2](#) da Seção [2.4.1](#) da norma. Neste instante  $T$  transita para nível lógico alto, e a FSM transita para o estado  $S_{03}$ .

### 3.4.3.3 Estado temporizador primário ( $S_{03}$ ):

Este estado implementa o Passo 3 da Seção [2.4.1](#) da norma NBR 16236, que diz o seguinte: “Passo 3: *Aguardar o ciclo de retirada de água declarado pelo fabricante.*”

Portanto o estado  $S_{03}$  é um simples temporizador. Quando a FSM adentra o estado  $S_{03}$ , um cronômetro é disparado, e, após decorridos  $t_1$  segundos, o sinal  $t_1$  passa para nível lógico alto e então a FSM transita para o estado  $S_{04}$ . Enquanto o sinal  $t_1$  se mantiver em nível lógico baixo a FSM permanece no estado  $S_{03}$ .

No estado  $S_{03}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.4 Estado retira 200mL ( $S_{04}$ ):

Este estado implementa o Passo 4 da Seção 2.4.1 da norma NBR 16236, que diz o seguinte: “Passo 4: Retirar o volume de água declarado pelo fabricante, desde que seja  $\geq 200\text{mL}$ . Durante toda a retirada, a água deve estar abaixo de  $10^{\circ}\text{C} + 0,5^{\circ}\text{C}$ , exceto durante a retirada do volume de descarte.”

Portanto neste estado o sistema retira um volume de água do bebedouro maior ou igual a 200mL. A quantidade exata de água retirada em cada ciclo será definida conforme os parâmetros fornecidos de cada bebedouro para teste, respeitando o requisito mínimo de 200mL por retirada.

No estado  $S_{04}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.5 Estado temporizador secundário ( $S_{05}$ ):

Este estado, de maneira similar ao estado  $S_{03}$ , implementa o Passo 3 da Seção 2.4.1 da norma NBR 16236, com a diferença de que o estado  $S_{03}$  implementa o Passo 3 somente na primeira iteração do ensaio.

A partir da segunda iteração em diante, é o estado  $S_{05}$  que implementa o Passo 3 da Seção 2.4.1 da norma NBR 16236.

No estado  $S_{05}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.3.3.6 Estado sistema rejeitado ( $S_{06}$ ):

Este estado tem o intuito de informar ao usuário do software que o bebedouro ainda não atingiu o regime permanente de refrigeração do líquido dentro dele. Durante o intervalo de tempo em que a FSM permanece dentro deste estado, a string “ $S_{06}$  –Espere o sistema refrigerar o líquido e tente novamente.” é mostrada no layout do software.

Portanto o estado  $S_6$  é um simples temporizador. Quando a F.S.M. adentra o estado  $S_6$ , um cronômetro é disparado, e, após decorridos  $t_5$  segundos, o sinal  $t_5$  passa para nível lógico 1 e então a FSM transita para o estado  $S_1$ . Enquanto o sinal  $t_5$  se mantiver em nível lógico 0 a FSM permanece no estado  $S_6$ .



No estado  $S_6$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.7 Estado volume de descarte ( $S_{07}$ ):

Este estado implementa o Passo 1 da Seção 2.4.1 da norma NBR 16236, que diz o seguinte: “*Após o tempo de inicialização do aparelho, o volume de descarte é coletado e descartado.*”

Portanto este estado tem essencialmente dois objetivos:

1º) O primeiro objetivo deste estado consiste em retirar um volume fixo de água do bebedouro (denominado volume de descarte).

2º) O segundo objetivo deste estado é, após retirado o volume de descarte, a partir da medição atual da temperatura (sinal  $T$ ) da água na saída do bebedouro, decidir se a F.S.M. deve prosseguir com o teste (transição para o estado  $S_2$ ) ou rejeitar a continuidade do teste (transição para o estado  $S_6$ ).

No estado  $S_7$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.8 Estado encher o sistema de água ( $S_{08}$ ):

Este estado tem por objetivo garantir que ao longo do ensaio o bebedouro nunca se esvazie de água, enchendo-o automaticamente uma vez a cada ciclo de retirada.

Logo após uma retirada de água que ocorre no estado  $S_4$ , o sistema transita para o estado  $S_8$  e fica neste por um intervalo de tempo  $t_3$  segundos. Quando  $t_3$  segundos forem decorridos, o sinal  $t_3$  passa para nível lógico 1, e neste instante a F.S.M. transita para o estado  $S_5$ .

No estado  $S_8$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.9 Estado 09 ( ~~$S_{09}$~~ ):

Estado desabilitado. Atualmente este estado não é acessível via nenhum outro estado.

#### 3.4.3.10 Estado encher o sistema de água via Botão ( $S_{10}$ ):

Fonte: Figura retirada diretamente do software de Aquisição e Controle em LabVIEW, o qual foi elaborado pelo Autor.



Figura 24-Botão ENCHER H2O, presente no Layout Do Usuário VI principal da aplicação.

Este estado é usado para que se possa encher o bebedouro de água logo na preparação do ensaio, etapa está em que o bebedouro encontra-se inicialmente vazio.

Este estado é acessível via o botão “ENCHER H2O” como mostra a figura acima, que fica no Layout da aplicação LabVIEW.

No estado  $S_{10}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

#### 3.4.3.11 Estado de calibração ( $S_{11}$ ):

Fonte: Figura retirada diretamente do software de Aquisição e Controle em LabVIEW, o qual foi elaborado pelo Autor.



Figura 25-Botão CALIBRAÇÃO, presente no Layout do Usuário da VI principal da aplicação.

Este estado tem por objetivo realizar a calibração do sistema de medição do volume de água na saída do bebedouro.

Este estado é acessível via o botão “CALIBRAÇÃO” como mostra a figura acima, que fica no Layout de Usuário na aplicação LabVIEW.

No estado  $S_{11}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

### 3.4.3.12 Estado do Tempo de Inicialização ( $S_{12}$ ):

Fonte: Figura retirada diretamente do software de Aquisição e Controle em LabVIEW, o qual foi elaborado pelo Autor.



Figura 26-Botão Início Programado, presente no Layout de Programação da VI principal da aplicação.

Este estado só é acessível se o botão “Início Programado” acima estiver em nível lógico alto. Este botão é acessível pelo Layout de Programação na aplicação.

O Tempo de Inicialização é um parâmetro de etiqueta do bebedouro, ou seja, é um parâmetro usado como input para o ensaio de Capacidade de Refrigeração.

Mais especificamente, o Tempo de Inicialização é o tempo que o bebedouro em questão fica energizado antes da retirada do Volume Inicial, como especificado da Seção 2.4.1 da norma NBR16236.

Portanto este estado é um simples temporizador, cujo tempo esperado é o próprio Tempo de Inicialização.

No estado  $S_{12}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a **“Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado”**.

### 3.4.3.13 Estado retirar o sistema de água via Botão ( $S_{13}$ ):

Fonte: Figura retirada diretamente do software de Aquisição e Controle em LabVIEW, o qual foi elaborado pelo Autor.

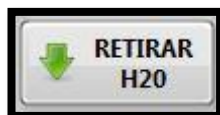


Figura 27-Botão RETIRAR H20, presente no Layout do Usuário da VI principal da aplicação.

Este estado é útil para preparar a bancada em etapas pré-ensaio, por exemplo, para retirar ar de uma linha de suprimento que por ventura exista.

Este estado é acessível via o botão “RETIRAR H20” como mostra a figura acima, que fica no Layout de Usuário na aplicação LabVIEW.

No estado  $S_{10}$ , os sinais de saída que acionam os atuadores do sistema estão conforme a “**Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado**”.

### 3.4.4 Tabelas de transição de Estados:

OBS: Os símbolos entre parêntesis das tabelas abaixo são Inputs.

#### **Tabela de transição de estados para o estado $S_{01}$ :**

(Start)	(Calibrar)	(Encher)	(Retirar)	(I.P.)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	0	0	0	$S_{01}$	$S_{01}$
0	0	0	0	1	$S_{01}$	$S_{01}$
0	0	0	1	0	$S_{01}$	$S_{03}$
0	0	0	1	1	$S_{01}$	$S_{13}$
0	0	1	0	0	$S_{01}$	$S_{10}$
0	0	1	0	1	$S_{01}$	$S_{10}$
0	0	1	1	0	$S_{01}$	$S_{01}$
0	0	1	1	1	$S_{01}$	$S_{01}$

0	1	0	0	0	$S_{01}$	$S_{11}$
0	1	0	0	1	$S_{01}$	$S_{11}$
0	1	0	1	0	$S_{01}$	$S_{01}$
0	1	0	1	1	$S_{01}$	$S_{01}$
0	1	1	0	0	$S_{01}$	$S_{01}$
0	1	1	0	1	$S_{01}$	$S_{01}$
0	1	1	1	0	$S_{01}$	$S_{01}$
0	1	1	1	1	$S_{01}$	$S_{01}$
1	x	x	x	0	$S_{01}$	$S_{07}$
1	x	x	x	1	$S_{01}$	$S_{12}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{02}$ :

(Reset)	(T)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{02}$	$S_{02}$
0	1	$S_{02}$	$S_{08}$
1	X	$S_{02}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{03}$ :

(Reset)	( $t_1$ )	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{03}$	$S_{03}$
0	1	$S_{03}$	$S_{04}$
1	X	$S_{03}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{04}$ :

(Reset)	(LS)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{04}$	$S_{04}$
0	1	$S_{04}$	$S_{08}$
1	X	$S_{04}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{05}$ :

(Reset)	(I)	( $t_4$ )	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	0	$S_{05}$	$S_{05}$
0	0	1	$S_{05}$	$S_{04}$
0	1	0	$S_{05}$	$S_{05}$
0	1	1	$S_{05}$	$S_{01}$
1	X	X	$S_{05}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{06}$ :

(Reset)	( $t_5$ )	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{06}$	$S_{06}$
0	1	$S_{06}$	$S_{01}$
1	X	$S_{06}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{07}$ :

(Reset)	(T)	( $t_7$ )	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	0	$S_{07}$	$S_{07}$
0	0	1	$S_{07}$	$S_{06}$
0	1	X	$S_{07}$	$S_{02}$
1	X	X	$S_{07}$	$S_{01}$

Tabela de transição de estados para o estado  $S_{08}$ :

(Reset)	( $t_3$ )	(Flag)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	0	$S_{08}$	$S_{08}$
0	0	1	$S_{08}$	$S_{08}$
0	1	0	$S_{08}$	$S_{05}$

0	1	1	$S_{08}$	$S_{03}$
1	X	X	$S_{08}$	$S_{01}$

**Tabela de transição de estados para o estado  $S_{10}$ :**

(Reset)	(Encher)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{10}$	$S_{01}$
0	1	$S_{10}$	$S_{10}$
1	X	$S_{10}$	$S_{01}$

**Tabela de transição de estados para o estado  $S_{11}$ :**

(Reset)	(Calibração)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{11}$	$S_{01}$
0	1	$S_{11}$	$S_{11}$
1	X	$S_{11}$	$S_{01}$

**Tabela de transição de estados para o estado  $S_{12}$ :**

(Reset)	(T. I.)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{12}$	$S_{12}$
0	1	$S_{12}$	$S_{07}$
1	X	$S_{12}$	$S_{01}$

**Tabela de transição de estados para o estado  $S_{13}$ :**

(Reset)	(Retirar)	Estado Atual	Próximo Estado
0	0	$S_{13}$	$S_{01}$
0	1	$S_{13}$	$S_{13}$
1	X	$S_{13}$	$S_{01}$

## 3.4.5 Tabela dos Sinais de Saída (Atuadores) em cada Estado:

<i>Estado Atual</i>	<i>Saída01 (SV<sub>01</sub>)</i>	<i>Saída 02 (SV<sub>02</sub>)</i>	<i>Saída 03 (SV<sub>03</sub>)</i>	<i>Saída 04 (Prop.V.)</i>	<i>Saída 05 (Hydraulic Pump)</i>
$S_{01}$	0	1	0	0	0
$S_{02}$	1	1	1	1	1
$S_{03}$	0	1	0	1	1
$S_{04}$	1	0	1	1	1
$S_{05}$	0	1	0	1	1
$S_{06}$	0	1	0	1	1
$S_{07}$	1	1	1	1	1
$S_{08}$	0	1	1	1	1
$S_{10}$	1	1	1	1	1
$S_{11}$	1	0	1	1	1
$S_{12}$	0	0	0	1	1
$S_{13}$	1	1	1	1	1

Para ter uma visão global de como estes atuadores ( $SV_{01}$ ,  $SV_{02}$ ,  $SV_{03}$ , *Prop.V.*, *Hydraulic Pump*) interagem, reveja a Figura 03 apresentada na Seção 2.5.



### 3.5 Desenvolvimento do Software em plataforma LabVIEW

Neste capítulo será feita uma breve discussão sobre o desenvolvimento do software em plataforma LabVIEW que integra e comanda todos os módulos de aquisição e controle da bancada do presente trabalho.

#### 3.5.1 Display do Software

O Display do software está dividido em duas partes, o “Layout de Usuário” e o “Layout de Programação”, enquanto o Layout de Usuário é utilizado pelos usuários da bancada inserir no software inputs referentes à receita de teste do bebedouro a ser certificado, o Layout de Programação é utilizado para modificar estruturas importantes de funcionamento do software, como taxa de aquisição dos módulos de aquisição, tempos de temporizados, definição de limites máximos e mínimos de sinais de controle, entre outros parâmetros.

Fonte: Elaborado pelo Autor, figura retirada do software da bancada.

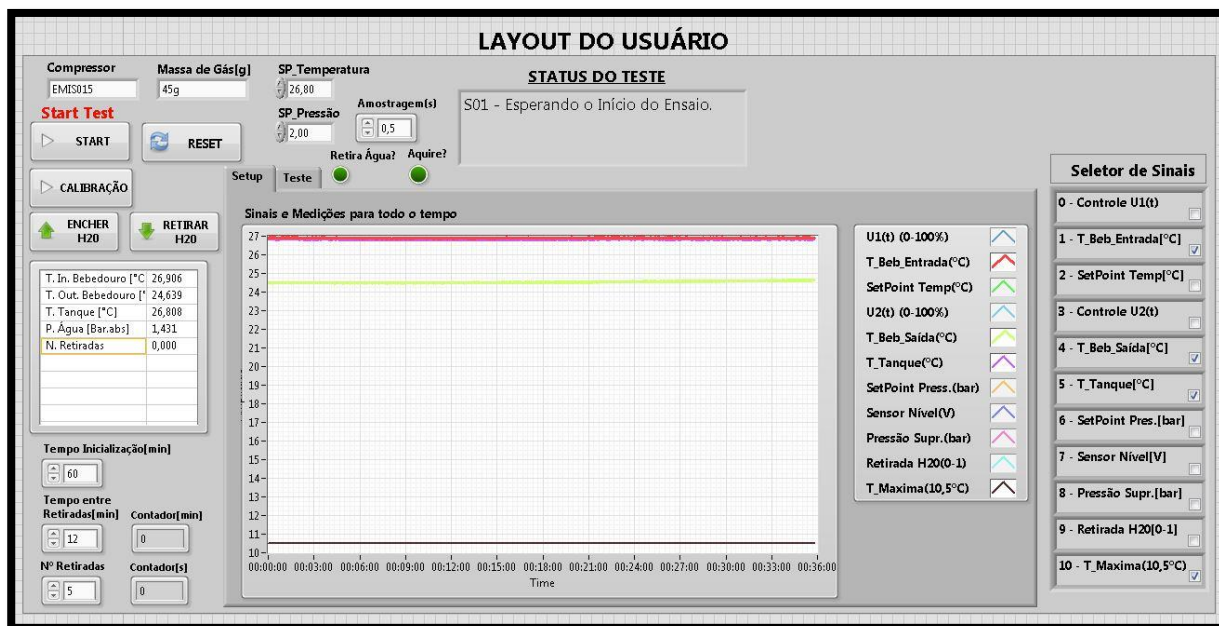


Figura 28-Layout de Usuário da software desenvolvido em plataforma LabVIEW.

Na Figura 28 tem-se uma imagem da Layout de Usuário desenvolvido em plataforma LabVIEW. Pode-se ver na imagem à esquerda uma série de botões cujas funcionalidades foram explicadas na Seção 3.4.3. Pode-se ver na parte superior

deste Layout que o usuário tem a liberdade de editar os parâmetros de Set Point de Temperatura, Set Point de Pressão e a Taxa de aquisição do sistema de aquisição.

Ainda à esquerda do Layout de Usuário, na parte inferior pode-se ver três parâmetros com os nomes “Tempo de Inicialização[min]”, “Tempo entre Retiradas[min]” e “Nº de Retiradas”, que são Inputs importantes para configurar o software para preparar o ensaio de Capacidade de Refrigeração, conforme descrito na Seção 2.4.1.

Na parte central do Layout de Usuário existe uma estrutura gráfica que constrói ao longo do tempo os sinais que estão sendo aquisitados pelo software, sinais de temperatura, pressão, e tensão dentre outros.

Na parte a direita do Layout de Usuário existe um seletor de sinais, para que o usuário possa escolher em tempo real qual dos sinais aquisitados ele deseja ver no momento pelo gráfico central.

Fonte: Elaborado pelo Autor, figura retirada do software da bancada.

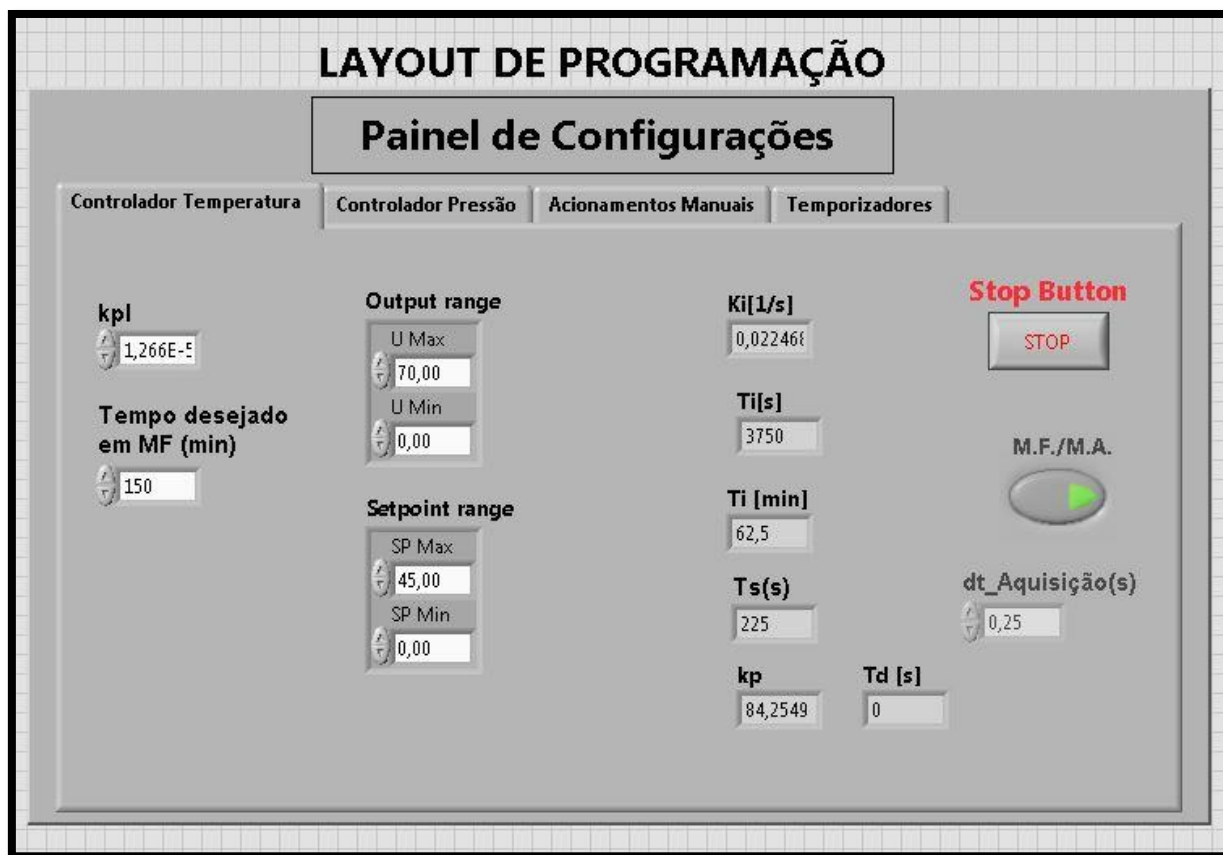


Figura 29-Layout de Programação da software desenvolvido em plataforma LabVIEW.

Na Figura 29 tem-se uma imagem da Layout de Programação desenvolvido em plataforma LabVIEW. Repare que neste layout existem as abas “Controlador Temperatura”, “Controlador Pressão”, “Acionamentos Manuais” e “Temporizadores”, cada uma destas abas contém variáveis que podem ser modificadas para reconfigurar comportamentos estruturais do software, como por exemplo limites máximos e mínimos de sinais de controle, características de temporizadores, ganhos de controladores, entre outros.

Ainda na Figura 29, repare que a aba que está em evidencia é a “Controlador Temperatura”, que pode ser utilizada para modificar os parâmetros do Controlador de Temperatura da água do tanque da bancada. Nesta aba pode-se modificar os parâmetros de projeto do controlador de temperatura (os ganhos do PI), e os limites do sinal de controle.

Nas demais abas que não foram explicitadas, configurações parecidas à da Figura 29 existem. O propósito deste tópico é mostrar que existe um Layout para que o programador possa reconfigurar pontos importantes estruturais da bancada, e não citá-los um a um, portanto não será mostrado as demais abas de configuração deste Layout.

### 3.5.2 Fluxo de Dados do Software

A seguir apresentaremos uma figura que ilustra como os dados trafegam pelo software:

Fonte: Elaborado pelo Autor, figura retirada do software da bancada.

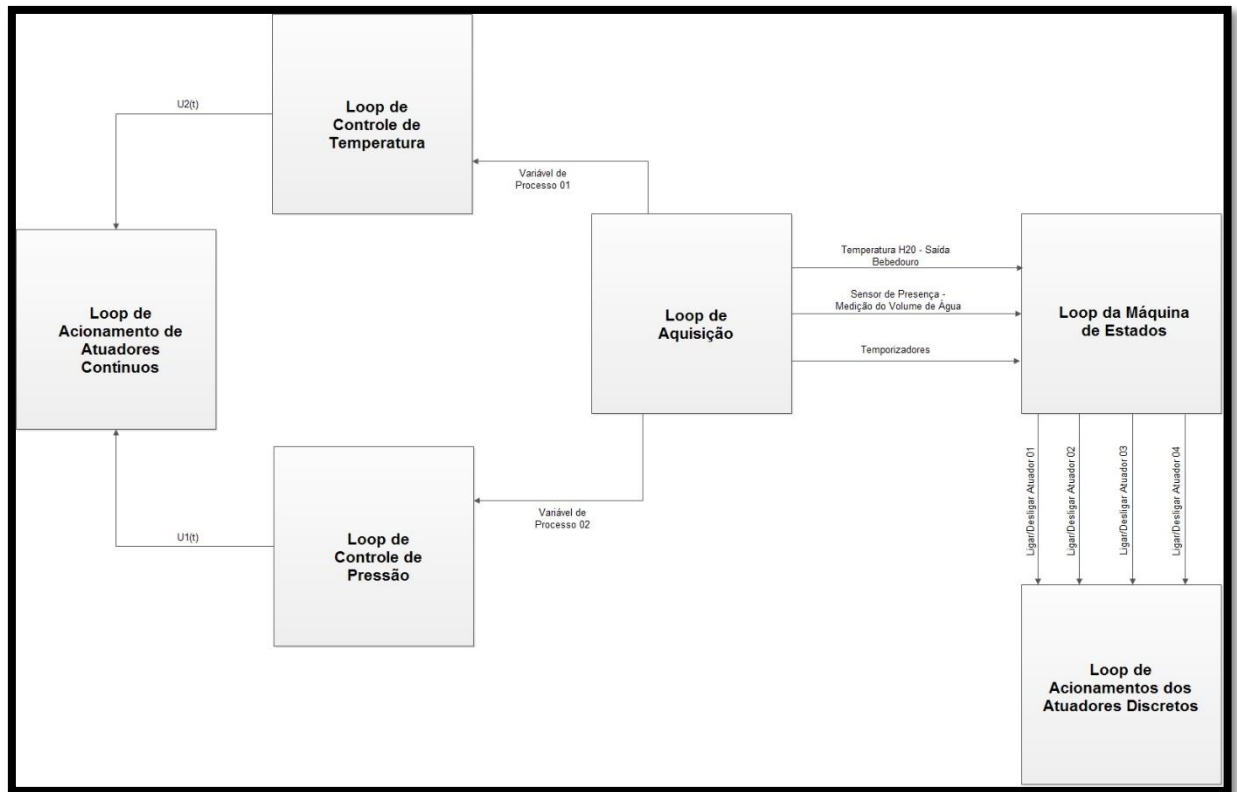


Figura 30-Diagrama que representa o fluxo de dados dentro do software.

A Figura 29 descreve como os dados trafegam pelo software. No software existe uma estrutura principal que se comunica diretamente ou indiretamente com todos os outros módulos, que é o módulo de aquisição, ou mesmo “Loop de Aquisição”, como está ilustrado na figura acima.

O Loop de Aquisição é o módulo que realiza a medição de todos os sinais que estão sendo medidos da bancada, sendo eles sinais de temperatura, pressão ou tensão. Este loop se comunica diretamente com outros três módulos, o “Loop de Controle de Temperatura”, o “Loop de controle de Pressão” e o “Loop da Máquina de Estados”. Estes três outros loops tem a característica em comum de receber um ou mais sinais aquisitados e construídos do Loop de Aquisição, e, com estes sinais recebidos, realizar algum cálculo e colocar na saída um ou mais outputs para outros módulos.

O Loop de Controle de Temperatura recebe o valor atual da variável de processo 01, com este valor o sinal de controle atualiza seu valor segundo o cálculo

realizado pela sua lei de controle, e coloca na saída deste loop o valor atual do sinal de controle  $u_1(t)$ .

O Loop de Controle de Pressão recebe o valor atual da variável de processo 02, com este valor o sinal de controle atualiza seu valor segundo o cálculo realizado pela sua lei de controle, e coloca na saída deste loop o valor atual do sinal de controle  $u_2(t)$ .

O Loop da Máquina de estados recebe três sinais importantes. Um sinal é a temperatura da água na saída do bebedouro em teste, outro sinal é o nível lógico do transdutor de presença, e o último sinal é um incremento de tempo (dt) utilizado para sincronizar as estruturas de tempo dentro do Loop de Aquisição de o Loop da Máquina de estados, este sinal (dt) é importante para a construção dos temporizadores da bancada. Desse módulo saem quatro saídas.

O Loop de Acionamentos dos Atuadores Discretos recebe como entrada as quatro saídas do Loop da Máquina de Estados e envia estes valores para o hardware dedicado a módulo, estes quatro inputs dizem para o loop de acionamentos dos atuadores discretos quais atuadores devem ser ligados, e quais devem ser desligados naquele exato momento, por exemplo: ligar  $SV_{01}$ , e desligar  $SV_{02}$ ,  $SV_{03}$  e *Hydraulic Pump*.

Por fim tem-se o Loop de Acionamentos de Atuadores Contínuos. Este módulo recebe os sinais de controle  $u_1(t)$  e  $u_2(t)$ , transforma-os para sinais de tensão, e aplica estes valores de tensão nas saídas dos canais físicos da placa de saída de tensão analógica da bancada. Em última análise, estes são os sinais de tensão que regulam o funcionamento dos atuadores analógicos da bancada, que são a Válvula Proporcional e a Carga Resistiva interna ao tanque de água.

**Observação:** Embora boa parte do trabalho desenvolvido seja voltado para o desenvolvimento deste software em plataforma LabVIEW (cerca de metade das horas de trabalho foram voltadas para o desenvolvimento do software), não entraremos em detalhes de implementação do código, a apresentação de funcionamento do software, do fluxo de dados e da interface para o usuário é suficiente para entender a estrutura e o papel do software para a bancada, pois para entrar em detalhes técnicos de implementação deste software, é possível que um

documento da mesma proporção que este surgiria somente para explicar sua plena construção e funcionamento.

## 4 HARDWARES UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO E CONTROLE

### 4.1 Um Chassi CompactDAQ USB de 8 Slots

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS(2017).



Figura 31- Chassi CompactDAQ USB de 8 Slots.

#### 4.1.1 Sistemas CompactDAQ

“O CompactDAQ é uma plataforma portátil de aquisição de dados de alta robustez, com E/S modulares que integram conectividade e condicionamento de sinais para proporcionar interfaceamento direto a qualquer sensor ou sinal elétrico. Você pode usar o CompactDAQ e o software LabVIEW para definir facilmente a sua própria maneira de adquirir, analisar, apresentar e gerenciar os dados de suas medições. Da pesquisa até o desenvolvimento e a validação, a NI oferece software programável, medições de alta exatidão e suporte técnico local, para garantir o atendimento completo dos requisitos de sua aplicação.” - NATIONAL INSTRUMENTS(2017).

#### 4.1.2 Chassis e controladores CompactDAQ

“Os chassis e controladores CompactDAQ controlam a temporização, sincronização e transferência de dados entre até 14 módulos de E/S da Série C e um computador, externo ou integrado. Um único chassi ou controlador CompactDAQ pode gerenciar vários mecanismos de temporização para executar até sete tarefas independentes de E/S temporizadas por hardware, em diferentes taxas de amostragem no mesmo sistema. Por exemplo, você pode instalar um módulo de termopar de 75 S/s junto a um módulo de acelerômetro de 51,2 kS/s e fazer a aquisição nesses dois módulos simultaneamente.” - NATIONAL INSTRUMENTS(2017).

#### 4.2 Dois Módulos NI 9219 - Universal Analog Input

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS(2017).



Figura 32-Módulo de entrada analógica universal tipo NI 9219, com integração às tecnologias CompactDAQ ou CompactRIO.



“Hardware de entrada analógica para medições de tensão, corrente, temperatura e deformação em sistemas CompactDAQ ou CompactRIO. Os módulos de entradas analógicas universais são indicados para medições de uso geral, incluindo suporte integrado para medições com acelerômetros, sensores com alimentação, medições de ponte completa e medições de tensão, além de medições de quarto de ponte, meia ponte, 60 V e corrente, utilizando adaptadores específicos para essas medições. É possível também escolher opções para medir sinais de sensores como strain gages, detectores de temperatura por resistência (RTDs), termopares, células de carga e outros sensores que exigem alimentação.” NATIONAL INSTRUMENTS(2017).

#### 4.3 Um módulo NI 9472 – Digital Outputs

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS(2017)



Figura 33-Módulo de saídas digitais tipo NI 9472, com integração às tecnologias CompactDAQ ou CompactRIO.

#### 4.4 Um módulo NI 9263 – Analog Outputs

Fonte: Figura retirada diretamente do site da National Instruments <http://www.ni.com/pt-br/shop.html>.



Figura 34-Módulo de saída de tensão da Série C, ±10 V, 100 kS/s/canal simultâneo, 4 canais.

Módulo usado para saída de tensão analógica. A implementação das malhas de controle (temperatura e umidade) deram-se através deste módulo. O NI-9263 é um módulo de saída analógica com atualização simultânea. Esse módulo oferece proteção contra sobretensão, proteção contra curto-circuito, baixo crosstalk, rápida taxa de variação, alta exatidão relativa e calibração rastreável à NIST. Além disso, o módulo inclui uma barreira de isolamento dupla entre canais e o terra do sistema, para aumentar a segurança e a imunidade ao ruído.

## 5 COMPONENTES UTILIZADOS NA BANCADA E DIAGRAMAS DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

### 5.1 Dispositivos de Segurança

#### 5.1.1 Contactor Siemens 3TF30

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.



Figura 35-Visão frontal de um contactor tipo Siemens 3TF30.

Este contactor é utilizado para proteger o tanque de um possível sobreaquecimento da carga resistiva. Caso a temperatura interna da água passe de um determinado valor (ficou estipulado em 38°C no software). Para mais detalhes de montagem verificar na [Figura 56](#).

Segue abaixo uma tabela com as especificações deste componente:

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

Technical data							
Type	3TH30			3TX40..			
Standards	IS/IEC 60947-5-1						
Rated Operational Voltage	690V						
Rated Impulse withstand voltage	8kV						
Permissible ambient temp.	Storage	-50 to +80°C					
	Service	-25 to +55°C					
Mechanical endurance cycles	30 mill			10 mill			
Rated operating current Ie/AC12	16A			10A			
Rated operating current Ie/AC15/AC14 at operating voltage	230V	10A			5.6A		
	415V	4A			3.6A		
	690V	2A			1.8A		
Rated operating current Ie/DC13 at operating voltage	Current paths in series			Current paths in series			
		1	2	3	1	2	3
	24V	10 A	10A	10A	10 A	10A	10A
	110V	0.9 A	2.5A	10A	0.8 A	3.8A	10A
	220V	0.45A	0.75A	2A	0.2 A	0.85A	2A
440V	0.2 A	0.5A	0.9A	0.11A	0.2A	0.5A	
Coil Voltage tolerance	0.8 to 1.1 x Ue						
Rated coil input							
AC operated, 50Hz	Closing VA/p.f.	68 / 0.82					
	When closed VA/p.f.	10 / 0.29					
DC operated Closing=when closed	W	6.2					
Frequency of operation at AC15/DC13 duty	cycles/hr	3600					
Short circuit protection							
HRC fuse-links	16A			16A			
Miniature circuit breakers, (C-char.)	16A			10A			
Degree of protection	IP 20						

Figura 36-Tabela com as especificações do componente Siemens 3TF30.

### 5.1.2 Termostato Mecânico de Temperatura – Thermic

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

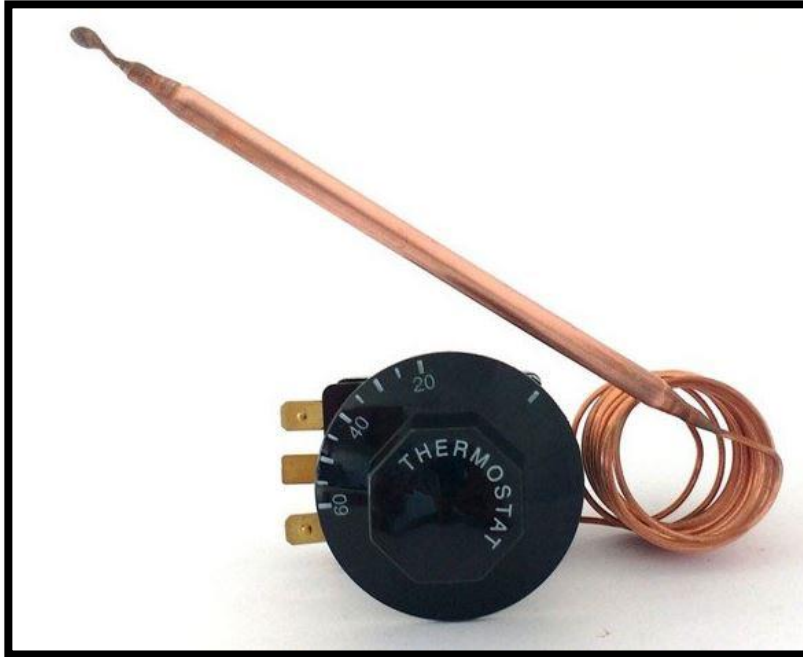


Figura 37-Termostato empregado na bancada.

O termostato é usado no dispositivo como protetor térmico, caso a temperatura interna do tanque de água ultrapasse o valor cujo termostato está calibrado, abre-se o contato da alimentação da resistência para proteger o sistema.

#### **CARACTERÍSTICAS GERAIS DO TERMOSTATO DE TEMPERATURA**

- Contato elétrico com sistema fechado NF ou aberto NA/NF;
- Escalas: 0/40°C, 0/60°C, 0/90°C, 20/120°C, 50/200°C e 50/300°C;
- Tensão até 250 V;
- Amperagem: 30<sup>a</sup> / 250- VCA;
- Terminais de ligação: com encaixe do terminal Faston ou com parafuso;
- Parafuso de fixação 5/32 em aço carbono zincado;
- Botão regulador em PVC;
- Corpo do Termostato de temperatura em baquelite;

- Tampa em aço carbono zincada;
- Dimensões caixa com botão: 45 mm x 36 mm x 60 mm

## 5.2 Atuadores e Dispositivos eletrônicos de acionamento

### 5.2.1 Acoplador a Relé RS30

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.



Figura 38-Acopladores a Relé RS30 utilizados, com um contato Normalmente Aberto e Alimentação 24VCC.

Detalhes de ligação do elemento acima estão na [Figura 56](#). Especificações do componente seguem:

- Corrente nominal das bobinas: 45mA (12Vcc), 21mAcc/33mAca (24Vca/cc) 8,5mAcc/16mAca (110Vca), 5mAcc/10mAca (220Vca).
- Máxima tensão/corrente de comutação: 250Vca / 5A.
- Mínima tensão/corrente de comutação:  $\geq 12V$  / 10mA.
- Corrente de pico instantâneo: 14A.
- Máxima potência de comutação: 1250VA.
- Isolação galvânica entrada/saída: 2kVca.
- Máxima frequência de operação sem carga: 15Hz.
- Máxima frequência de operação com carga máxima: 0,833Hz.
- Conexão dos fios por abraçadeira/parafuso.
- Para montagem em trilhos TS 32 e TS 35.



- Vida mecânica: 30x106.
- Temperatura de operação: 0 a 45°C.
- Comprimento: 70mm.
- Altura:
  - 2 reversíveis: 64,5mm (TS 35) ou 69mm (TS 32).
  - Demais modelos: 51,5mm (TS 35) ou 56mm (TS 32).
- Largura:
  - 1NA ou 1NF: 12mm.
  - 1 reversível: 20mm.
  - 2NA ou 2NF ou 1NA/NF ou 2 reversíveis: 25mm.

### 5.2.2 Relé de Estado Sólido Opto 22 Modelo 5126 – Componente utilizado para regular a potência da Carga Resistiva

Fonte: Opto22(2017)



Figura 39- Relé de Estado Sólido Opto 22 Modelo 5126.

Fonte: OMRON(2017).

<b>SPECIFICATIONS</b>	
<b>SOLID STATE RELAY</b>	
Model <u>5126</u>	
Customer P/N (Ref.) _____	
Current Rating (Amps)	Continuous (RMS) <u>3</u>
	1 Cycle Surge (Peak) <u>20</u>
	1 Second Surge (Peak) <u>6</u>
A. C. Line Voltage	<u>240</u> Volts
Peak Repetitive Voltage	<u>500</u> Volts
Operating Voltage Range	<u>24-280</u> Volts
Opto - Isolation	<u>2500</u> VAC
Operating Temp. Range	<u>-40°C to +100°C</u>
Contact Voltage Drop	V Nominal <u>1.2</u> V Max. <u>1.6</u>
Operating Frequency	<u>47 - 65</u> Hz
Turn-On Time	<u>1/2 cycle Max. - Zero Voltage</u>
Turn-Off Time	<u>1/2 cycle Max. - Zero Current</u>
DV/DT-Off State	V/microsecond <u>200</u>
Built-in Snubber	Sized for F.L. @ <u>.5</u> p.f. lagging
Off-State Leakage	<u>5</u> ma A.C. @ <u>240</u> VAC
Pickup Voltage	<u>4</u> VDC (16 VDC Max. Allowed)
Dropout Voltage	<u>1</u> VDC
Input Impedance	<u>440</u> Min.
Operating Life	<u>10<sup>7</sup></u> minimum cycles
Special	All plastic case
Type Pkg.	Power _____ P-Series _____

REFER TO P240D2 THERMAL CURVES FOR RATING DATA.	
---	--

5842 Research Drive Huntington Beach, California 92649 (714) 892-3313	
---	--

Revised 6/22/79	
-----------------	--

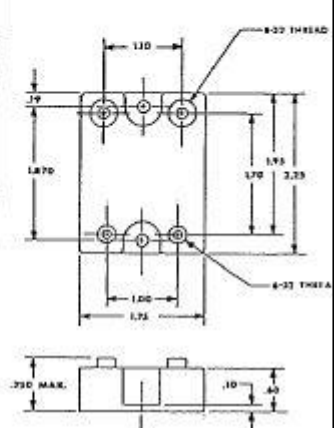


Figura 40-Especificações do SSR Opto22 - 5126.

**O que é um SSR (Solid State Relay)?**

O relê de estado sólido, ou em inglês Solid State Relay (SSR), é um relê que não possui um contato com movimentação mecânica. Em termos de operação, SSRs não são muito diferentes de relês eletromecânicos que tem um contato que se movimenta. Entretanto, SSRs empregam semicondutores para realizar o chaveamento, tais como tiristores, triacs, diodos, e transistores.

Por não oferecer desgaste mecânico, os SSRs possuem uma vida útil muito longa, seu controle é eletrônico, de baixo consumo e alta velocidade de acionamento.

Fonte: OMRON(2017).

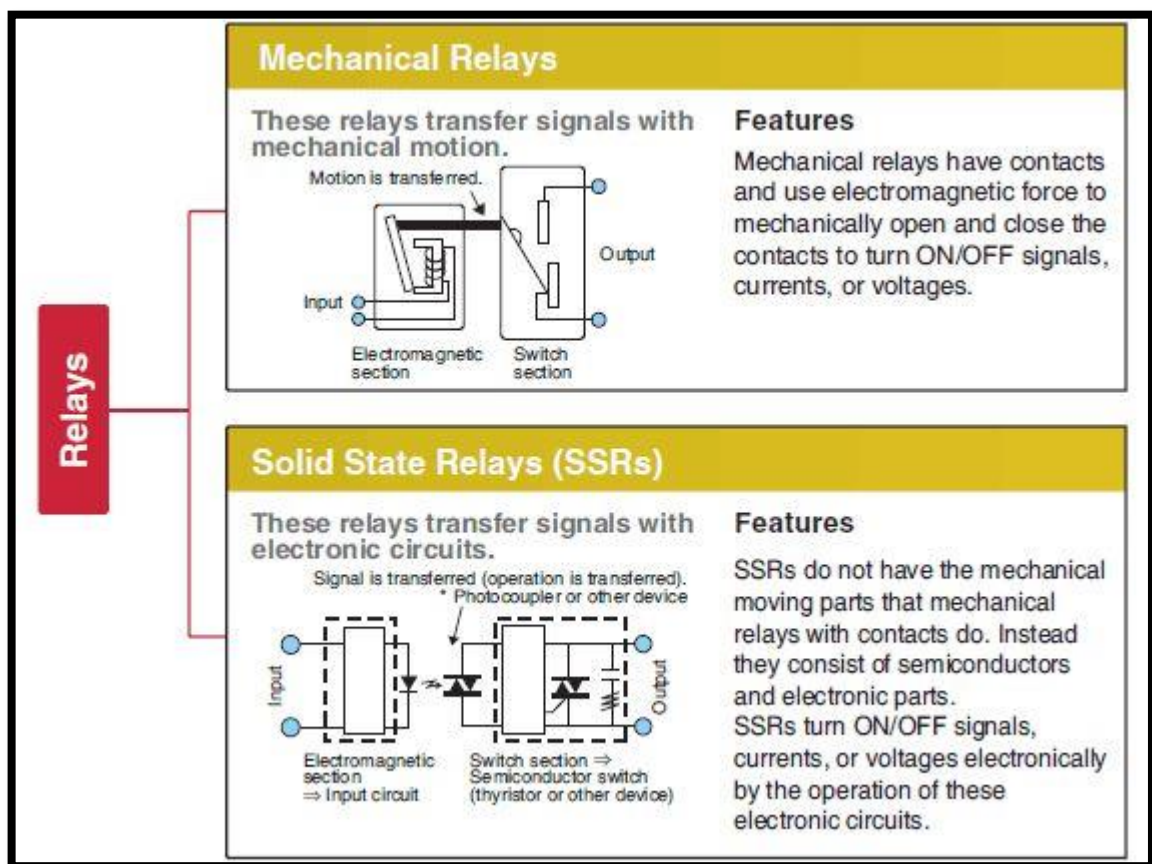


Figura41- Nesta figura tem-se um comparativo entre relês eletromecânicos convencionais e SSRs.

Fonte: Figura adaptada do fabricante Omron em <https://www.ia.omron.com/support/guide/18/introduction.html>.

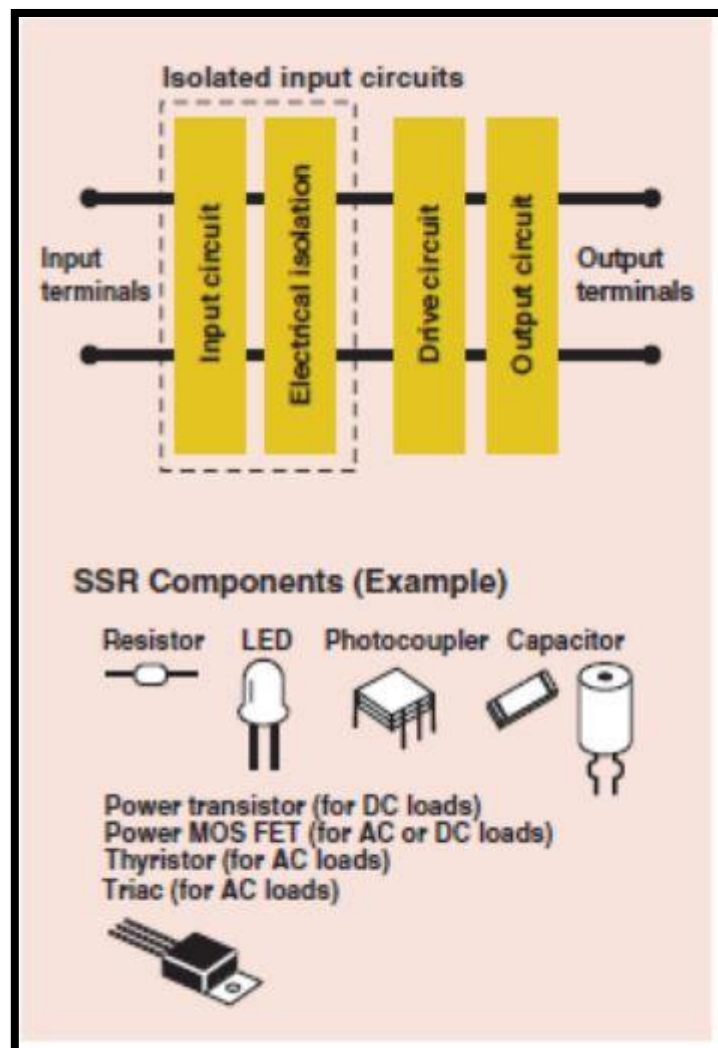


Figura 42- Nesta figura podem-se ver as diferentes camadas de aplicação dentro de um circuito SSR. É interessante notar que a camada do “Driver Circuit” pode variar sua construção dependendo do tipo de carga que vão ser conectada à saída, cargas resistivas e cargas indutivas requerem diferentes circuitos de chaveamento.

### 5.2.3 Válvula Proporcional Eletrônica Bürkert

Fonte: BURKERT(2017)



Figura 43-Válvula Eletrônica Proporcional utilizada na bancada para controle da pressão de suprimento de água nos bebedouros em teste.

Esta válvula foi empregada no sistema de controle de pressão. Ela é uma válvula proporcional com acionamento eletrônico, aceita um sinal de  $u_2(V)$ : 0 – 10V e de acordo com a amplitude deste sinal a válvula reage com uma abertura de secção proporcional.

No diagrama ilustrado na Figura 03 da Seção 2.5 referenciamos este atuador na legenda da figura como **Prop. V.**

Segue uma breve descrição da válvula direto do fabricante:

*“A válvula proporcional de ação direta tipo 2833 pode ser utilizada como atuador para a regulação de processos, sendo indicada para o vácuo técnico. A histerese reduzida, a reprodutibilidade elevada, o alcance de medição ímpar e a excelente sensibilidade de resposta garantem um comportamento de regulação eficaz. A válvula fecha hermeticamente graças a uma junta de assento em elastômero.” – BÜRKERT(2017)*

#### 5.2.4 Válvula Solenoide Danfoss EVR3 – Duas Vias

Fonte: Danfoss(2017).



Figura 44 –Ilustração de uma das vistas da Válvula Solenoide duas vias usada na bancada.

Fonte: Danfoss(2017).



Figura 45- Ilustração de uma das vistas da Válvula Solenoide duas vias usada na bancada.



Fonte: Danfoss(2017).



Figura 46- Ilustração de uma das vistas da Válvula Solenoide duas vias usada na bancada.

Fonte: Danfoss(2017).

Type	EVR3
Weight	0,487 [kg]
Actuator system [mm]	13,5 mm
Ambient temperature [°C]	-40 - 80 °C
Ambient temperature range [°F]	-40 - 175 °F
Approval	GOST AN30
Coil type	BE230AS
Cv value [gal/min]	0,32
Direction	Straightway
EAN number	5702428093224
Function	N C
Identical product	032F2302
Inlet size [in]	1/4 IN
Inlet type	SOLDER, ODF
Kv value [m³/h]	0,27
Manual Operation	No
Max. Working Pressure [bar]	45,2 bar
Max. Working Pressure [psig]	655 psig
Medium temperature range [°C]	-40 - 105 °C
Medium temperature range [°F]	-40 - 221 °F
Min. ODP [bar]	0,000 bar
MOPD [bar/psi]	Coil Dependend
Orifice size	3,30
Outlet size [in]	1/4 IN
Outlet type	SOLDER, ODF
Pack format	Multi pack
Quantity per pack format	24 pc
Refrigerant(s)	CFC
Refrigerant(s)	HCFC
Refrigerant(s)	HFC
Standard product	Yes
Type designation	Solenoid valve, Solder

Figura 47 - Tabela com as especificações e faixas de operação indicadas para a Válvula Danfoss.

Na Figura 03 da seção 2.5 referenciamos este atuador na legenda da figura como  $SV_{01}$  e  $SV_{02}$ , pois tem-se duas valvulas deste tipo na bancada.

### 5.2.4 Válvula Solenoide Parker Série 30 – Três Vias

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

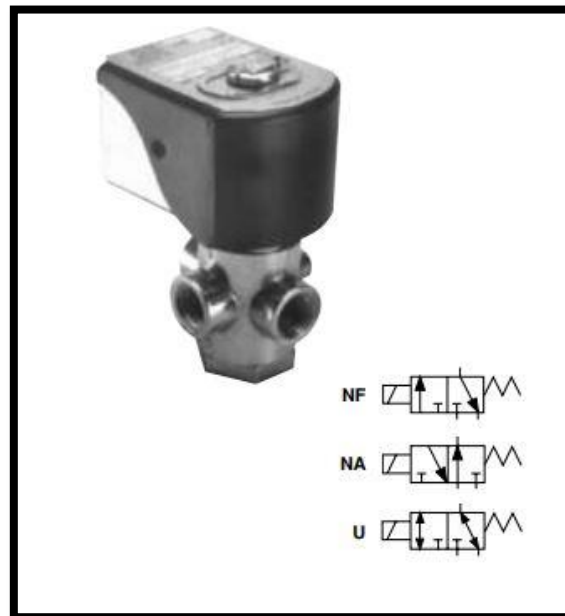


Figura 48-Válvula de 3 vias usada na bancada.

Na Figura 03 da seção 2.5 referenciamos este atuador na legenda da figura como **SV<sub>03</sub>** .

#### **Características gerais da válvula:**

- Três vias - ação direta
- Normalmente fechada, normalmente aberta e universal
- 1/8" e 1/4" NPT/BSP
- Aplicação: ar, gás, água e óleos leves

Válvula ideal para o controle de dispositivos operados por pressão ou para o desvio e seleção de fluxos. São utilizadas em uma grande variedade de aplicações:

- Sistemas automatizados;

- Sistemas de pesagem;
- Instrumentação;
- Operadores piloto;
- Equipamentos de lavanderia;
- Compressores;
- Tratamento de água;
- Secadores de ar.

Na bancada desenvolvida, essa válvula é responsável por desviar o fluxo de água que hora supre o bebedouro e hora recircula para dentro do tanque, com o intuito de nunca deixar água estagnada na mangueira de suprimento.

#### 5.2.5 Bomba Hidráulica 12V DC Sem Escovas

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.



Figura 49-Bomba Hidráulica 12V DC Sem Escovas.

Na Figura 03 da seção [2.5](#) referenciamos este atuador na legenda da figura como ***Hydraulic Pump***.

Especificações da bomba:

\*Modelo: DC40-1250

\*Sem escovas.

\*Tensão: 12V DC.

\*Potência: 13.5W

\*Vazão Máxima: 700L/H

Dimensões da bomba:

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

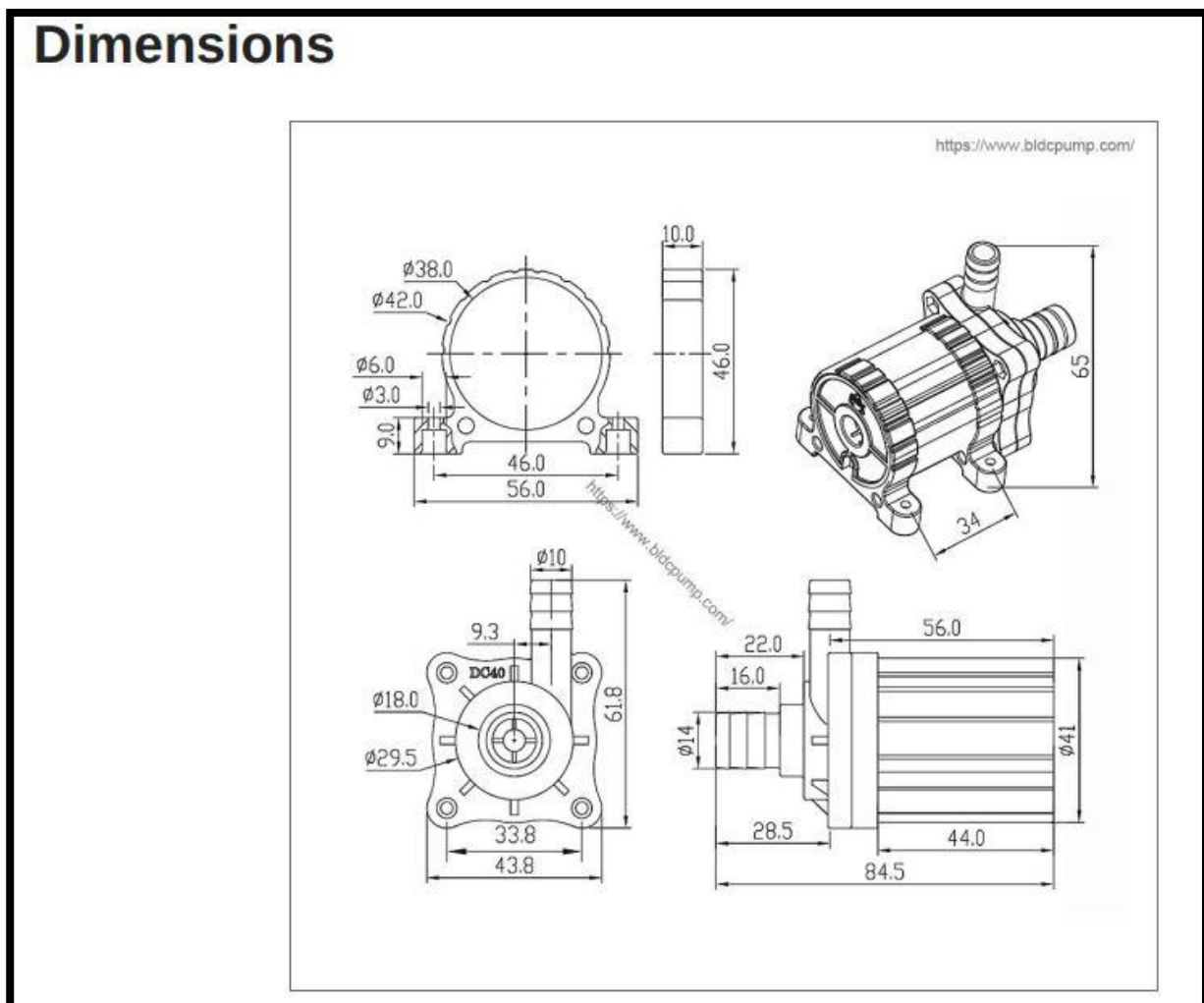


Figura 50-Dimensões da bomba hidráulica utilizada.

### 5.3 Transdutores e Instrumentos de Medição

#### 5.3.1 Termopares tipo “T” – Omega Engineering

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

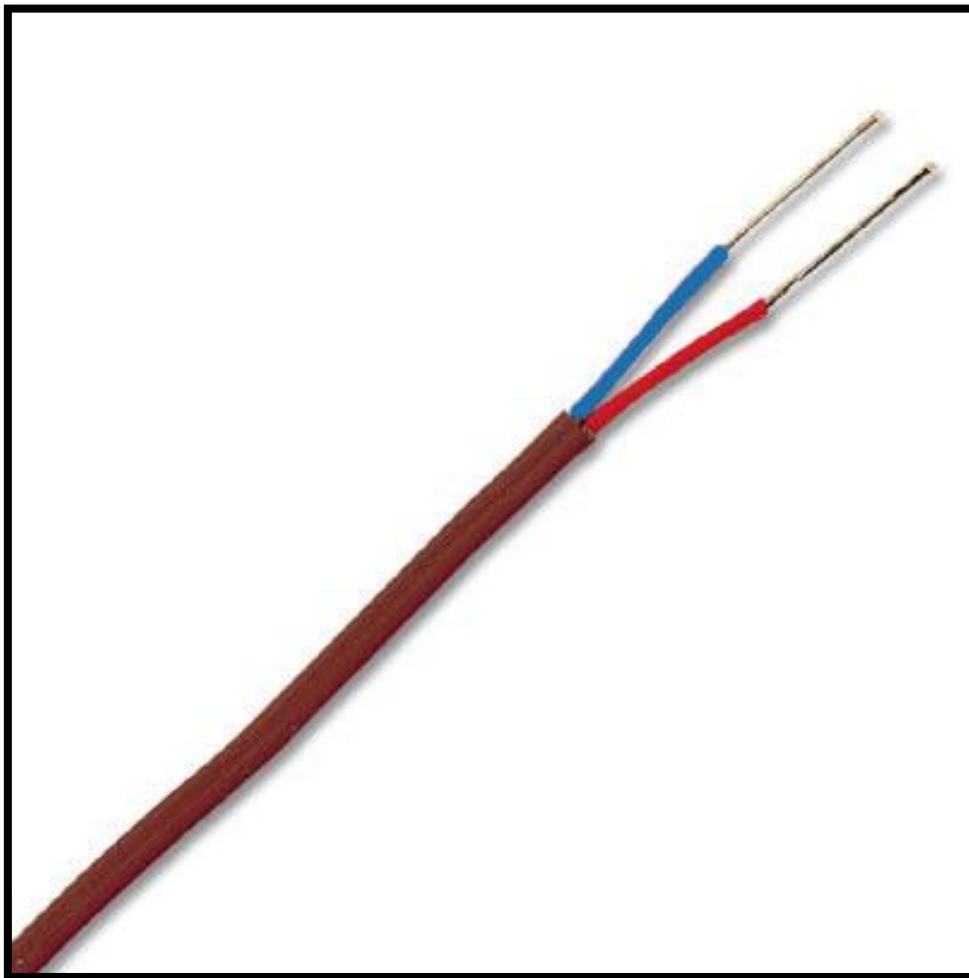


Figura 51-Termopar utilizado nos pontos de medição de temperatura da bancada.

#### Especificações:

- \*Termopar do tipo “T”, de Cobre/Constantan.
- \*Isolamento Duplex por Polivinil (tipo Rip Cord).
- \*Temperatura Máxima de Medição: 105°C.
- \*Tamanho normal em mm (pol.): 1,9 x 3 (0,075 x 0,120)

### 5.3.2 Sensor de Proximidade Capacitivo - Omron E2K-X4ME1

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

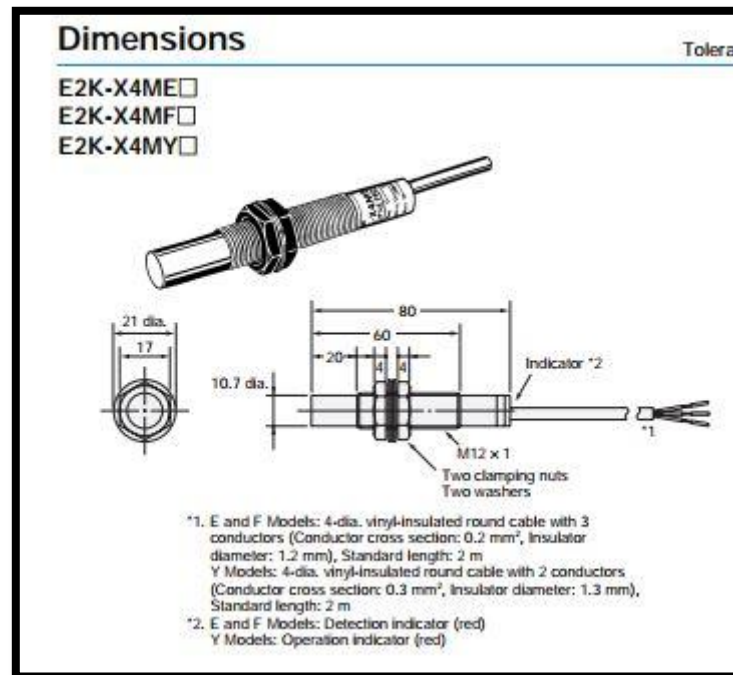


Figura 52-Dimensões do sensor de proximidade capacitivo E2K-X4ME1.

#### Características:

- Distancia de medição:  $4\text{mm} \pm 10\%$ .
- Tipo: Capacitivo.
- Modo de operação: Normalmente Aberto.
- Alimentação: Corrente Contínua.
- Fios:
- Detecção ruim(plástico) X Detecção boa(metal/água):

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

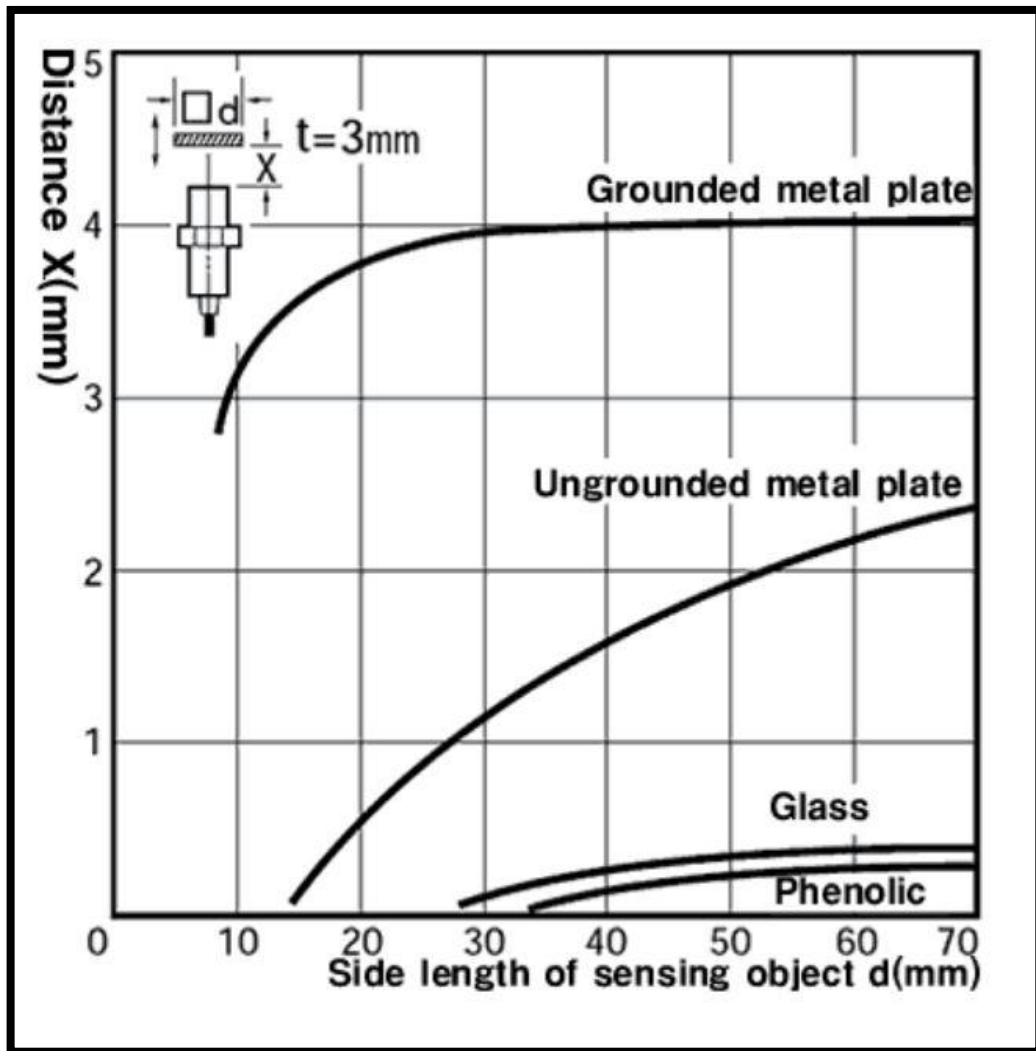


Figura 53-Gráfico da distância percebido pelo sensor de proximidade em relação ao tipo de material que se quer detectar.



### 5.3.3 Transmissores de Pressão Velki PAAHPX

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.



Figura 54-Imagem ilustrativa do transdutor de pressão empregado Velki PAA HPX.

Fonte: Figura retirada diretamente do site do fabricante.

#### Características Técnicas:

Faixas de medição: 0...0,1 bar a 0...5000 bar.

Sobrepresão: Ver catálogo.

Sinal de saída: 0...5 V, 0...10 V (3 fios), 4...20 mA (2 fios ou 4 fios - Opcional).

Minima resistência de carga (3 fios):  $R_L = 5\text{ K}$ .

Máxima resistência de carga (2 fios ou 4 fios - Opcional):  $R_L = (U - 10V_{cc}) / 0,02\text{ A}$

Repetibilidade + histerese + linearidade:  $\pm 0,25\%$  FE (Típica) /  $\pm 0,50\%$  FE (máxima).

Efeito da temperatura no no zero e span: Máximo 0,04% FE/°C.

Alimentação: 13...28 Vcc (3 fios), 8...28 Vcc (2 fios).

Corrente de consumo: Máx. 10 mA (3 fios), 20 mA (2 fios).

Conexão elétrica: Conector DIN.

Temperatura de operação: -40... 100 °C.

Conexão ao processo: 1/4" ou 1/2" BSP ou NPTaço inox AISI 304 ou outras sob especificação.

Proteção: IP65.

Figura 55-Tabela com as características técnicas do transdutor Velki PAA HPX.

## 5.4 Diagramas de Acionamentos Elétricos

### 5.4.1 Diagrama Elétrico Geral: Acionamentos e Sinais de Controle

Fonte: Esta figura foi elaborada pelo Autor.

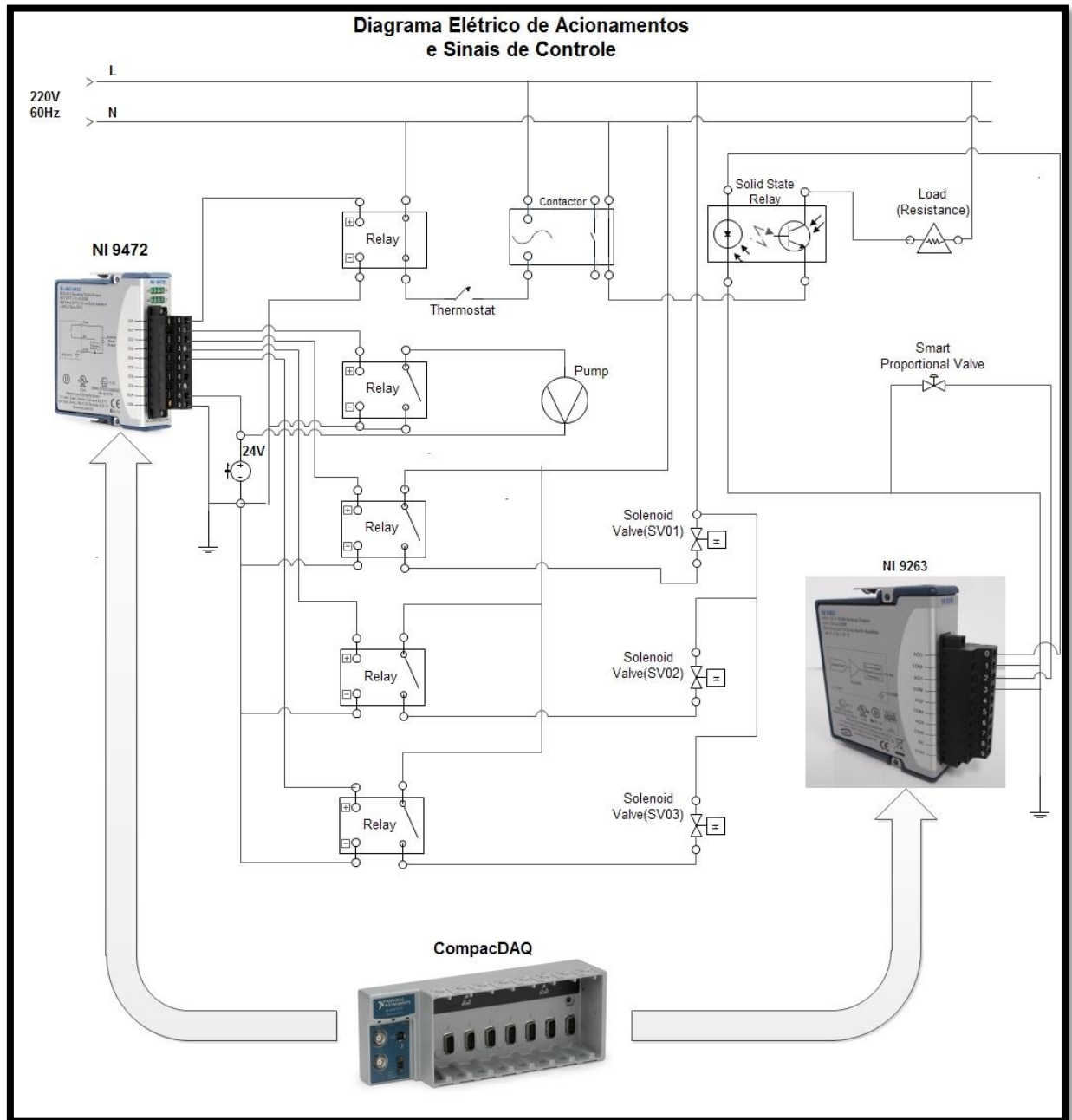


Figura 56- Ilustração do circuito completo de acionamento dos atuadores e sinais de controle manipulados pelas placas NI.

### 5.4.2 Diagrama lógico de Acionamentos – Atuadores ON/OFF

Fonte: Esta figura foi elaborada pelo Autor.

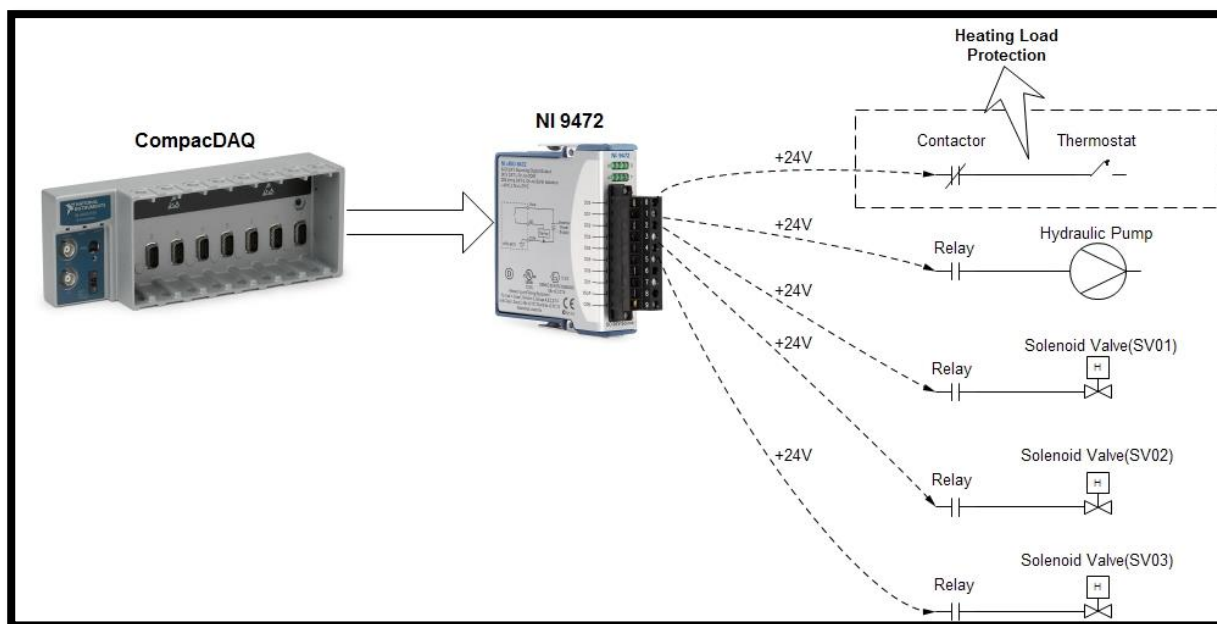


Figura 57-Diagrama de Acionamento das saídas digitais comandadas pelo módulo NI 9472.

A Figura 57 mostra de uma maneira em alto nível como ocorre o acionamento dos atuadores digitais do sistema. Um diagrama elétrico com mais detalhes mostra-se na Figura 56.

### 5.4.3 Diagrama lógico de Acionamentos – Atuadores Analógicos

Fonte: Esta figura foi elaborada pelo Autor.

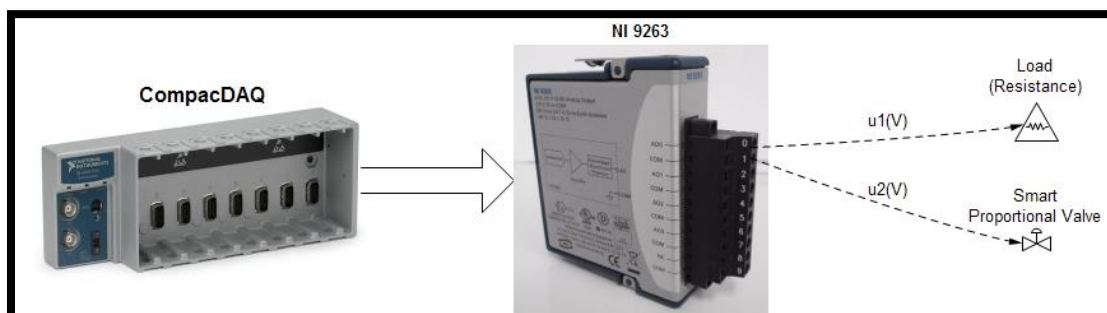


Figura 58-Diagrama de Acionamento das saídas digitais comandadas pelo módulo NI 9263.

A Figura 58 mostra de uma maneira em alto nível como ocorre o acionamento dos atuadores analógicos do sistema por meio dos sinais de controle  $u_1(t)$  e  $u_2(t)$ . Um diagrama elétrico com mais detalhes mostra-se na Figura 53.

## 6 BANCADA IMPLEMENTADA E RESULTADOS OBTIDOS

### 6.1 Fotos da bancada

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

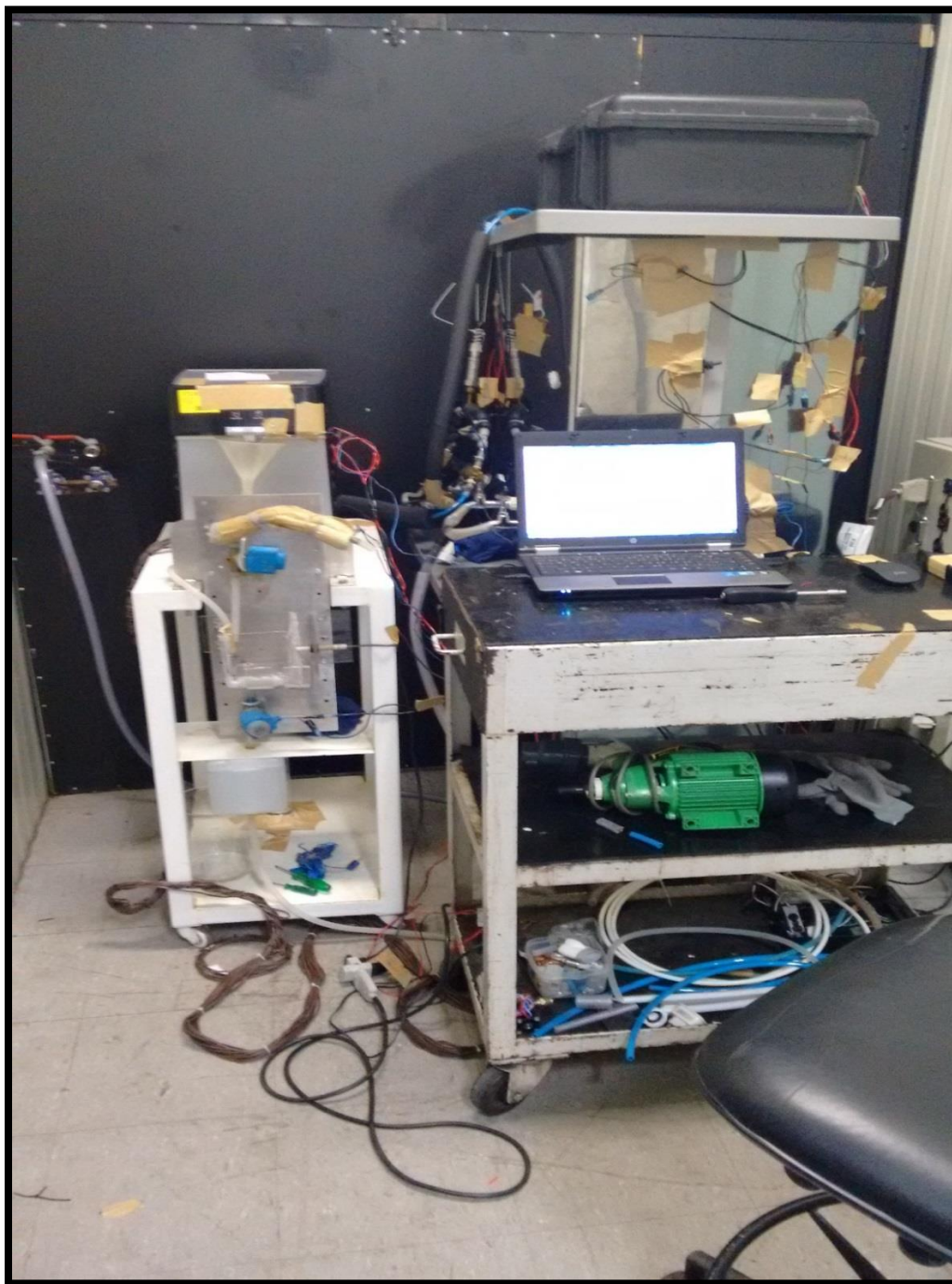


Figura 59 - Foto de um dia típico de ensaios dentro de uma das Câmaras de climatização. A bancada estava em processo de montagem para dar início a um ciclo de testes em diferentes bebedouros.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 60-Foto da bancada realizando ensaios com um bebedouro.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 61-Foto do tanque da bancada. Neste momento todos os devices da bancada estão desmontados e aguardando um novo pedido de ensaio.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 62-Foto com outra vista da Figura 61.



Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 63-Foto da válvula três vias (SV03).

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 64-Foto da bomba hidráulica (Hydraulic Pump).

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.



Figura 65-Foto da válvula proporcional (Prop. V.) .

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

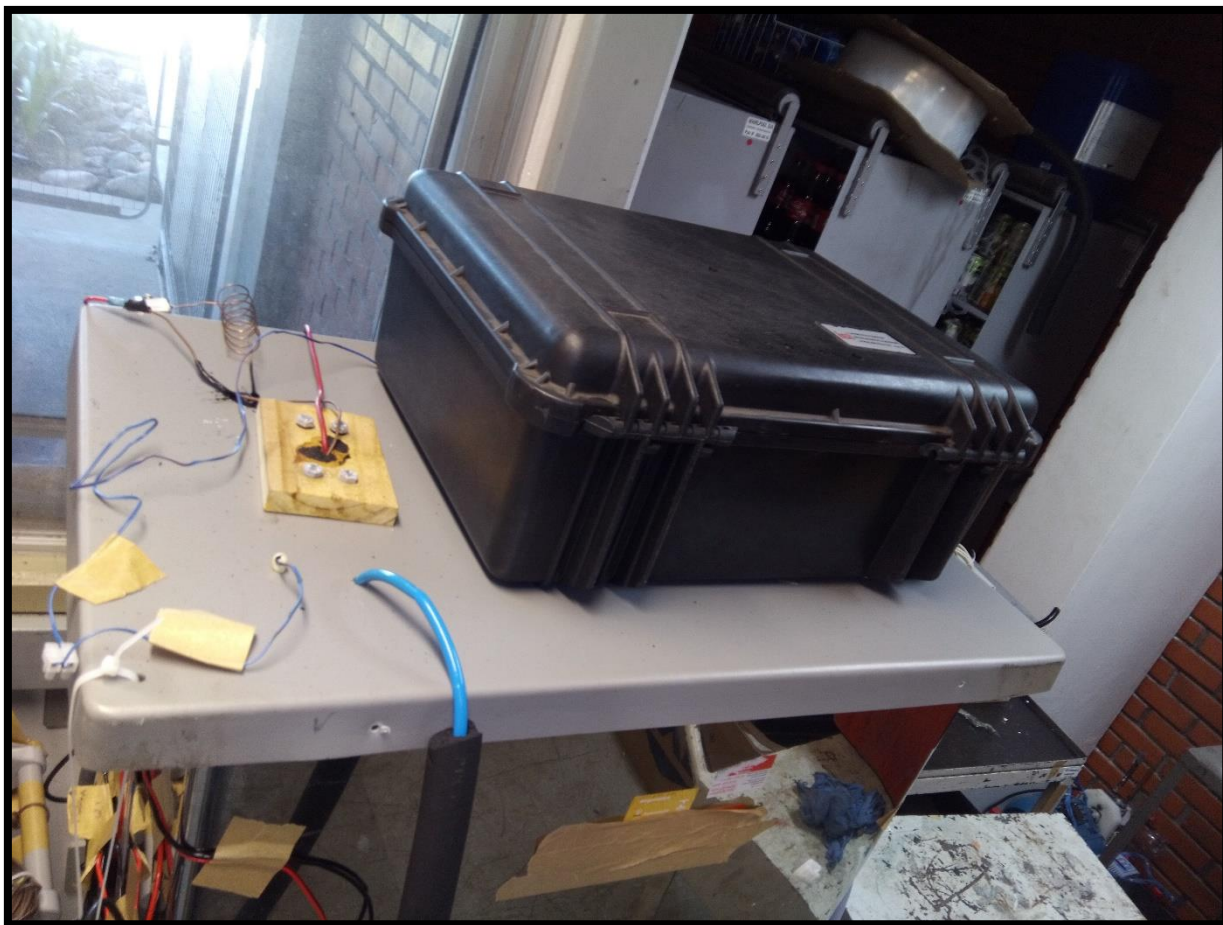


Figura 66-Nesta foto, na parte superior onde fica a tampa do tanque, pode-se ver uma mangueira azul adentrando o tanque por dentro da tampa que é a via de recirculação de água. Podemos ver também um suporte em madeira para fixação interna da resistência, alguns termopares, o fio enrolado do termostato ao fundo da foto, e a caixa preta que contém todos os Hardwares, fontes, relês e contactora de proteção.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

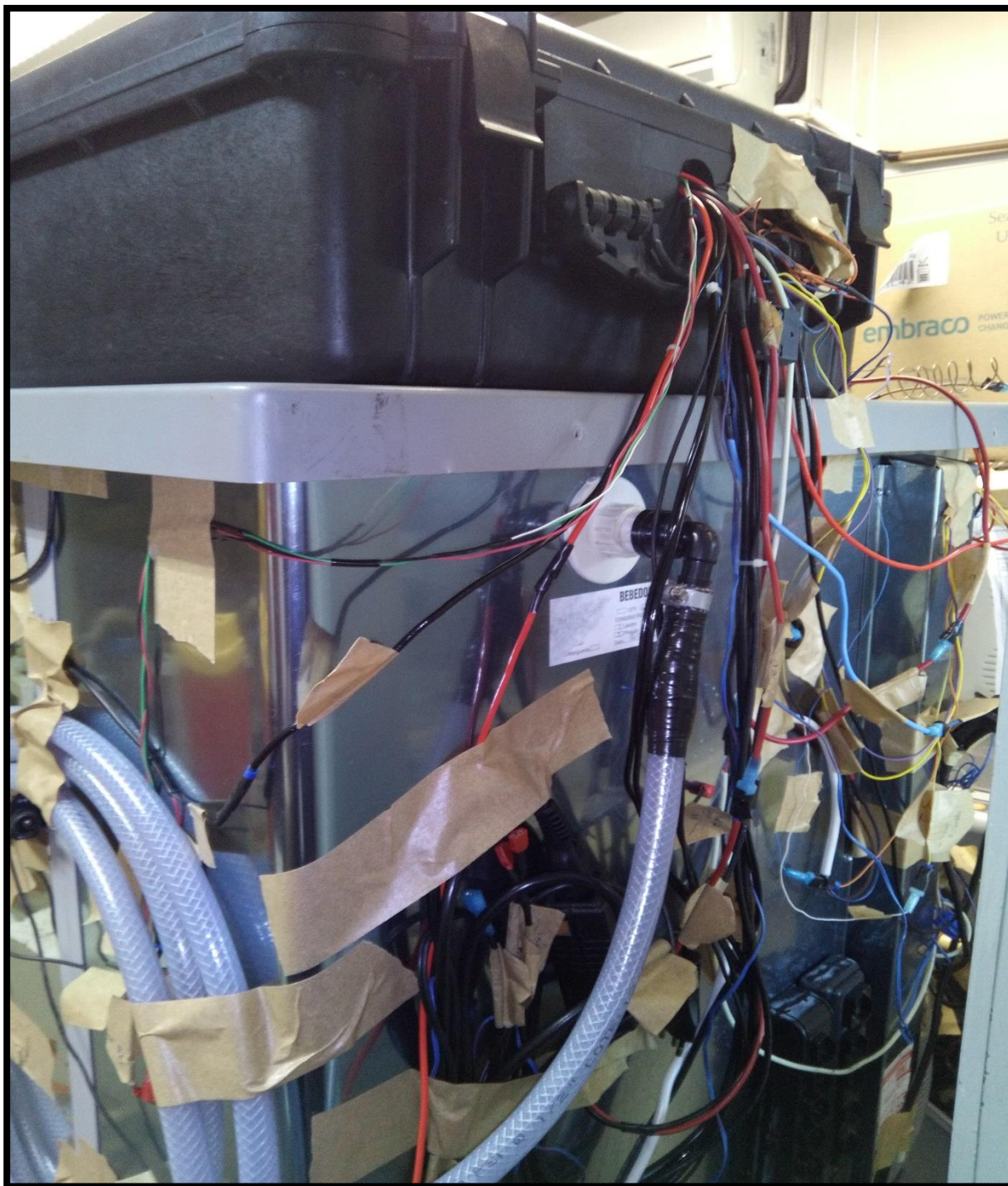


Figura 67-Foto da vista traseira do tanque, e podemos ver um grande volume de fios saindo da caixa preta, pois todos os sinais de controle, acionamentos e alimentação entram e saem por ela.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

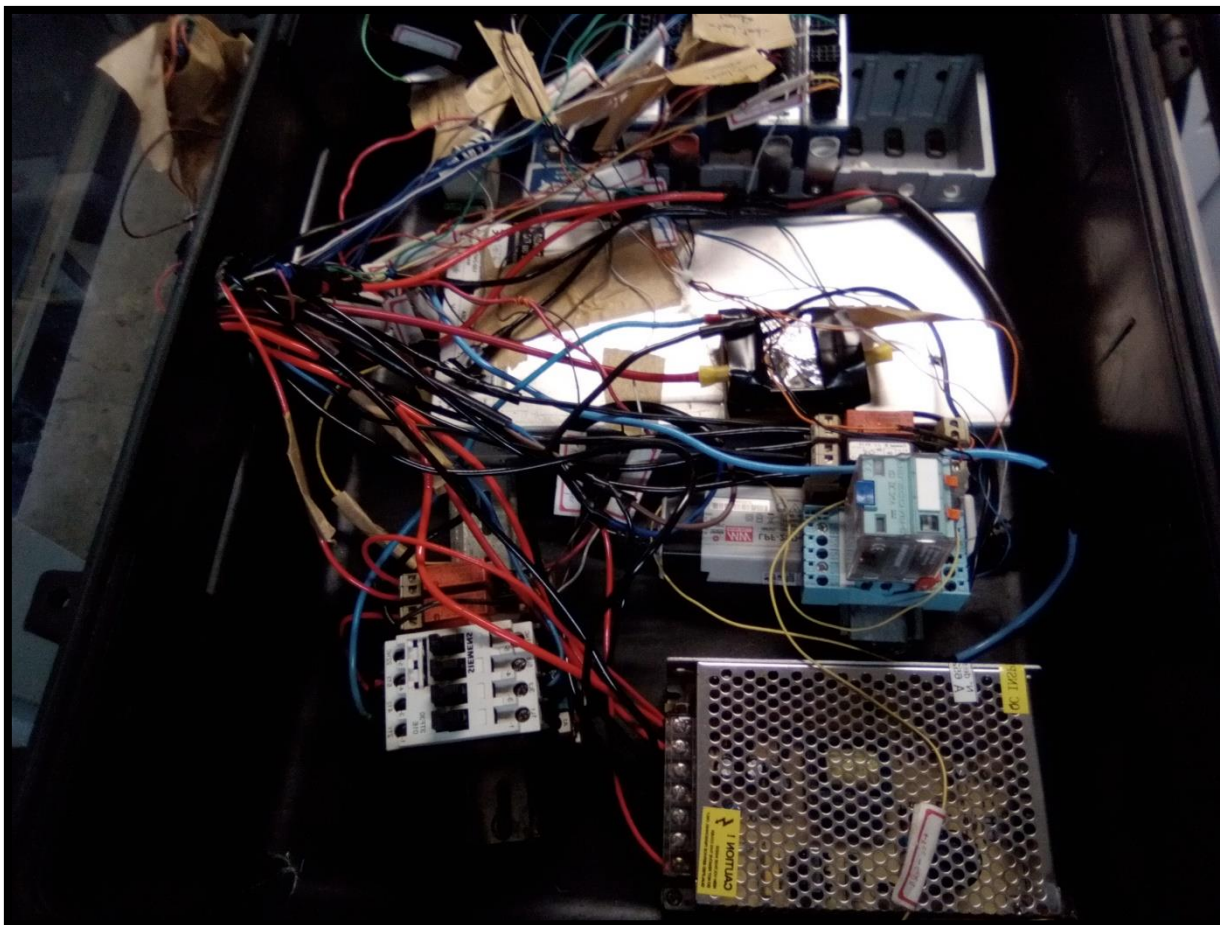


Figura 68-Nesta foto tem-se uma vista por dentro da caixa preta, compreendendo os elementos já citados que são: DAQs de Aquisição e Controle, fontes DC, Relê de estado Sólido, Acopladores a Relês, uma contactora e diversos fios de ligações elétricas entrando e saindo da caixa preta.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

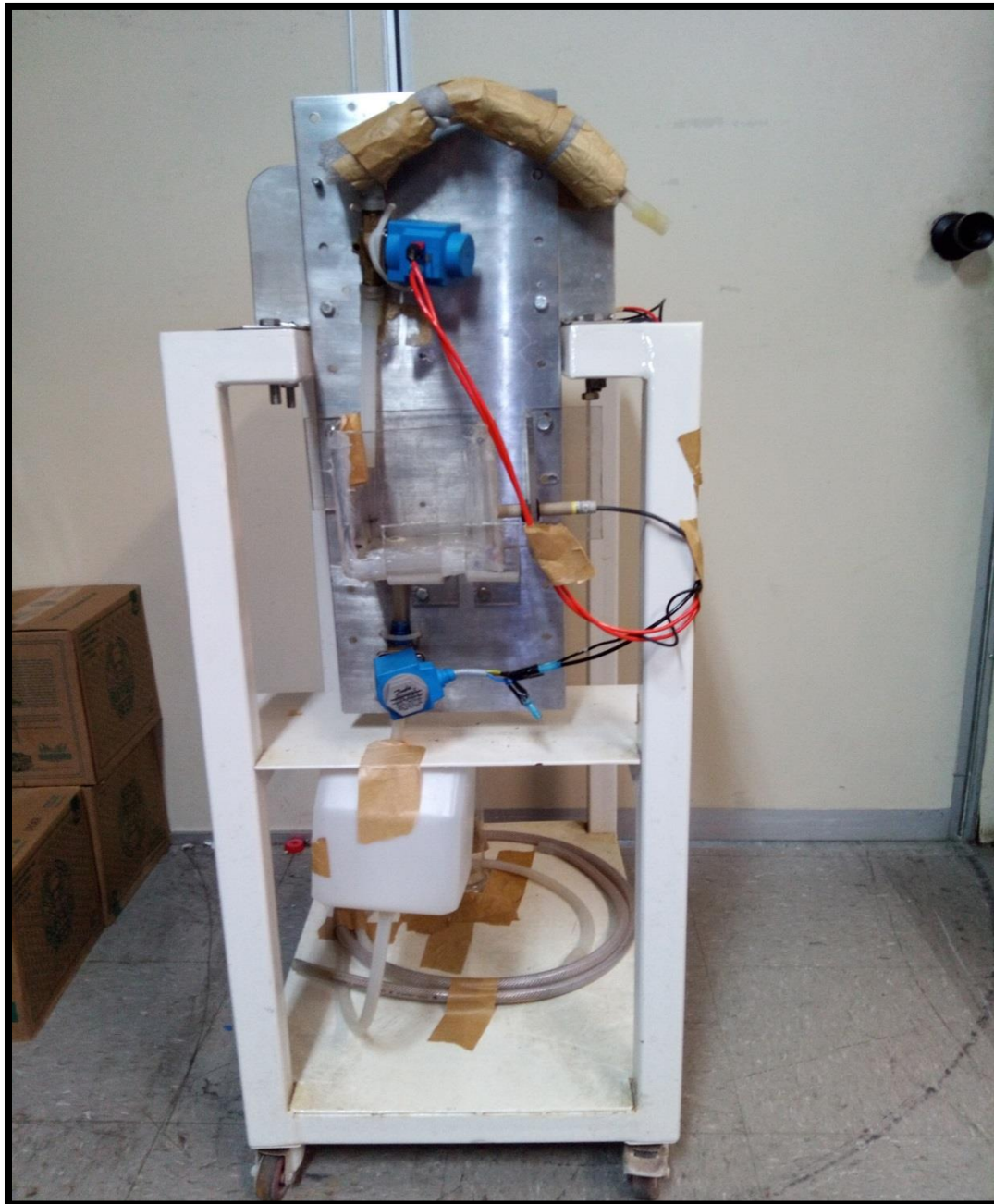


Figura 69-Nesta foto tem-se a outra parte da bancada desmontada, que contém um apoio para de fixar o bebedouro em teste, as válvulas SV01 e SV02, além do Sensor de Nível Capacitivo em adesão com um recipiente graduado para medição do volume de água que sai do bebedouro ao longo das retiradas de água no ensaio.

Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

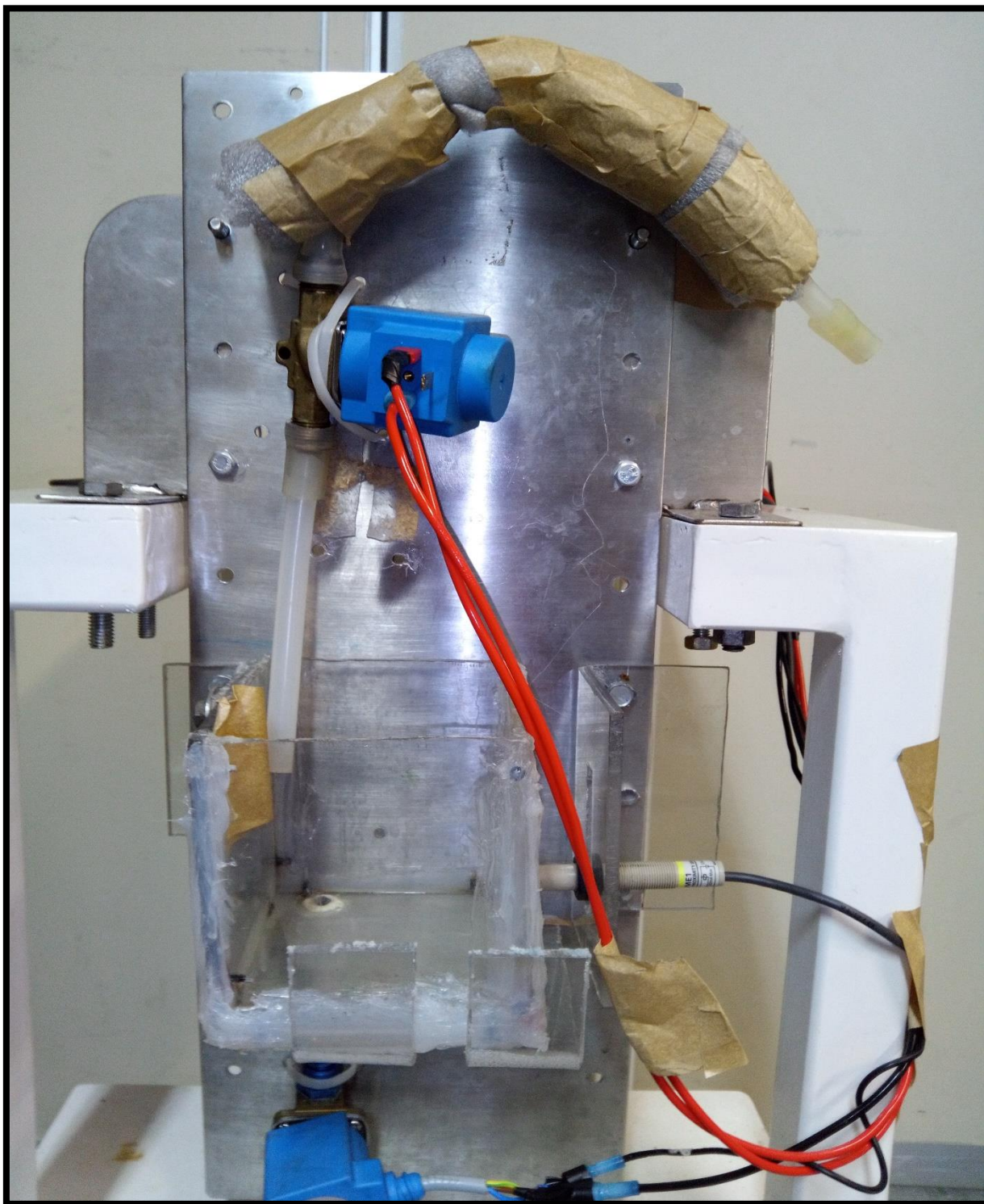


Figura 70-Vista da Figura 69 com foco no recipiente graduado e no sensor de presença.



Fonte: Esta figura é uma foto tirada da bancada que foi elaborada pelo Autor.

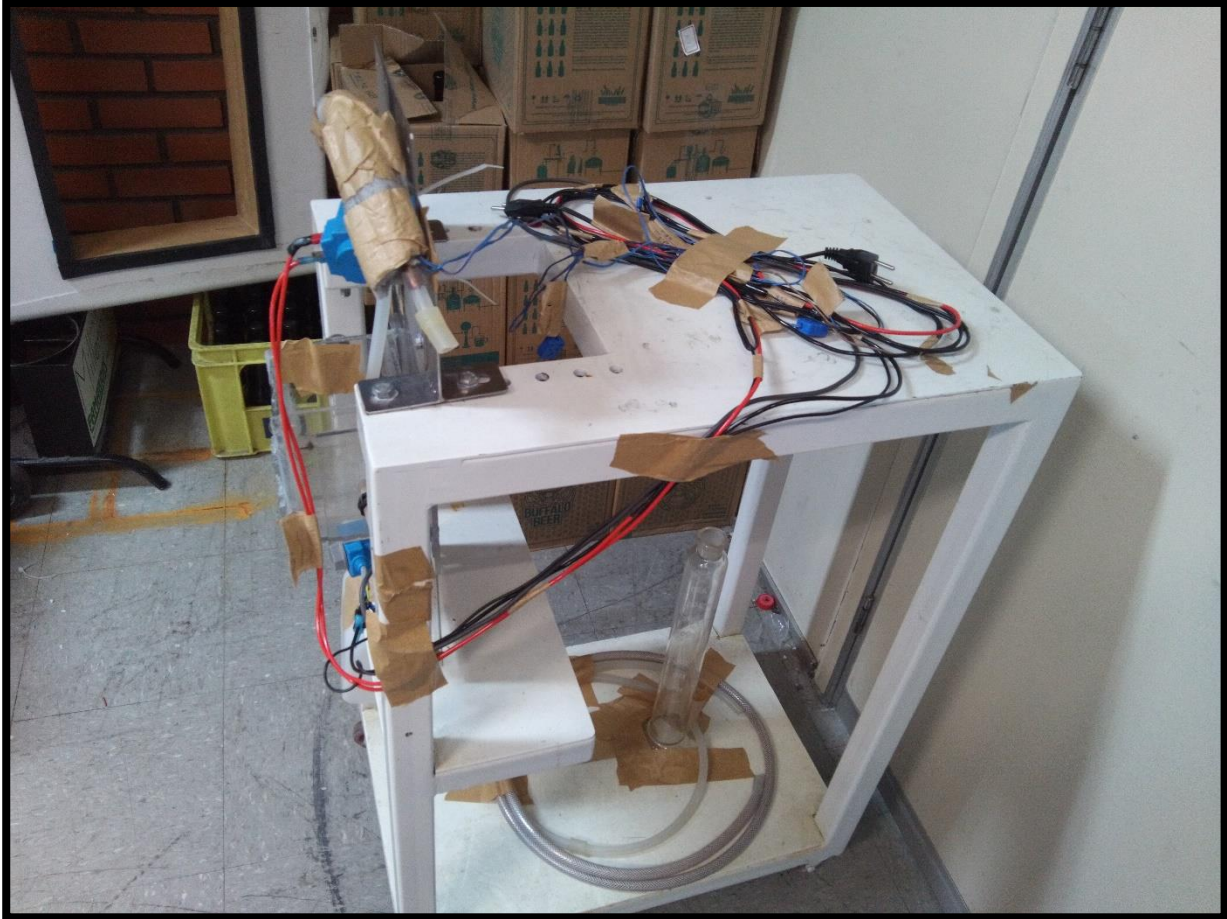


Figura 71-Foto de uma vista lateral da Figura 69, onde se podem ver todos os fios dos elementos de medição e atuação que se interconectam com os elementos da caixa preta do Tanque, quando devidamente montados para realizar um novo ensaio.

## 6.2 Resultados obtidos de Ensaio

Fonte: esta imagem foi elaborada pelo Autor.

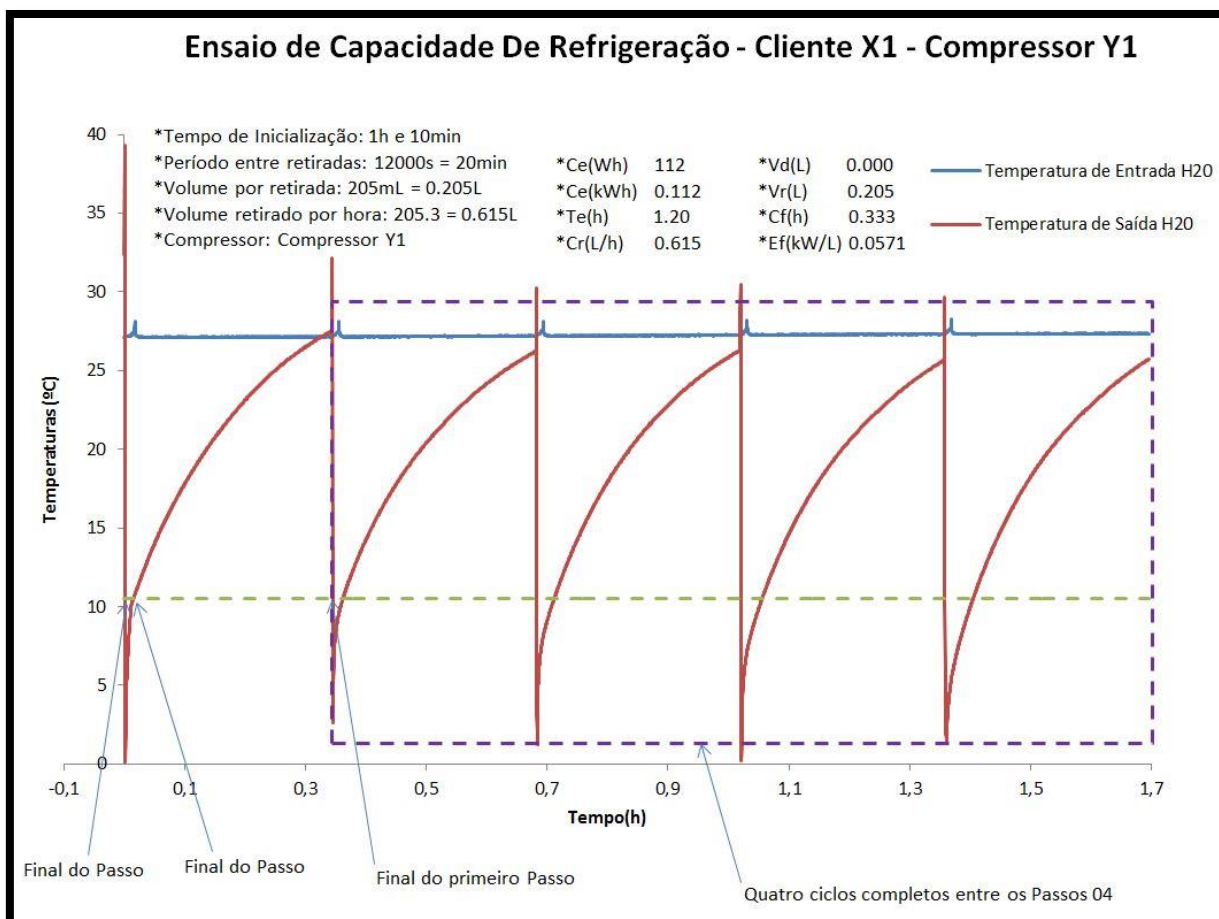


Figura 72 – Ensaio de capacidade de refrigeração realizado no bebedouro A, do Cliente X1, com compressor Y1.

Na Figura 72 tem-se o gráfico junto com um compilado de dados que são levantados a partir da realização do ensaio de Capacidade de Refrigeração, que é previsto pela norma NBR 16236. Este ensaio teve duração de 100 minutos, o intervalo de tempo entre as retiradas de volume de água foi de 20 minutos, com um total de quatro retiradas de volume de água.

Ainda na Figura 72, repare que em vermelho tem-se a temperatura da água na saída do bebedouro, em azul tem-se a temperatura da água que alimenta a

entrada do bebedouro, e em verde tracejado tem-se uma reta que delimita a temperatura máxima (de  $10,5^{\circ}\text{C}$ ) ao qual a temperatura da água na saída do bebedouro não pode ultrapassar durante as retiradas de volume de água.

Repare ainda na Figura 69 que exatamente nos momentos em que ocorre retirada de volume de água, o sinal em azul que representa a temperatura da água que supre o bebedouro apresenta variações rápidas e pequenas, mas rapidamente retorna ao seu valor de regime permanente ( $27^{\circ}\text{C}$ ), e isso se deve a estrutura mecânica do sistema que permite que um pequeno volume de água fique preso na mangueira de suprimento do bebedouro, e quando há escoamento de água para dentro do bebedouro este pequeno volume de água estagnado (e com temperatura elevada) passa pelo sensor de temperatura que mede o sinal da curva em azul, dando uma impressão de ser uma perturbação que modificou este sinal, mas na verdade é uma característica que aparece pelo fato do sistema de controle estar operando em paralelo com um sistema discreto de acionamento das válvulas.

Note ainda que o sinal em azul da Figura 72 é o próprio sinal de temperatura ( $PV_{01}$ ) controlado cujo sistema de controle foi proposto no tópico 3.3.1. Como foi dito no tópico 3.3.1, durante o ensaio de Capacidade de Refrigeração não haveria mudanças de SetPoint do sistema de controle de temperatura, portanto o sinal de  $PV_{01}$  já estava e se manteve em regime permanente durante todo o ensaio.

Neste ensaio realizado no bebedouro A, utilizamos como parâmetros de INPUT para o teste a seguinte receita:

\*Tempo de Inicialização:  $1h e 10min$

\*Período entre retiradas (de volume de água):  $20min$

\*Volume por retirada:  $205mL = 0,205L$

\*Volume retirado por hora:  $205.3 = 0,615L$

\*Compressor do produto:  $Y1$

Note que como previsto pela norma, este bebedouro manteve-se abaixo da temperatura de  $10,5^{\circ}\text{C}$  durante as retiradas de  $205mL$  de cada ciclo do teste.

Utilizando os parâmetros de entrada citados acima, e aquisitando o sinal da temperatura da água imediatamente na saída do bebedouro (sinal “Temperatura de Saída H2O” no gráfico acima) ao longo de  $t \geq 1h$ , é possível extrair os seguintes parâmetros para o bebedouro A:

$$* Ce[kWh] = 112$$

$$* Te[h] = 1,20$$

$$* Cr \left[ \frac{L}{h} \right] = 0,615$$

$$* Vd[L] = 0,000$$

$$* Cf[h] = 0,333$$

$$* Ef \left[ \frac{kW}{L} \right] = 0,0571$$

**Nota:** Todos os parâmetros citados acima  $Ce[kWh]$ ,  $Cr \left[ \frac{L}{h} \right]$ ,  $Vd[L]$ ,  $Cf[h]$ ,  $Ef \left[ \frac{kW}{L} \right]$  são detalhadamente explicados, juntamente com as fórmulas utilizadas para sua obtenção nos itens 5.2.1.3 e 5.2.2.3 da página 6 da norma *NBR 16236*.

A seguir será mostrado mais um ensaio realizado de Capacidade de Refrigeração, e todas as análises realizadas no ensaio da Figura 72 cabem para este ensaio:

Fonte: esta imagem foi elaborada pelo Autor.

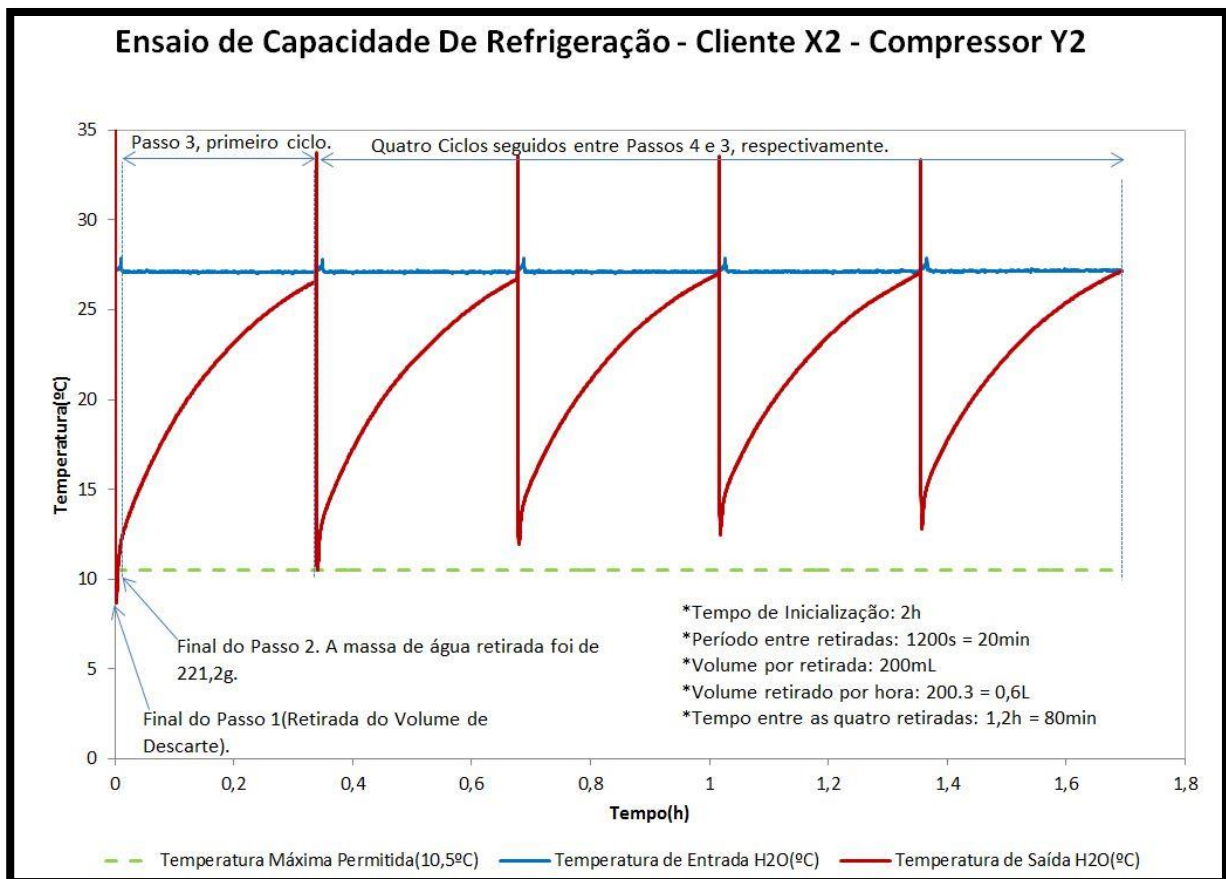


Figura 73-Ensaio de capacidade de refrigeração realizado no bebedouro B, do Cliente X2, com compressor Y2.

Neste ensaio realizado no bebedouro B, utilizamos como parâmetros de INPUT para o teste a seguinte receita:

\*Tempo de Inicialização: 1h e 10min

\*Período entre retiradas (de volume de água): 20min

\*Volume por retirada: 205mL = 0,205L

\*Volume retirado por hora:  $205.3 = 0,615L$

\*Compressor do produto: Y2

Porém, diferentemente do ensaio anterior, como podemos ver no gráfico acima, ao longo das retiradas de volume, a temperatura da água na saída do bebedouro não respeitou a condição de manter-se abaixo de  $10,5^{\circ}C$  durante toda a retirada dos  $205mL$  de água em cada ciclo, o que por inspeção já se conclui que o bebedouro foi **reprovado** no ensaio de Capacidade de Refrigeração, e não faz sentido extraírem-se os parâmetros de desempenho para fazer o cálculo de eficiência energética.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma geral, os resultados foram muito positivos, pois a bancada cumpre todos os requisitos de projeto que foram propostos, tanto os de controle quanto os de automação, com a única restrição que foi abordada na Seção 3.2, na observação sobre [restrições do sistema físico](#) no que tange a faixa de operação do sinal de pressão de suprimentos dos bebedouros. Mas essa restrição não traz grandes prejuízos ao ensaio, pois o sinal de pressão não interfere diretamente nos cálculos de levantamento dos parâmetros de Capacidade de Refrigeração. Além disso, a estrutura mecânica que modela os limites do sinal de pressão pode ser facilmente modificada com a inserção de uma nova bomba hidráulica com características de vazão e potência mais indicadas para nossa aplicação, coisa que não foi feita até então pela escassez de tempo e recursos presentes no momento.

Como se pode observar nas Figuras 72 e 73, uma vez iniciado o ensaio, a bancada é capaz de realizar todos os passos da norma descritos da lista de procedimentos citados na Seção 2.4.1, e, de forma independente a bancada é capaz de controlar a temperatura da água que supre o bebedouro em questão, além de controlar a pressão na linha dessa água circulante. Finalizado o ensaio, é gerada automaticamente uma planilha com os vetores de temperatura na entrada e saída do bebedouro, além de um vetor com um sinal lógico que diz em quais momentos há retirada de água do bebedouro em teste, vetores estes que são importantes para o tratamento destes dados e posterior construção do relatório com as conclusões para o cliente.

Ainda sobre o problema abordado na Seção 3.2, um estudo que poderia ser feito é determinar a influência do não cumprimento dos  $2 \text{ bar}$  de pressão requisitados pela norma durante o ensaio de Capacidade de Refrigeração. Outro possível estudo que poderia ser feito em relação aos ensaios realizados na bancada é referente a análise de incertezas meteorológicas dos sinais de Temperatura e Pressão, e como estas incertezas influenciam nos parâmetros de desempenho obtidos dos Bebedouros em teste.

É também interessante citar a questão do desenvolvimento que está sempre em andamento, pois o presente documento se a uma versão da bancada de 12 de junho de 2017, mas muitas modificações foram feitas na segunda metade de 2017

em relação à primeira versão apresentada. Estas modificações vieram principalmente do ponto de vista de software, questões de economia de memória, modularização de funções e redução do tamanho do código não tinham ganhado muita atenção até então, e foram refinadas.

Além disso, em janeiro de 2018 foi iniciado um projeto de replicação da bancada apresentada neste trabalho, com diversas melhorias na estrutura mecânica do tanque, e simplificações nas questões de implementação em hardware, com sistemas embarcados especialistas voltados para área de controle. Otimizações no espaço físico que a bancada ocupa também foram abordadas para esta nova bancada que está sendo construída em 2018.



## REFERÊNCIAS

- NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW PID Design**. Disponível em <<http://www.ni.com/white-paper/6440/en/>> Acesso em: 20 de Junho de 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Finite State Machine Design**. Disponível em <<http://www.ni.com/tutorial/7595/en/>> Acesso em: 18 de Junho de 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Sistemas CompactDAQ**. Disponível em <<http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/pt/>> Acesso em: 25 de Setembro de 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Módulos de Entrada Analógica Universal NI9219**. Disponível em <<http://www.ni.com/pt-br/shop/select/c-series-universal-analog-input-module?modelId=122171>> Acesso em: 28 de Setembro de 2017.
- OMEGA ENGINEERING. **Termopares**. Disponível em <<https://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>> Acesso em: 28 de Setembro de 2017.
- OMRON. **Solid State Relay Handbook**. Disponível em <[https://www.ia.omron.com/data\\_pdf/guide/18/ssr\\_tg\\_e\\_9\\_2.pdf](https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/18/ssr_tg_e_9_2.pdf)> Acesso em: 06 de Agosto de 2017.
- OPTO22. **Solid State Relays**. Disponível em <<http://www.opto22.com/site/solidstaterelays.aspx>> Acesso em: 06 de Novembro de 2017.
- DANFOSS. **Válvulas Solenóides**. Disponível em <<http://products.danfoss.com.br/productrange/industrialautomation/solenoid-valves/#/>> Acesso em: 02 de Outubro de 2017.
- BÜRKERT. **Válvulas Solenóides Proporcionais de Uso Geral**. Disponível em: <<https://www.burkert.com.br/pt/type/2833>> Acesso em: 11 de Julho de 2017.
- HECTOR BESSA SILVEIRA. **Notas de Aula – Sinais e Sistemas Lineares 1**. 2014. Material didático. Disponível em <<https://moodle.ufsc.br/mod/resource/view.php?id=554536>>
- NORMEY-RYCO. **Controladores PID Industriais**. Material didático. Disponível em: <[https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1282575/mod\\_resource/content/0/MATERIAL\\_DIDATICO/aula\\_-\\_Controladores\\_PID\\_Industriais.pdf](https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1282575/mod_resource/content/0/MATERIAL_DIDATICO/aula_-_Controladores_PID_Industriais.pdf)>
- RODOLFO C. C. FLESCHE. **Configurações de Sistemas de Aquisição de Sinais**. Material didático. Disponível em <<https://moodle.ufsc.br/mod/resource/view.php?id=973332>>

LATHI. **Sinais e Sistemas Lineares**. Bookman, 2ª Edição de 2007.

F. WAGNER; R. SCHMUKI; T. WAGNER; P. WOLSTENHILME. **Modeling Software with Finite State Machines, A Practical Approach**. 2006.

CHIEN; FRUEHAUF. **Consider IMC Tuning to Improve Controller Performance**. 1990.

NORMEY-RYCO; CAMACHO. **Ensino do projeto de Compensadores para Processos com atraso**. 1998. Disponível em  
<<https://moodle.ufsc.br/mod/resource/view.php?id=740087>>