

**Estudo e implementação de estratégias para  
uma bancada de controle de pressões em  
compressores de refrigeração**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação na disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***Hiago Antonio Sirino Danguì***

*Florianópolis, agosto de 2016.*

**Estudo e implementação de estratégias para uma bancada de controle de pressões em compressores de refrigeração.**

***Hiago Antonio Sirino Danguì***

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**

***Prof. Rodolfo César Costa Flesch***

---

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Eng. Rafael Schmitz  
*Orientador na Empresa*

Prof. Rodolfo César Costa Flesch  
*Orientador no Curso*

Prof. Miguel Angelo Chincaro Bernuy  
*Avaliador*

Rubens Hardt Junior  
Eduardo Dutra Garcia  
*Debatedores*

## **Agradecimentos**

Agradeço ao Labmetro pela oportunidade de trabalho.

Ao Professor Rodolfo pelos ensinamentos e orientação ao longo da graduação e do período de desenvolvimento desse projeto.

Ao supervisor de estágio Engenheiro Rafael Schmitz pela amizade, paciência e divisão de conhecimentos e experiência.

Ao Carlos pelo auxílio nas montagens e modificações da bancada.

Aos colegas de laboratório pela amizade e companheirismo nesses meses de trabalho.

## Resumo

Uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Metrologia e Automatização (Labmetro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) consiste na automação de ensaios, que é importante para auxiliar na melhoria dos produtos. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de controle das pressões de entrada e saída de compressores herméticos para emular os sistemas de refrigeração sob diversas condições de operação. Dessa forma, pode-se avaliar os impactos nos subsistemas que constituem o compressor sem necessidade de construir um sistema de refrigeração completo para esse fim. Além disso, uma bancada é muito mais flexível que um sistema de refrigeração convencional, pois permite a variação das condições de operação de forma mais fácil. Neste trabalho, para permitir a automação de uma bancada para varrer rapidamente o mapa de referências de condições de operação do compressor foi necessário adquirir e processar dados em LabVIEW, bem como investigar estruturas de controle adequadas para as características da bancada e técnicas para sua implementação digital. O sistema projetado foi validado experimentalmente e os resultados obtidos foram satisfatórios em relação aos objetivos do projeto. Em média o tempo total de ensaio foi de 25 minutos, tempo esse inferior aos 40 minutos gastos por operadores experientes nas bancadas de operação manual. Ao final, foi proposta uma sintonia empírica para os controladores das pressões do compressor.

**Palavras-chaves:** Automação de ensaio, controle de pressão, compressores.

## **Abstract**

One of the research lines of the Metrology and Automation Laboratory (Labmetro) at the Federal University of Santa Catarina (UFSC) is the automation of tests, which is important to help improving products. In this work a control system of the input and output pressures of hermetic compressors in order to emulate a cooling systems under diferent operating conditions has been developed. Thus, one can evaluate the impacts of different conditions on the constituting subsystems of a compressor without the need to build a complete cooling system for this purpose. In addition, the prototype is much more flexible than a conventional cooling system, because it allows the variation of the operating conditions more easily. In this work, to enable the automation of a prototype which quickly scans the map of possible compressor operating condition references, it was necessary to acquire and process data in LabVIEW, as well as investigate appropriate control structures for the prototype and techniques for their digital implementation. The designed system was experimentally validated and the results were satisfactory in relation to the project objectives. The average test time using the automated prototype is 25 minutes, which is lower than that achieved by skilled and experienced operators. Finally, an empirical tuning has been proposed for the controls of the compressor pressures.

**Key-words:** Test automation, pressure control, and compressors.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>4</b>
<b>Resumo</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Sumário</b>	<b>7</b>
<b>Simbologia</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>10</b>
1.1: Apresentação do problema	11
1.2: Objetivo geral	13
1.3: Objetivos específicos	13
1.4: Organização do documento	14
<b>Capítulo 2: Revisão da literatura</b>	<b>15</b>
2.1: Sistemas de refrigeração	15
2.1.1: Elementos do sistema de refrigeração	15
2.1.2: Condições de operação	17
2.2: Controle Regulatório	18
2.2.1: Identificação de sistemas	19
2.2.2: Especificações de projeto	21
2.2.3: Sistemas realimentados	24
2.3: Sistemas Automáticos	29
2.3.1: Máquinas de Estados Finitos	29
2.4: Programação concorrente	30
2.5: Comentários Finais	31
<b>Capítulo 3: A bancada</b>	<b>32</b>
3.1: Diagrama de processo e instrumentação	32
3.2: Instrumentação	34
3.2.1: Válvulas	34

3.2.2: Transmissores _____	36
3.2.3: Sistema de aquisição _____	37
<b>3.3: Software _____</b>	<b>38</b>
3.3.1: Funções gerais _____	38
3.3.2: Sistema Supervisorio _____	40
<b>3.4: Comentários Finais _____</b>	<b>42</b>
<b>Capítulo 4: Desenvolvimento e Implementação _____</b>	<b>43</b>
<b>4.1: Controle regulatório _____</b>	<b>45</b>
4.1.1: Projeto _____	45
4.1.1.1: Testes de linearidade _____	47
4.1.2: Identificação do sistema _____	53
4.1.3: Projeto dos controladores _____	62
4.1.4: Testes em malha fechada _____	65
4.1.5: Projeto dos desacopladores _____	66
4.1.6: Projeto do escalonador _____	68
4.1.7: Controle na região de equalização _____	71
4.1.8: Comentário sobre o controle regulatório _____	71
<b>4.2: Automação do Ensaio _____</b>	<b>72</b>
4.2.1: Definição da trajetória de ensaio e localização no mapa _____	73
4.2.2: Sistema de geração de referências automáticas _____	76
4.2.3: Intertravamento _____	80
<b>4.3: Comentários finais _____</b>	<b>85</b>
<b>Capítulo 5: Testes e resultados práticos _____</b>	<b>86</b>
<b>Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas _____</b>	<b>90</b>
<b>Referências: _____</b>	<b>92</b>

## Simbologia

Lista de siglas e abreviaturas:

$VP_1(s)$	Variável de processo um, pressão de sucção.
$VP_2(s)$	Variável de processo dois, pressão de descarga.
$MV_1(s)$	Variável manipulada 1, tensão aplicada à válvula de sucção.
$MV_2(s)$	Variável manipulada 2, tensão aplicada à válvula de descarga.
FSM	Máquina de estados finitos.
$H_D(s)$	Modelo da dinâmica da pressão de descarga.
$H_S(s)$	Modelo da dinâmica da pressão de sucção.
$C_D(s)$	Função de transferência do controlador da pressão de descarga.
$C_S(s)$	Função de transferência do controlador de sucção.
$A(s)$	Modelo do acoplamento dinâmico entre a sucção e a descarga.
$C_{ff}(s)$	Controlador <i>Feed Forward</i>
$VP$	Variável de processo.
$MV$	Variável manipulada.
$P$	Operação testar do semáforo.
$V$	Operação incrementar do semáforo.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automação.

## Capítulo 1: Introdução

No setor produtivo os testes de confiabilidade são utilizados como ferramentas para a obtenção de melhorias nos produtos. Esses testes são realizados através de ensaios práticos e experimentais que submetem o produto a diferentes condições de operação a fim de observar o desempenho, o funcionamento, possíveis falhas e/ou avarias (TROTT, 2012). Esses ensaios, quando realizados através de processos manuais, podem ser contaminados pelo fator humano, assim comprometendo os resultados. Então, para alcançar as melhorias são necessárias baixas incertezas e uma boa reprodutibilidade nos ensaios, características as quais podem facilmente ser alcançadas através de um processo de automação do teste. Uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Metrologia e Automatização (Labmetro) da UFSC consiste justamente na automação de ensaios para aprimoramento da qualidade dos resultados e diminuição do tempo demandado para realização dos mesmos.

O produto e objeto de estudos deste trabalho é o compressor, que consiste no elemento de maior complexidade nos sistemas de refrigeração e tem a função de movimentar fluido refrigerante num determinado circuito aplicando variações de pressão no sistema.

O teste de confiabilidade do compressor consiste em submetê-lo em diferentes condições de operação, a fim de avaliar o impacto causado em sua estrutura física e em seus componentes construtivos. Para isso, controlam-se as pressões de entrada e saída do compressor em valores específicos, de modo a emular um sistema de refrigeração.

O tema deste trabalho foi proposto pela Whirlpool S.A. – Unidade Embraco, empresa líder no mercado mundial de compressores para refrigeração, em mais uma iniciativa de cooperação entre academia e indústria, com o objetivo de propor soluções para problemas do setor produtivo.

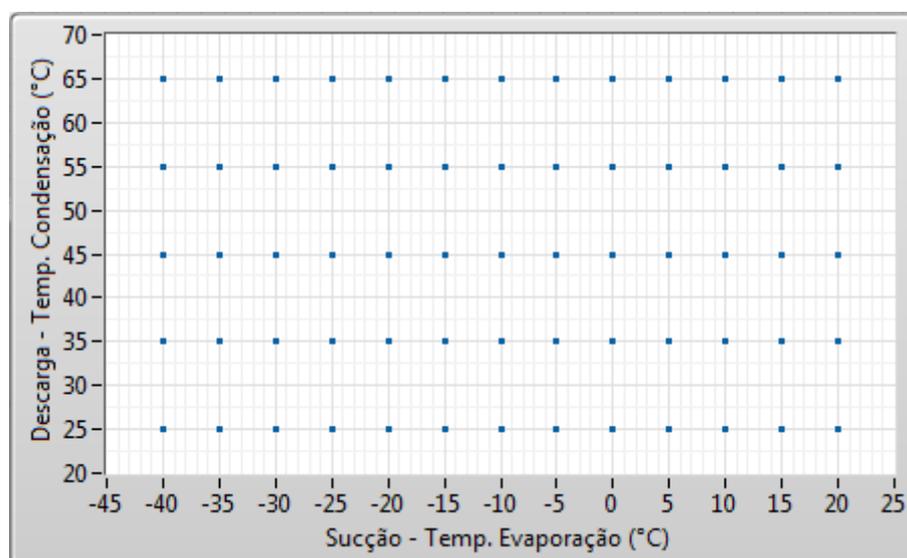
Na seção 1.1 o problema de estudo deste trabalho é apresentado.

## 1.1: Apresentação do problema

Deseja-se controlar a operação de um compressor inserido em uma bancada que emula o funcionamento de um sistema de refrigeração. Da perspectiva do compressor, uma condição de operação é determinada pelo estado do fluido na entrada e na saída do equipamento. Dessa forma, cada ponto de operação pode ser entendido como um par ordenado, formado pela pressão de sucção e pressão de descarga.

Apesar de o compressor trabalhar com pressões, a operação de um sistema de refrigeração é tipicamente analisada a partir das temperaturas de evaporação e condensação. Dessa forma, as pressões medidas são convertidas em temperaturas correspondentes, a partir da curva de saturação do fluido. O conjunto de condições possíveis dá origem ao mapa da Figura 1. Esse mapa é o mesmo utilizado no ensaio realizado na Embraco.

Figura 1: Mapa de referências das condições de operação do compressor.



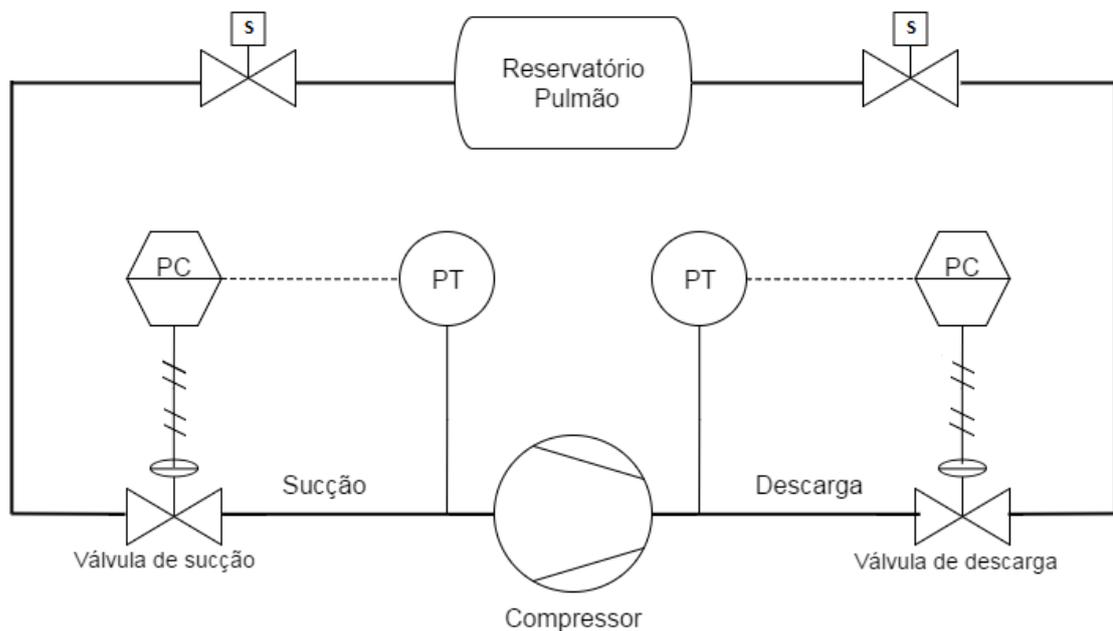
Baseado na Figura 1, observam-se treze pontos para a pressão de sucção, relacionados com valores de temperaturas de evaporação, e cinco pontos para pressão de descarga, relacionados com valores de temperatura de condensação, totalizando 65 pontos de operação.

Uma vez que são necessárias duas variáveis para cada ponto de operação, pode-se caracterizar o processo como um sistema multivariável de duas entradas e duas saídas. As pressões estão acopladas, o que ocasiona influências entre as variáveis de processo, implicando diretamente no desempenho do sistema de controle.

Além disso, vislumbram-se alguns complicadores, como: a não linearidade inserida pelos atuadores e a modificação do comportamento dinâmico do sistema no decorrer do ensaio, devido ao aquecimento do compressor e variações nas características do fluido.

Portanto, o sistema de controle deve apresentar robustez frente às variações paramétricas dos modelos e capacidade de adaptação mantendo o bom desempenho e estabilidade independentemente da região de operação ou ponto do mapa. A figura 2 ilustra o circuito básico do processo.

*Figura 2: Diagrama básico do circuito principal do processo.*



O circuito da Figura 2 é utilizado para a realização do ensaio. As pressões são controladas através da manipulação das aberturas das válvulas de sucção e de descarga. A instalação do reservatório pulmão reduz mecanicamente o efeito do

acoplamento entre as pressões, viabilizando a implementação de controladores SISO independentes.

O sistema desenvolvido deve apresentar comportamento robusto, sendo funcional para os diversos modelos de compressor. Outra especificação é o tempo total para percorrer todos os pontos do mapa. Tem-se interesse em, pelo menos, igualar o tempo necessário para a realização do ensaio manual. Porém, quaisquer ganhos em tempo e desempenho refletem diretamente na produtividade dos testes, justificando ainda mais a automação do ensaio.

## **1.2: Objetivo geral**

O objetivo geral do projeto é automatizar o controle das condições de operação de um compressor de refrigeração inserido numa bancada para emular um sistema de refrigeração, permitindo que sejam atingidas todas as condições do mapa de referências de pressão de sucção e de descarga.

## **1.3: Objetivos específicos**

- Realizar uma análise detalhada do processo, a fim de levantar as características dinâmicas do sistema nas diferentes condições de operação e as relações e influências entre as variáveis.
- Obter a melhor forma de controle das pressões através da implementação e avaliação de estratégias para a automação do ensaio.
- Definir a melhor trajetória para o ensaio automático no mapa de referências.
- Realizar ensaios com diferentes modelos de compressores para validação do projeto.

## 1.4: Organização do documento

Esse documento está dividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo é responsável pela introdução do tema do trabalho, contextualizando o problema tratado e a motivação do projeto.

O capítulo 2 propõe uma revisão sobre os principais conceitos necessários para a compreensão deste trabalho. São apresentados conceitos fundamentais sobre os sistemas de refrigeração, além de revisar conceitos básicos da teoria de controle, bem como do projeto de sistemas automáticos.

O capítulo 3 apresenta a bancada utilizada para a emulação do sistema de refrigeração, detalhando os recursos físicos instalados e o software para aquisição dos dados e supervisão e controle do ensaio.

O capítulo 4 é referente à implementação do sistema projetado para a automação do ensaio. As etapas de desenvolvimento do trabalho são detalhadas em seções específicas no capítulo.

O capítulo 5 apresenta os testes realizados para a validação do sistema desenvolvido e avalia os resultados obtidos.

O capítulo 6 traz uma conclusão sobre o trabalho desenvolvido, apontando trabalhos complementares na questão de pesquisa.

## Capítulo 2: **Revisão da literatura**

O objetivo deste capítulo é revisar os conceitos teóricos fundamentais para a elaboração do trabalho. Primeiramente serão expostos os conceitos sobre sistemas de refrigeração, com foco nos elementos básicos e nas condições de operação, e sua descrição através das pressões de entrada e saída. Em seguida, serão discutidos os pontos essenciais sobre a teoria de controle, desde a identificação de sistemas até o projeto, sintonia e ajuste dos controladores. Também serão discutidos os conceitos e aspectos das estratégias utilizadas para a automação do ensaio.

### **2.1: Sistemas de refrigeração**

Sistemas de refrigeração são utilizados para diversas aplicações, desde a conservação de alimentos até a refrigeração de ambientes. Qualquer remoção de calor de um corpo ou sistema pode ser denominada refrigeração (MILLER; MILLER, 2014).

Naturalmente, a transferência de calor ocorre do ambiente de maior temperatura para o de menor. O sistema de refrigeração possibilita a realização da operação inversa, ou seja, transferir calor do ambiente de menor calor para o de maior. Dessa forma, pode-se definir um sistema de refrigeração como um conjunto de elementos que operam com o objetivo de transferir calor de um ambiente à baixa temperatura para um ambiente à alta temperatura (ÇENGEL; BOLES, 2013).

#### **2.1.1: Elementos do sistema de refrigeração**

O sistema de refrigeração geralmente é composto por quatro elementos principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. O fluido

utilizado pelo sistema para transportar o calor, recebe o nome de refrigerante (MILLER; MILLER, 2014). Atualmente, os refrigerantes mais empregados em sistemas de refrigeração são o R134a e R600a (MILLER; MILLER, 2014).

A força motriz para a circulação do fluido é a diferença de pressão. O compressor eleva a pressão do fluido, convertendo o trabalho de eixo fornecido pelo motor em energia mecânica para o fluido (ÇENGEL; BOLES, 2013).

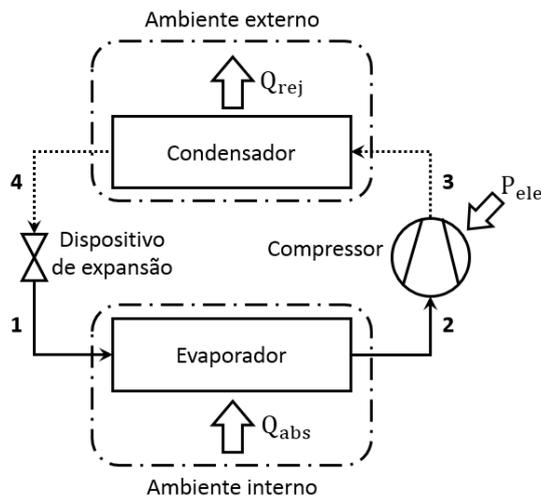
O ciclo de refrigeração pode ser compreendido ao acompanhar a circulação de uma partícula de fluido refrigerante pelo sistema. No ponto 1 da figura 3, tem-se o refrigerante na condição de líquido saturado. Nessa condição, qualquer acréscimo de energia provoca mudança de fase. Ao circular pelo evaporador, o fluido absorve calor do ambiente interno e evapora. Dessa forma, no ponto 2, tem-se o refrigerante no estado de vapor.

O processo de vaporização permite o reaproveitamento do vapor, garantindo um abastecimento contínuo de refrigerante para o sistema. Para reutilizar o vapor, é necessário que o refrigerante atinja uma pressão que possibilite a sua condensação à temperatura ambiente (DOSSAT, 2004). O compressor auxilia nessa função, elevando a pressão do fluido. Dessa forma, no ponto 3, tem-se o refrigerante no estado de vapor, em uma condição de alta pressão.

Na sequência, o refrigerante alcança o condensador, que normalmente fica isolado do sistema, permitindo a troca de calor com o ambiente externo. Dessa forma, o refrigerante cede calor e retorna à condição de saturação. Assim, no ponto 4, tem-se o refrigerante em uma condição na qual coexistem as fases líquida e gasosa. Ao passar pelo dispositivo de expansão, o refrigerante tem sua pressão reduzida e retorna ao ponto inicial no estado líquido, pronto para ser recirculado.

Como o refrigerante é uma substância pura, a mudança de fase pressupõe uma relação entre pressão e temperatura, de maneira que a definição de uma pressão implica uma temperatura correspondente, e vice-versa. Esse comportamento é característico para cada substância e permite que as temperaturas de mudança de fase sejam controladas pelos níveis de pressão que o sistema impõe ao fluido.

Figura 3: Circuito de refrigeração básico



Fonte: elaborado por Eng. Rafael Schmitz

Onde:

$P_{ele}$	potência elétrica	.....	alta pressão
$Q_{rej}$	calor rejeitado	—	baixa pressão
$Q_{abs}$	calor absorvido		

### 2.1.2: Condições de operação

A operação de um sistema de refrigeração é descrita pelas temperaturas de evaporação e de condensação (STOECKER, 2002). A primeira representa a temperatura na qual o fluido a baixa pressão passa do estado líquido para o estado de vapor, ou seja, a temperatura mínima fornecida pelo equipamento. Alterações na temperatura de evaporação se refletem como alterações na temperatura interna do gabinete de refrigeração.

A temperatura de condensação representa a temperatura na qual o fluido a alta pressão passa do estado de vapor para líquido. Essa temperatura deve ser mais alta do que a temperatura do ambiente para permitir que o sistema ceda calor ao meio externo, promovendo a condensação do fluido (STOECKER, 2002).

As temperaturas variam de acordo com a aplicação, modificando as condições de operação dos componentes do sistema. Segundo informações do corpo técnico da Embraco, os intervalos de operação das temperaturas são os seguintes:

- Temperatura de evaporação: **(-40 a +20) °C.**
- Temperatura de condensação: **(+25 a +65) °C.**

Essas informações foram utilizadas para construção do mapa de referências da Figura 1.

Em um sistema de refrigeração o fluido tipicamente encontra-se saturado no interior dos trocadores de calor. Nessa situação, pressão e temperatura se tornam propriedades dependentes, de forma que existe uma relação entre elas (STOECKER, 2002). Baseado nessa relação e utilizando algumas aproximações, é possível expressar a condição de operação do compressor em termos de uma grandeza conveniente.

Considerando mínimas as perdas no circuito, pode-se aproximar a pressão no evaporador pela pressão na admissão do compressor, da mesma forma que a pressão do condensador pode ser aproximada pela pressão na descarga. Aplicando a curva de saturação apropriada para o fluido de trabalho utilizado, é possível converter as pressões medidas em temperaturas correspondentes, permitindo um reconhecimento mais rápido por parte dos operadores acostumados à avaliação de sistemas de refrigeração.

As pressões de sucção e descarga podem ser convertidas para as temperaturas correspondentes utilizando a tabela termodinâmica para o refrigerante empregado. No caso da bancada alvo deste trabalho é utilizado o fluido R134a.

## **2.2: Controle Regulatório**

O controle regulatório visa, através da manipulação de uma variável, alterar os estados de um sistema a fim de manter o processo em torno de um ponto de operação desejado (SEBORG et al., 2011).

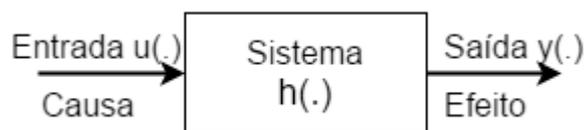
Esta seção revisará os conceitos teóricos sobre controle de processos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentados conceitos sobre identificação de sistemas dinâmicos, especificações de projeto, sintonia de controladores e considerações práticas de implementação de sistemas de controle.

### 2.2.1: Identificação de sistemas

A identificação de sistemas busca, a partir da aplicação de uma entrada conhecida no processo e da medição da resposta, encontrar um modelo matemático que represente todos os aspectos essenciais do sistema (COELHO, 2004).

Em modo geral, são conhecidos a entrada  $u(.)$  e a saída  $y(.)$  e deve-se obter o modelo  $h(.)$ , que caracteriza a dinâmica do sistema, a partir da relação causa e efeito. A Figura 4 ilustra os elementos envolvidos no procedimento de identificação.

*Figura 4: Elementos do sistema.*



Fonte: Adaptado de COELHO, 2004.

Vale lembrar que o modelo obtido não é exato, porém, para a elaboração de modelos de processos reais, na prática, geralmente, não necessita-se obrigatoriamente de modelos complexos para o controle de processos (COELHO, 2004).

#### 2.2.1.1: Ensaio ao degrau

Para a identificação das características dinâmicas do processo pode-se usar a resposta ao degrau. Esse teste consiste no chaveamento abrupto da magnitude do sinal de entrada (COELHO, 2004).

Considerando um sistema estável e incorporado numa malha de controle, a resposta ao degrau pode ser obtida através do seguinte procedimento (OGATA, 2002):

- i) alterar para modo manual os controladores;
- ii) alterar a magnitude do sinal de entrada (pode-se realizar um acréscimo ou decréscimo da variável manipulada);
- iii) registrar a saída do processo e aguardar que o sistema entre em regime permanente;
- iv) identificar o modelo a partir da resposta.

No caso deste projeto, os degraus são em tensão, portanto modifica-se a magnitude das tensões aplicadas às válvulas e acompanha-se o efeito nas pressões.

### 2.2.1.2: Modelo de primeira ordem

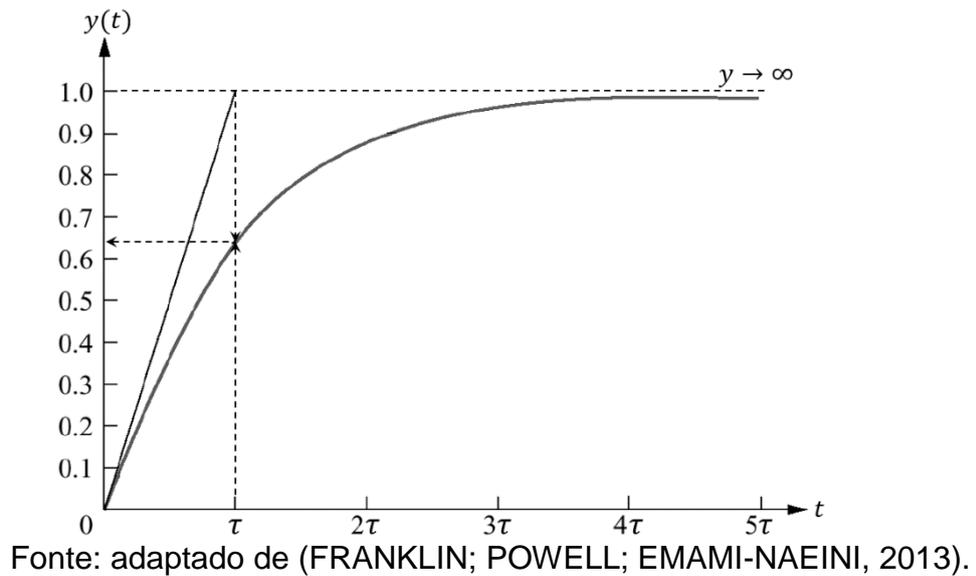
A partir da resposta ao degrau pode-se obter o modelo de primeira ordem paramétrico comumente descrito pela equação (1).

$$G = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Onde  $K$  é o ganho estático, ou ganho de regime permanente,  $\tau$  é a constante de tempo.

A Figura 5 ilustra a resposta ao degrau de amplitude unitária no tempo de um sistema de primeira ordem, que é definida por  $y(t) = K(1 - e^{-t/\tau})$ . Os valores do ganho estático e da constante de tempo são obtidos a partir das equações (2) e (3), extraídas da resposta ao degrau.

Figura 5: Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.



$$y(\tau) = 0,632 \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \quad (2)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - y(0)}{\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) - u(0)} \quad (3)$$

A partir das equações (2) e (3) nota-se que o ganho estático é definido pela variação da saída sobre a variação de entrada e a constante de tempo  $\tau$  é aproximadamente igual ao tempo necessário para que o sistema atinja 63,2% de seu valor de regime permanente.

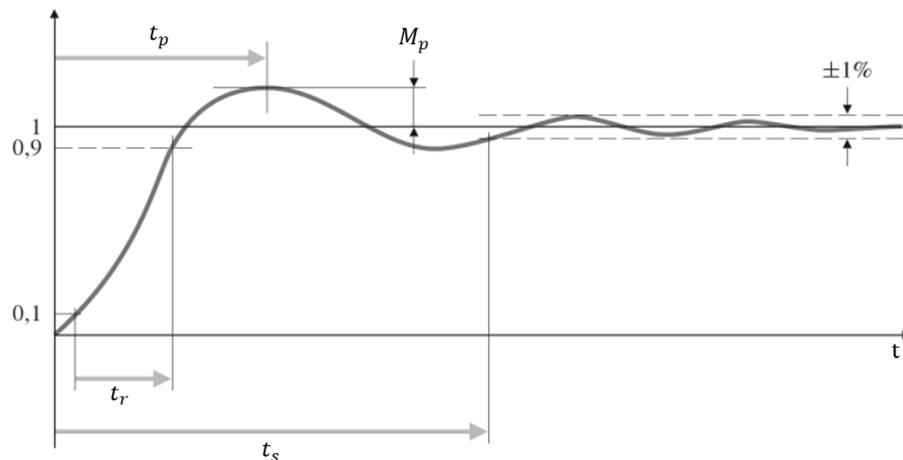
### 2.2.2: Especificações de projeto

As especificações de projeto são construídas a partir da resposta desejada para o sistema e geralmente são definidas a partir das características de regime transitório e de rastreamento de referência, ou regime permanente. As especificações sintetizam as informações necessárias para o projeto e estão

relacionadas com o próprio desempenho, pois, de modo geral, definem a posição desejada dos polos da função de transferência de malha fechada.

A Figura 6 ilustra alguns elementos que representam as características que compõem as especificações.

Figura 6: Especificações no domínio do tempo.



Fonte: adaptado de (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

Os elementos da figura 6 descrevem o comportamento dinâmico do sistema e são descritos a seguir:

**Tempo de subida ( $t_r$ ):** intervalo de tempo no qual a resposta aumenta de 10% para 90% do seu valor final.

**Tempo de acomodação ( $t_s$ ):** tempo necessário para que os transitórios do sistema cessem. Em geral, é especificado através de uma tolerância para o valor de regime permanente.

**Tempo de pico ( $t_p$ ):** tempo necessário para que a resposta atinja seu máximo valor.

**Sobressinal ( $M_p$ ):** o máximo valor que a resposta atinge, dividido pelo valor de regime permanente.

Considerando que o sistema de malha fechada possui dinâmica dominante de segunda ordem, pode-se construir a especificação de projeto através da definição dos polos desejados de malha fechada a partir do tempo de seguimento  $t_s$  e do sobressinal  $M_p$ . A função de transferência de um sistema de segunda ordem é dada pela equação (4).

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

Onde:

$K$     ganho estático  
 $\omega_n$     frequência natural  
 $\zeta$     coeficiente de amortecimento

Dessa forma, os polos dependem dos valores do coeficiente de amortecimento e da frequência natural. Assim, a partir de  $t_s$  e  $M_p$  especificados obtêm-se os valores de  $\zeta$  e de  $\omega_n$  através das equações (5) e (6).

$$M_p = e^{-\zeta\pi / \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5)$$

Através da equação (5) pode-se obter o valor do coeficiente de amortecimento a partir do  $M_p$  especificado.

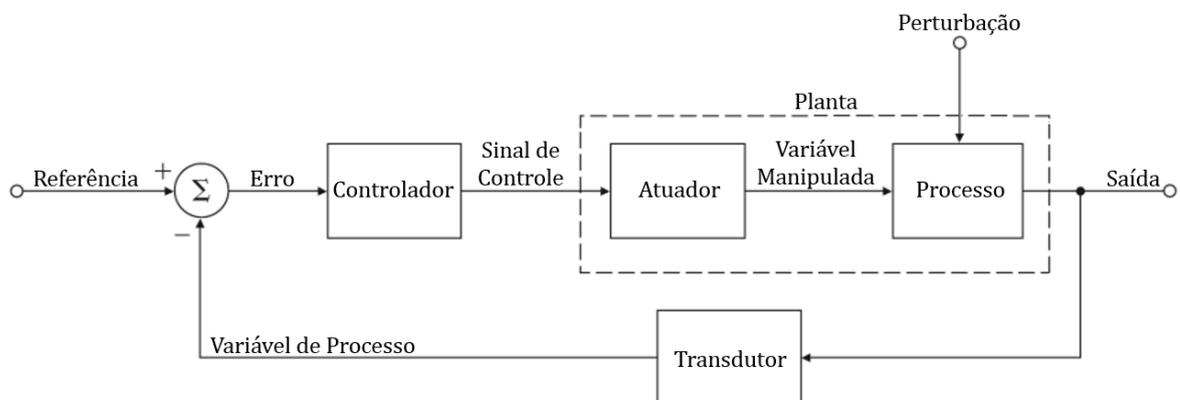
$$t_s (5\%) = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (6)$$

A equação (6) é referente ao tempo de seguimento para que o sistema atinja 95% do valor final.

### 2.2.3: Sistemas realimentados

Os sistemas realimentados são a base da auto-regulação. Visam, a partir da medição da variável que se deseja controlar, aplicar um sinal de correção diretamente no processo a fim de diminuir a diferença em relação ao sinal de referência. A figura 7 ilustra o diagrama de blocos com a disposição clássica dos componentes de um sistema realimentado.

Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema realimentado.



Fonte: adaptado de (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

No diagrama da figura 7, o valor de saída é monitorado continuamente e é comparado com a referência. A diferença entre eles compõe o sinal de erro, que é utilizado para o cálculo do sinal de controle que atuará na planta de forma corretiva.

#### 2.2.3.1: Algoritmo PID

Mais de 90% das malhas de controle implementadas na indústria utilizam o algoritmo de controle proporcional-integral-derivativo (ASTRÖM, HÄGGLUND, 1995). A lei de controle PID no tempo pode ser definida pela equação (7).

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

Onde:

$K_p$  Ganho proporcional

$T_i$  Tempo integral  
 $T_d$  Tempo derivativo

O sinal de controle PID é resultado da soma de três ações que são divididas da seguinte maneira: A ação proporcional corresponde à multiplicação do sinal de erro por um ganho, a ação integral, que é calculada a partir da integral do erro, e por último, a ação derivativa, que consiste no cálculo da derivada do sinal de erro.

A equação (7) consiste na estrutura acadêmica (ISA) da lei de controle PID e pode ser representada pela função de transferência da equação (8), a qual corresponde a estrutura utilizada neste trabalho.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

Os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  devem ser sintonizados de modo que as especificações de projeto sejam atingidas. Os parâmetros podem ser obtidos através da utilização de técnicas de projeto de controladores, como o Método do Lugar das Raízes, Alocação de Polos, ou através de tabelas de sintonia empírica, como o método de Ziegler-Nichols (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

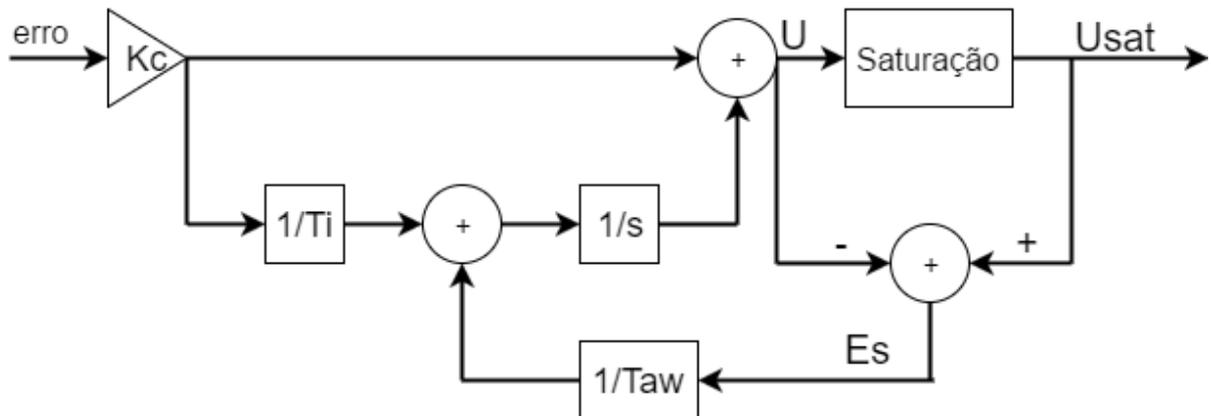
### 2.2.3.2: Efeito Windup

Na prática o sistema de controle possui um intervalo de operação definido pelos limites de atuação do atuador. Quando o sistema atinge os valores extremos do intervalo diz-se que o sinal de controle está saturado. Dessa forma, a realimentação deixa de fazer efeito, deixando o sistema em malha aberta, pois o atuador não responde às variações do sinal de controle.

Se o controlador possuir a ação integradora, em caso de saturação do atuador, o sinal de erro continuará sendo integrado, acumulando indefinidamente a ação de controle. Dessa forma, quando a referência é atingida o sinal de erro se inverte, porém a ação de controle ainda atua compensando o excesso acumulado. Esse fenômeno é chamado de acúmulo da ação integral, ou *windup*, e é responsável por grandes transitórios na resposta do sistema (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

As estratégias que minimizam esse efeito indesejado são chamadas de estratégias *anti-windup*. De modo geral, o princípio de funcionamento é simples, e consiste na redução da parcela integral quando o sinal de controle atinge o valor de saturação. A figura 8 ilustra a estratégia *anti-windup* clássica.

Figura 8: Diagrama de blocos da estratégia *anti-windup*.



Onde:

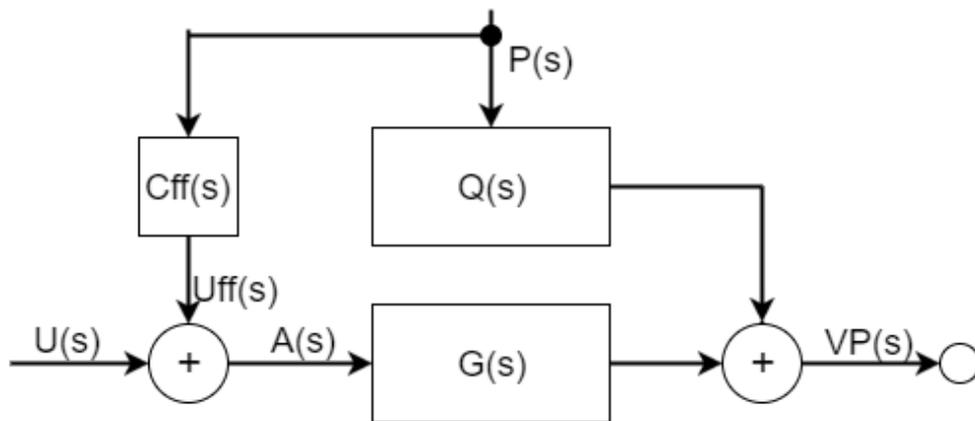
$T_{aw}$	Tempo anti-windup
$U$	Sinal de controle
$U_{sat}$	Sinal de controle saturado

É efetuada a diferença entre  $U$  e  $U_{sat}$ , dentro do intervalo de operação os sinais são iguais, e o comportamento do sistema será o convencional, porém, quando o sinal de controle saturar a ação integradora começará a ser reduzida a fim de diminuir o tempo de permanência na zona de saturação, aliviando o acúmulo de ação de controle.

### 2.2.3.3: Controle Feed Forward

A estratégia *Feed Forward* consiste na antecipação do sinal de controle na presença de perturbações, as quais devem ser mensuráveis para a implementação da técnica. Dessa forma, pode-se atenuar o efeito dos distúrbios no processo (HAUGEN, 2009). A figura 9 ilustra a estratégia.

Figura 9: Diagrama de blocos da estratégia Feed Forward.



Onde:

- $Q(s)$  Dinâmica da relação entre  $VP$  e  $P$
- $G(s)$  Dinâmica da relação entre  $VP$  e  $A$
- $Cff(s)$  Controlador de pré alimentação
- $P(s)$  Perturbação
- $U(s)$  Sinal de controle

Na figura 9 a variável de processo  $VP(s)$  resulta da soma das respostas dos sistemas  $Q(s)$  e  $G(s)$ , que representam a dinâmica da perturbação  $P(s)$  e da ação de controle  $A(s)$ . Dessa forma,  $VP(s)$  é dado pela equação (9).

$$VP(s) = A(s)G(s) + P(s)Q(s) \quad (9)$$

A partir da figura 9, obtemos a expressão para o sinal  $A(s)$  enviado ao processo  $G(s)$ , que é dada pela equação (10).

$$A(s) = U(s) + P(s)Cff(s) \quad (10)$$

Substituindo a equação (10) na equação (9), temos:

$$VP(s) = (U(s) + P(s)Cff(s))G(s) + P(s)Q(s)$$

Juntando os termos em comum resulta em:

$$VP(s) = U(s)G(s) + (Cff(s)G(s) + Q(s))P(s) \quad (11)$$

Assim, para eliminar a contribuição do termo referente à perturbação  $P(s)$  na equação (11) é necessário que  $(Cff(s)G(s) + Q(s)) = 0$ , portanto o  $Cff(s)$  que respeita essa condição é dado pela equação (12).

$$Cff(s) = -\frac{Q(s)}{G(s)} \quad (12)$$

Assim, a variável de processo  $VP(s)$  terá menor influência da perturbação  $P(s)$ .

É importante observar que o  $Cff(s)$  obtido na equação (12) é ideal. Na prática não ocorrerá o cancelamento total da dinâmica, pois  $Q(s)$  e  $G(s)$  são apenas modelos e não representam completamente os sistemas reais. Dessa forma, um resíduo da perturbação permanecerá influenciando o sistema, devendo ser rejeitado pelo controlador (OOSTING, DICKERSON, 1987).

#### 2.2.3.4: Gain Scheduling

A estratégia de escalonamento de ganhos, ou *gain scheduling*, consiste em dividir o intervalo de operação em subintervalos, onde o processo possa ser aproximado por um modelo linear. Dessa forma, pode-se projetar um controlador adequado para todo o intervalo de operação, modificando os parâmetros do controlador de acordo com as modificações dinâmicas do processo (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

## 2.3: Sistemas Automáticos

Pode-se definir a automação como a tecnologia que opera um processo a partir de comandos programados, bem como um conjunto de técnicas e operações, com objetivo de tornar os sistemas mais eficientes e, dessa forma, maximizar a produção (DORF, 2001).

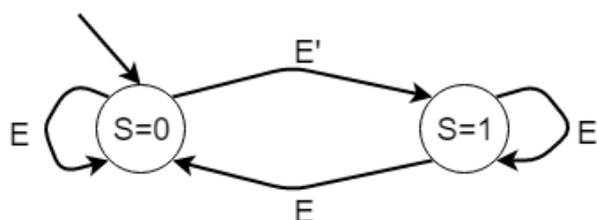
Nesse contexto, esta seção tem o objetivo de revisar os conceitos teóricos de algumas técnicas implementadas para o desenvolvimento dos sistemas autônomos, pertinentes ao escopo deste trabalho.

### 2.3.1: Máquinas de Estados Finitos

As máquinas de estados finitos (do inglês Finite State Machine, FSM), ou autômatos finitos, consistem em modelos matemáticos que representam programas de computador ou circuitos lógicos. Cada estado possui suas informações, ações e condições de transição, que indicam as mudanças de estado. A máquina pode estar em apenas um estado por vez, o chamado estado atual (WRIGHT, 2005).

As FSMs geralmente são representadas graficamente por diagramas, os quais definem os estados por círculos e as transições por flechas. A figura 10 ilustra um diagrama de estados finitos.

*Figura 10: Diagrama de estados finitos.*



Na figura 10, o estado inicial é indicado pela flecha. Cada estado define o valor da variável  $S$ . A variável  $E$  representa o evento de transição.

## 2.4: Programação concorrente

A programação concorrente é a base dos sistemas multiprogramáveis, compostos por duas ou mais tarefas que podem compartilhar os diversos recursos do Sistema Computacional (OLIVEIRA, 2008).

Dessa forma, no sistema multiprocessado pode ocorrer a chamada condição de corrida, que é a condição caracterizada pela situação na qual as tarefas podem compartilhar a mesma informação e o resultado da operação depende de quem a executa e, precisamente, quando a executa (OLIVEIRA, 2008).

A parte do programa no qual a tarefa acessa informações compartilhadas é chamada de seção crítica. Deve-se garantir sincronismo de acesso das tarefas na seção, a fim de evitar uma condição de corrida. Para isso, nenhuma tarefa deve entrar na seção crítica ao mesmo tempo (OLIVEIRA, 2008).

Uma solução para proteger as informações compartilhadas é implementar o método da exclusão mútua, o *mutex*, que impede o acesso de duas ou mais tarefas na seção crítica. A técnica de semáforos, implementa o *mutex*, e pode garantir o sincronismo na execução das operações das tarefas.

O semáforo é um tipo abstrato de dado composto por um valor inteiro e uma fila de processos. Existem duas operações básicas sobre semáforos: operação de testar (*proberen*) e a operação de incrementar (*verhogen*). Quando uma tarefa executa a operação P (testar) sobre um semáforo, o seu valor inteiro é decrementado. Se o valor do semáforo for negativo, o processo é bloqueado e inserido no fim da fila desse semáforo. Quando um processo executa a operação V (incrementar) sobre um semáforo, o seu valor inteiro é incrementado. Caso exista algum processo bloqueado na fila, o primeiro processo é liberado (OLIVEIRA, 2008).

Dessa forma, para utilizar a solução em uma aplicação que gere uma condição de corrida basta que, para cada estrutura de dados compartilhada, seja utilizado um semáforo. Toda tarefa antes de acessar essa estrutura deve realizar uma operação de teste do semáforo (P). Ao sair da seção crítica, o processo deve realizar uma operação V sobre o semáforo (OLIVEIRA, 2008).

## **2.5: Comentários Finais**

Os conceitos teóricos revisados neste capítulo foram fundamentais para a elaboração da proposta de solução para o projeto do sistema de controle das pressões e automação do ensaio. Os estudos possibilitaram uma formulação concreta para o desenvolvimento e implementação do projeto, detalhados no capítulo 4.

## Capítulo 3: A bancada

A bancada de ensaios foi construída para emular o comportamento do compressor no sistema de refrigeração sob as diversas condições de operação possíveis. A montagem da bancada, seleção e instalação dos instrumentos, bem como a configuração do sistema de aquisição de dados, já estavam prontos antes do início deste trabalho. Porém, para o desenvolvimento da estratégia de controle e automação do ensaio foi fundamental o estudo e compreensão do processo, dos recursos envolvidos e de sua instrumentação.

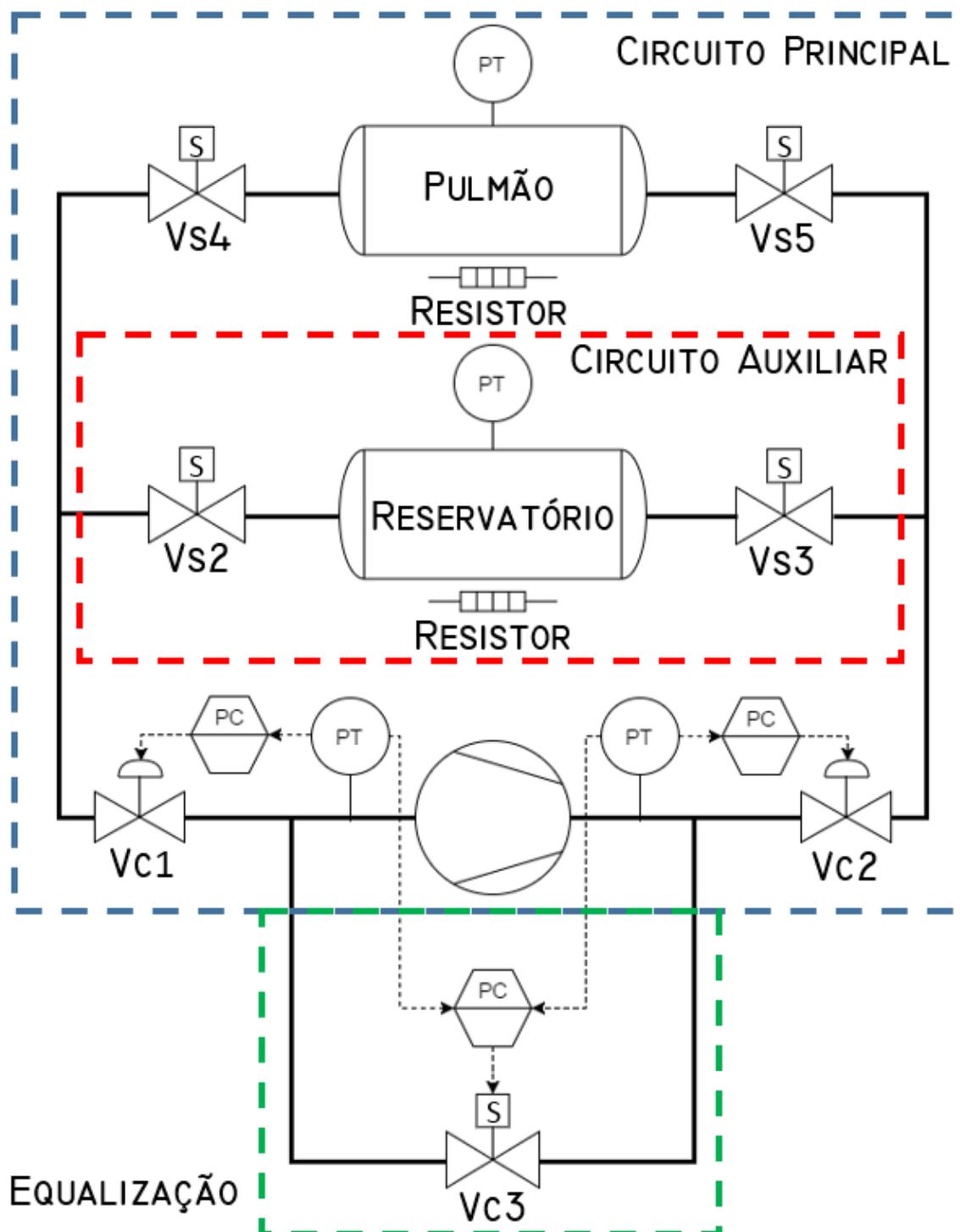
Portanto, o objetivo deste capítulo é explicar a bancada que incorpora o ensaio automático, dessa forma, demonstrando todos os elementos que a constituem, além de fornecer uma explanação sobre o software desenvolvido para a supervisão, controle e aquisição de dados. Desse modo, sustentando o desenvolvimento do projeto descrito no capítulo 4.

### 3.1: Diagrama de processo e instrumentação

O processo pode ser dividido em três circuitos. O circuito principal é responsável pela emulação e consiste no corpo do processo. O circuito auxiliar será utilizado como reservatório de fluido e tem como função liberar ou retirar carga do sistema quando necessário. E por último, o circuito de equalização que possibilita a transferência de pressão da descarga para a tomada de sucção a fim de equalizar as pressões. A figura 11 demonstra o diagrama P&ID completo da bancada.

No diagrama podem-se observar as três malhas de controle, compostas pelos transmissores de pressão, controladores implementados em computador e as válvulas utilizadas para atuação. As malhas são de controle das pressões de sucção, de descarga e de equalização.

Figura 11: Diagrama P&ID da bancada.



O reservatório pulmão instalado no circuito principal possui a função de desacoplar mecanicamente as pressões de sucção e de descarga, dessa forma, atenuando as influências dinâmicas entre as variáveis de processo. Essa configuração possibilita o controle do compressor nos pontos de operação através de controladores independentes para as pressões. A pressão interna desse reservatório é monitorada por transmissor e ele pode ser isolado pela atuação das válvulas solenoides Vs4 e Vs5. Da mesma forma, o reservatório do circuito auxiliar pode ser isolado através de Vs2 e Vs3.

Em ambos os reservatórios foram instalados resistores térmicos para aquecer o fluido, quando necessário, assim elevando a pressão interna e possibilitando que o processo alcance as condições mais críticas.

Foi adicionada uma válvula no ramo de equalização para controlar a diferença entre as pressões de descarga e de sucção, possibilitando atingir condições nas quais os valores dessas pressões sejam próximos.

## **3.2: Instrumentação**

Segundo Seborg, a efetividade de um sistema de controle está relacionada diretamente com a escolha da instrumentação, de modo que as características dos instrumentos de medição e atuação podem limitar o bom desempenho do sistema de controle (SEBORG et al., 2011).

### **3.2.1: Válvulas**

As válvulas têm por objetivo atuar no sistema, alterando a vazão de fluido refrigerante, de modo a controlar, conforme desejado, as variáveis de processo. Foram utilizadas três válvulas de controle na bancada. Uma para o controle da sucção, outra para o controle da descarga e uma terceira para a linha de equalização.

### 3.2.1.1: Válvula de descarga

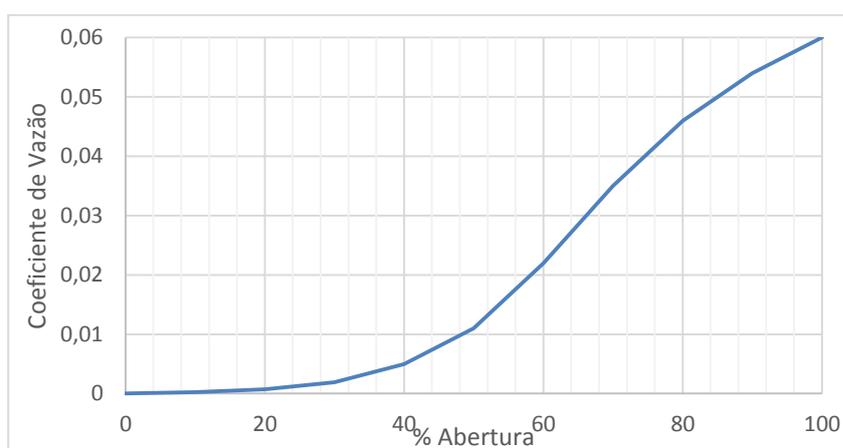
Para o controle da pressão de descarga foi utilizada uma válvula com atuador pneumático do tipo mola e diafragma, modelo Baumann 51000. O fabricante é a Fisher, empresa do grupo Emerson Process Management. O quadro 1 resume as informações pertinentes para projeto do sistema de controle.

*Quadro 1: Resumo das informações para a válvula de descarga.*

Tipo de válvula	Posicionador	Operação	Sinal de entrada	Sinal de saída
Válvula globo	Fisher	Ação Direta	(0 a 10) V	Pneumático

Na válvula globo a vazão de fluido é regulada pela translação do tampão e apresenta boa vedação quando totalmente fechada. A ação direta significa que a válvula fecha ao aplicar ar na câmara do atuador, dessa forma caracterizando-a como normalmente aberta. Já o posicionador Fisher, além de realizar um controle local para a válvula funcionar como servoválvula, é responsável também por converter o sinal elétrico, a variável manipulada, num sinal pneumático proporcional. Essa válvula apresenta uma relação não linear da vazão/abertura. A figura 12 ilustra a relação do coeficiente de vazão e abertura da válvula.

*Figura 12: Relação entre o coeficiente de vazão e abertura da válvula.*



Fonte: Fornecido pelo fabricante.

### 3.2.1.2: Válvula de sucção

Para a pressão de sucção utilizou-se uma válvula termostática com capilar acionado por regulador eletropneumático, que converte o sinal elétrico em sinal pneumático. Essa válvula apresenta uma característica linear. O Quadro 2 resume as informações pertinentes ao controle.

*Quadro 2: Resumo das informações da válvula de sucção.*

Regulador	Operação	Sinal de entrada	Sinal de saída
Festo	Ação direta	(0 a 10) V	Pneumático

### 3.2.2: Transmissores

Transmissores de pressão são instrumentos compostos por um elemento primário, pelo transdutor e um condicionador de sinais. O elemento primário fica em contato direto com o processo. O transdutor converte a grandeza medida em um sinal conveniente que depois é condicionado e transmitido (BEGA, 2011).

As pressões do processo foram monitoradas através de transmissores selecionados conforme o intervalo de operação esperado para o ponto de medição. São do tipo piezorresistivo e fornecem um sinal de saída em tensão, proporcional à pressão medida. O resumo das características metrológicas é apresentado na tabela 1.

*Tabela 1: Características metrológicas dos transmissores.*

Ponto de medição	Pressões esperadas	Transmissor	Intervalo Operação	Sinal de Saída
Sucção	(0,5 a 6) bar	WIKA P-10	(0 a 25) bar	(0 a 5) V
Descarga	(6 a 30) bar	Velki IT-TR	(0 a 50) bar	(0 a 5) V
Pulmão	(0 a 10) bar	Zurich PSI.05	(0 a 30) bar	(0 a 5) V
Reservatório	(0 a 10) bar	Zurich PSI.05	(0 a 30) bar	(0 a 5) V

O princípio de funcionamento do transdutor piezorresistivo é baseado na variação de resistência causada pela deformação de um extensômetro integrado

diretamente no diafragma através do mesmo substrato de silício. O instrumento apresenta estabilidade, alta sensibilidade e confiabilidade. (BEGA, 2011).

### 3.2.3: Sistema de aquisição

O sistema de aquisição (DAQ) é composto pelos transmissores, pelo módulo de aquisição e pelo software programável no computador. O módulo DAQ é responsável pela interface com a unidade de processamento, digitalizando os sinais analógicos gerados pelos transmissores. Ele também efetua a comunicação com o computador, enviando medições e recebendo instruções através do barramento USB (*Universal Serial Bus*).

O módulo DAQ utilizado é do fabricante National Instruments, modelo USB-6353, contando com 32 entradas analógicas, 4 saídas analógicas, 48 canais digitais e conversor analógico-digital com 16 bits de resolução. Quatro entradas analógicas foram usadas na recepção dos sinais de pressão. Três saídas analógicas foram usadas para enviar os sinais de comando para as válvulas de controle. Além disso, 9 canais digitais foram usados para comandar os componentes de atuação discreta (solenoides, resistores, compressor). Um diagrama da arquitetura utilizada é apresentado na figura 13.

Figura 13: Arquitetura da instrumentação.



### 3.3: Software

O software programável em computador controla a operação do dispositivo DAQ, sendo usado para o processamento, supervisão e armazenamento dos dados de medição. Para a implementação do software foi utilizado a ferramenta LabVIEW e seus pacotes de expansão. Essa plataforma de desenvolvimento permite que a informação seja tratada de maneira customizada, favorecendo a criação de soluções simples e versáteis.

#### 3.3.1: Funções gerais

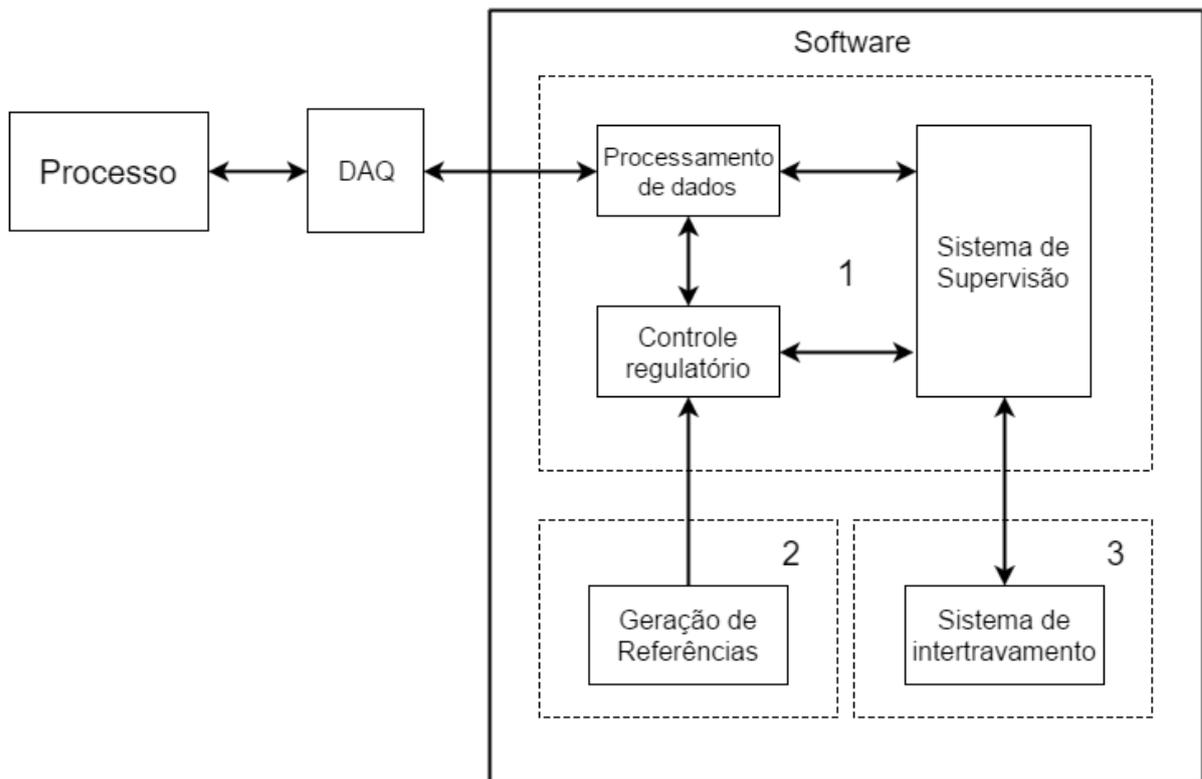
Toda a estratégia de controle e automação do ensaio é implementada através do software, que possui as funções de gerenciar a aquisição, o processamento e a conversão dos dados. O software também executa as malhas de controle e gerencia os sistemas de geração de referências automáticas e de intertravamento.

O programa é dividido basicamente em três tarefas paralelas cíclicas. O *Laço 1*, responsável pelo tratamento dos dados, pelas malhas de controle e pela supervisão. O *Laço 2* é a rotina responsável pelo sistema de geração das referências automáticas. Por último, o *Laço 3* incorpora a execuções das ações de intertravamento. O diagrama da figura 14 ilustra a divisão das tarefas e as funções gerais do software.

O período de execução do *Laço 1* é o mesmo da taxa de amostragem e foi definido em 0,1 segundo, ou 10 amostras por segundo. Esse tempo foi definido a partir das dinâmicas esperadas de malha fechada. Com esse valor não houve perdas consideráveis em relação à dinâmica do processo e esse tempo se mostrou suficiente para o controle das pressões.

No processamento de dados ocorre a conversão da pressão em temperatura, baseada nas tabelas termodinâmicas para o fluido refrigerante utilizado, dessa forma, enviando a informação para visualização gráfica no supervisório.

Figura 14: Divisão do software em funções gerais.



O usuário visualiza as condições de operação do processo em temperatura, porém, a pressão é a variável de processo controlada. Portanto o controle regulatório trabalha com os dados das medições das pressões, assim, as referências geradas no *Laço 2* são em valores de pressão.

A separação das funções em tarefas otimiza a execução do código. O *Laço 1* sempre está em execução, pois ele é o responsável pela medição, cálculo dos controles e atuação, dessa forma incorpora toda comunicação com o processo. Portanto, para manter o compressor estável na condição de operação de referência é fundamental que essa tarefa não seja interrompida, e mantenha seu ciclo de trabalho aproximadamente o mesmo da taxa de amostragem.

A execução do *Laço 2* depende exclusivamente do processo, ou seja, a próxima referência só é gerada quando o sistema alcança o ponto de operação atual. Dessa forma, pode-se dizer que o *Laço 1* está continuamente observando o processo, enquanto é observado pelo *Laço 2*, que por sua vez, é observado pelo *Laço 3*, pois a função de intertravamento depende das informações de localização

originadas a partir do cruzamento das referências de pressão de sucção e de descarga.

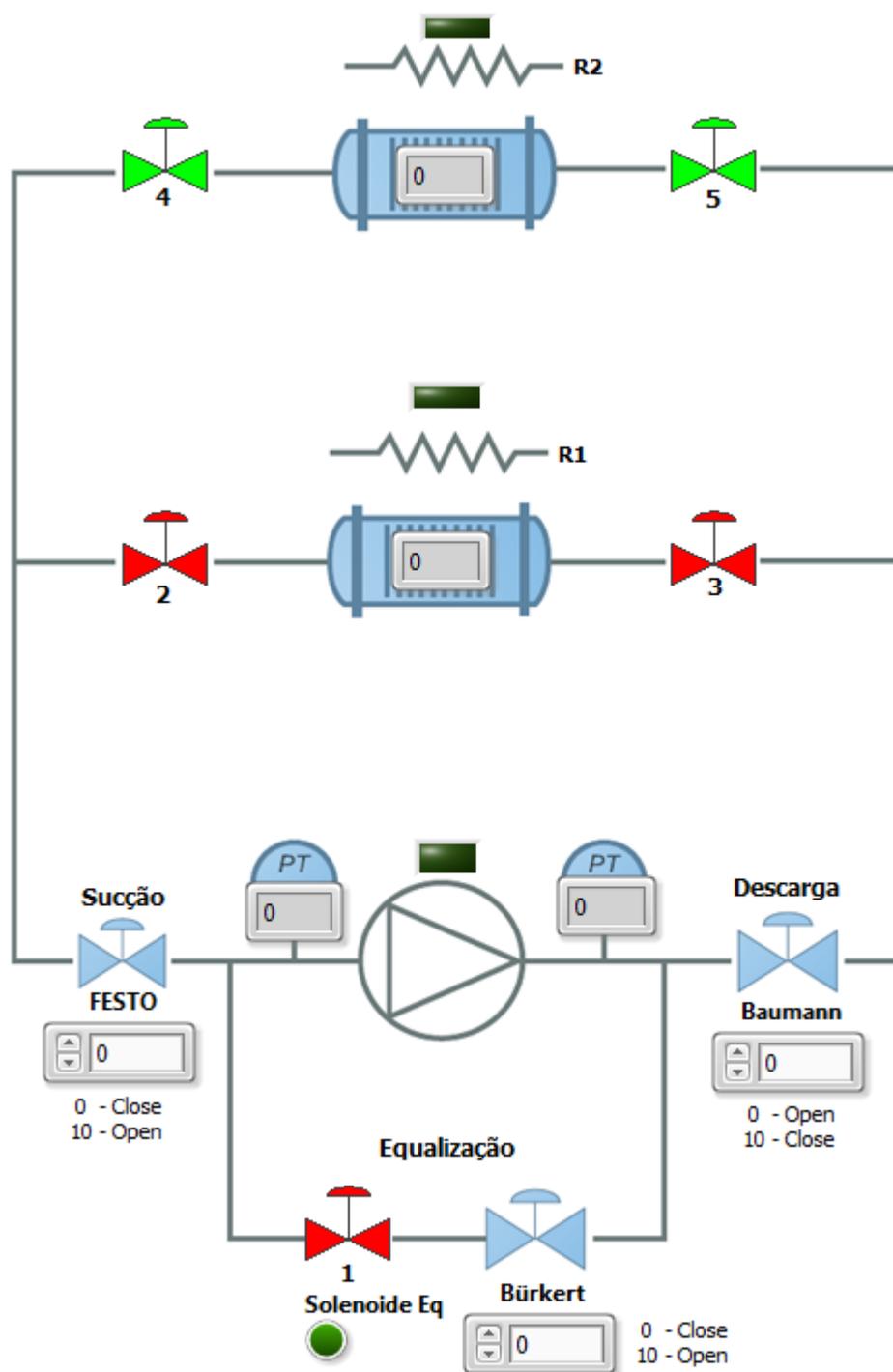
### **3.3.2: Sistema Supervisório**

O sistema supervisório representa a parte gráfica e visual do software. É a interface com o usuário, onde o mesmo pode verificar a atual condição de operação do compressor, monitorar as variáveis de processo, comandar todos os dispositivos da bancada, sintonizar os parâmetros dos controladores e gerenciar o andamento do ensaio.

A ferramenta LabVIEW possibilita a construção de sistemas de supervisão intuitivos. Foi possível organizar numa mesma tela todas as informações pertinentes à bancada, assim permitindo ao usuário acompanhar todo o processo ao longo do ensaio, bem como o desempenho do sistema.

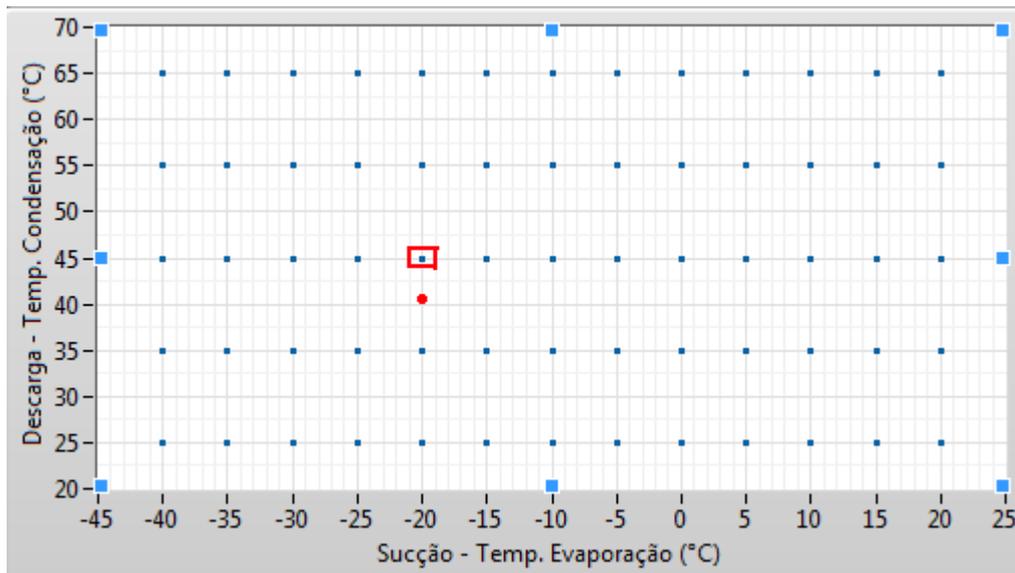
A figura 15 ilustra a tela sinótica para a supervisão da bancada. O usuário pode acionar as solenoides, os resistores térmicos, aplicar tensões às válvulas de controle, quando em modo manual, e pode monitorar as medidas das pressões nos pontos de sucção e descarga, bem como, nos reservatórios. Também, pode-se ligar ou desligar o compressor.

Figura 15: Tela sinótica do sistema supervisório.



Já a figura 16, ilustra o mapa de referências que auxilia o usuário a visualizar a atual condição de operação do compressor, bem como se o ponto de referência foi alcançado.

Figura 16: Mapa de referências das condições de operação.



Na figura 16, os pontos em azul representam as condições de operação que devem ser atingidas ao longo do ensaio. O ponto vermelho representa o estado atual de operação do compressor, já o quadrado vermelho define um intervalo de tolerância de ( $\pm 1$  °C) em torno do ponto de referência, e sempre estará em torno da condição do mapa mais próxima do estado atual. Se o ponto vermelho estiver dentro desse intervalo, o quadrado mudará para a cor verde, indicando que o estado atual está dentro da tolerância.

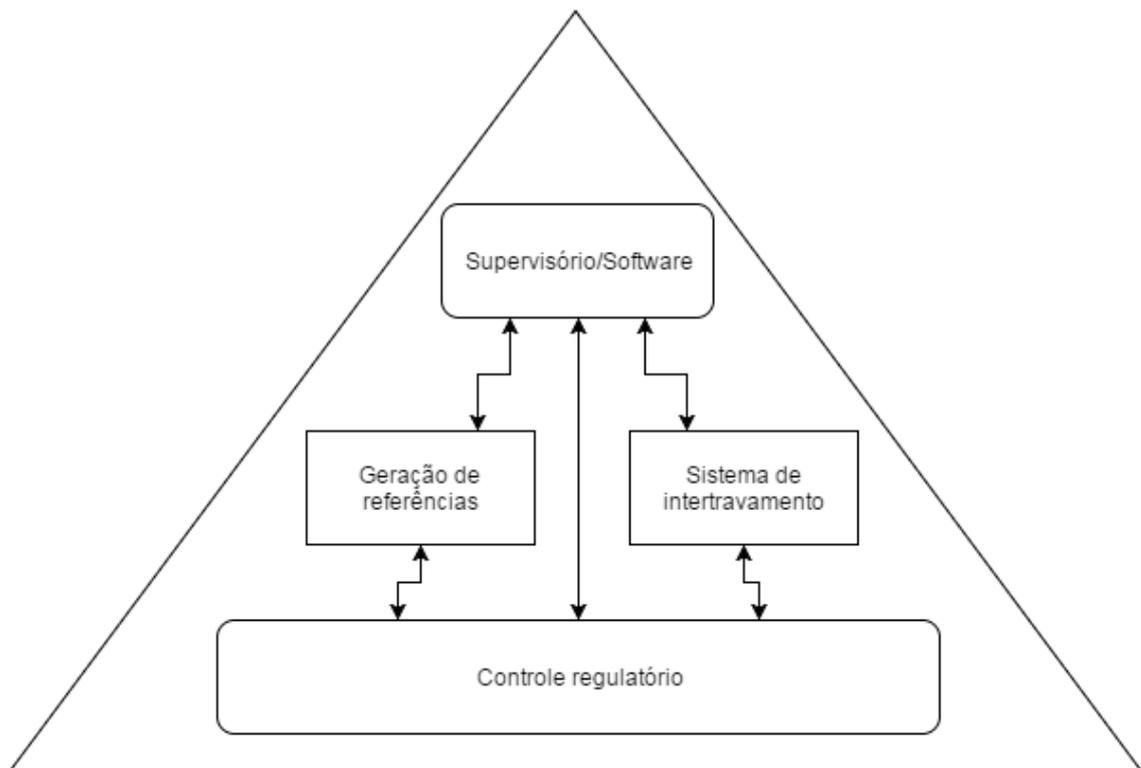
### 3.4: Comentários Finais

Após a montagem da bancada, instalação dos instrumentos e devida configuração do sistema de aquisição e comunicação, foi possível desenvolver e implementar o sistema de controle das condições de operação do compressor e a automação do ensaio.

## Capítulo 4: Desenvolvimento e Implementação

Para fins didáticos, pode-se representar a estratégia de solução do problema de forma hierárquica e disposta em três camadas. A camada superior refere-se ao sistema supervisor, responsável pela interface com o usuário. Na camada intermediária encontram-se os sistemas responsáveis pela geração de referências e intertravamento. Por último, na camada inferior, está o controle regulatório das pressões. As camadas trabalham de forma independente, porém é através do compartilhamento de informação entre elas que a automação completa do ensaio é realizada. A figura 17 ilustra essa visão hierárquica através de uma pirâmide.

*Figura 17: Visão piramidal do projeto.*

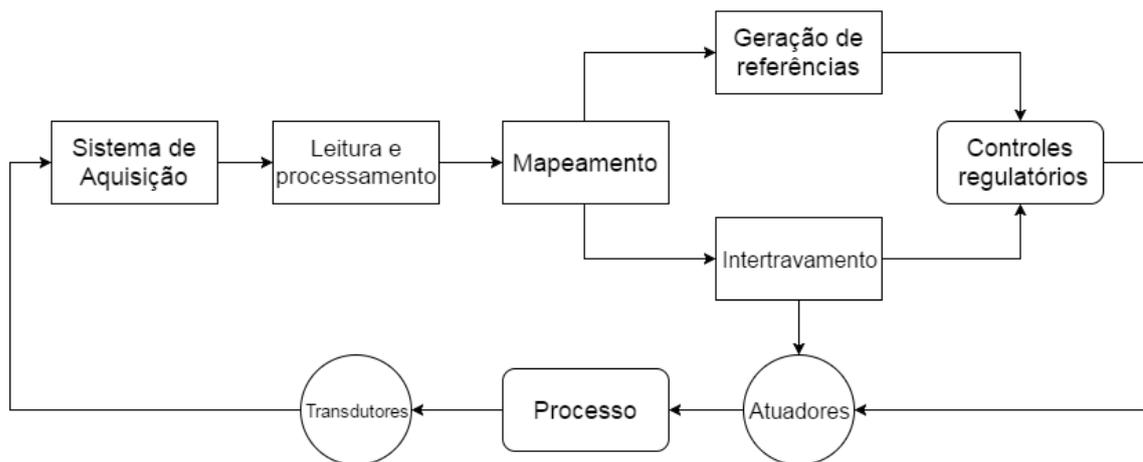


A camada superior possui a função de supervisão do processo. Essa camada é responsável pela aquisição de dados, compartilhando informações com as camadas inferiores. Através dela o usuário possui acesso às informações relevantes da bancada e do ensaio, podendo comandar os atuadores manualmente.

A camada intermediária é responsável por gerenciar a execução de todo o ensaio automático. Nessa camada acontece o mapeamento do sistema, a geração de referências para os controles e também o gerenciamento do disparo das ações da lógica de intertravamento que auxilia o sistema a alcançar os pontos em condições severas de operação, visto que é nesses pontos críticos é necessário o uso de recursos facilitadores. Esses recursos são apresentados em detalhes na seção 4.2.3.:

Na base da solução do sistema encontram-se os controles regulatórios. Essa camada é responsável por levar o sistema até o ponto de operação definido pela referência gerada na camada intermediária, devendo manter o processo estável e controlado nesse ponto até que ocorra a mudança de referência. A figura 18 ilustra o diagrama geral da proposta de solução.

*Figura 18: Diagrama de fluxo de informação da solução.*



Após a leitura das medidas fornecidas pelos transdutores pode-se mapear a condição atual do sistema, ou seja, localizar o estado de operação do compressor no mapa. Feito isso, as referências são geradas e enviadas aos controles de pressão. Baseado na localização realizada pelo mapeamento é possível identificar em qual região o sistema está operando e a partir disso disparar as devidas ações do intertravamento.

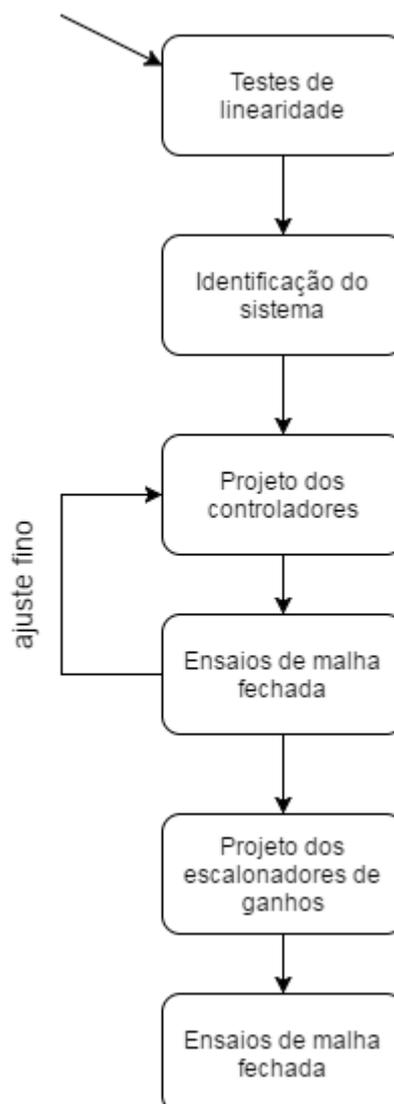
## 4.1: Controle regulatório

### 4.1.1: Projeto

Após a adequada configuração do sistema de aquisição e processamento de dados foi iniciado o desenvolvimento do controle regulatório das pressões. Essa etapa é essencial para o funcionamento do trabalho, pois de certa forma é base de toda a solução.

Para o projeto e implementação dos controles foi utilizado o fluxo de trabalho ilustrado no diagrama da figura 19.

*Figura 19: Fluxo de trabalho adotado para o projeto do sistema de controle.*



Primeiramente foram realizados testes de linearidade com os atuadores, pois geralmente as válvulas possuem características construtivas que modificam sua resposta ao longo do intervalo de operação e isso pode prejudicar o desempenho dos controles. Na prática, o conhecimento desse tipo de comportamento é muito importante para saber o quanto o esforço de controle irá afetar a variável de processo a ser controlada.

Na sequência foi realizada a identificação do sistema através de ensaios em malha aberta. Os modelos obtidos nessa etapa foram utilizados para um levantamento da dinâmica do comportamento do sistema em todas as regiões de operação e para o projeto dos controladores.

Os controladores foram projetados a partir dos modelos dinâmicos e das especificações de controle. Após os ensaios para a identificação do sistema verificou-se que o comportamento das variáveis de processo possui características de um sistema de primeira ordem. Dessa forma, foram implementados controladores do tipo PI para as pressões de descarga e sucção. Segundo Aström e Hägglund (1995), a ação derivativa pode ser desprezada sem prejuízo em situações nas quais a dinâmica dominante é de primeira ordem.

A instalação do reservatório pulmão no circuito da bancada reduziu o acoplamento mecânico entre as pressões e possibilitou a implementação de controladores PI independentes e monovariáveis para as variáveis de processo. Após o projeto, foi realizado ensaio em malha fechada a fim de verificar o desempenho dos controles e realizar ajustes nos parâmetros para a adequação da sintonia.

Visto a grande variação do comportamento do sistema ao longo das regiões de operação e principalmente a não linearidade imposta pelos atuadores, característica mais evidente na válvula de descarga, foi necessária uma adaptação dos parâmetros dos controladores para cada região, pois o desempenho do controle com parâmetros fixos pode não responder como o desejado, levando o sistema à instabilidade, ou apresentar oscilações nocivas aos atuadores. Uma solução para compensar esse problema da não linearidade é desenvolver um escalonador de ganhos para atualizar os parâmetros do controlador de acordo com a região e intervalo de operação (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

Ao final, novos ensaios em malha fechada foram realizados para a validação da estratégia com escalonadores. Avaliou-se, dessa forma, se a resposta está satisfatória e se o sistema se mantém estável em todos os pontos de operação do mapa.

Os passos para o desenvolvimento da camada do controle regulatório serão detalhados nos tópicos 4.1.1.1: 4.1.2: 4.1.3:.

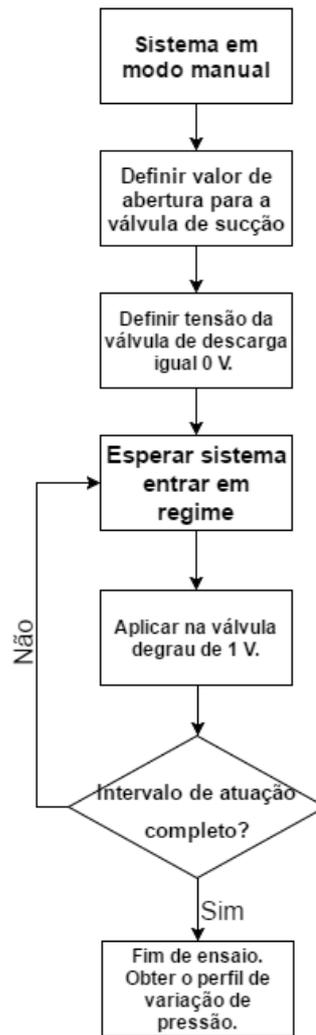
#### **4.1.1.1: Testes de linearidade**

O teste de linearidade foi utilizado para identificar e avaliar quantitativamente a relação em regime permanente entre a abertura das válvulas e as variáveis de processo. O ensaio consiste basicamente na aplicação de pequenos degraus em tensão nos atuadores compreendendo toda a faixa de atuação, e dessa forma, avalia-se a variação das pressões quanto à variação do coeficiente de vazão em relação à tensão aplicada nas válvulas.

##### ***4.1.1.1.1: Linearidade da válvula de descarga***

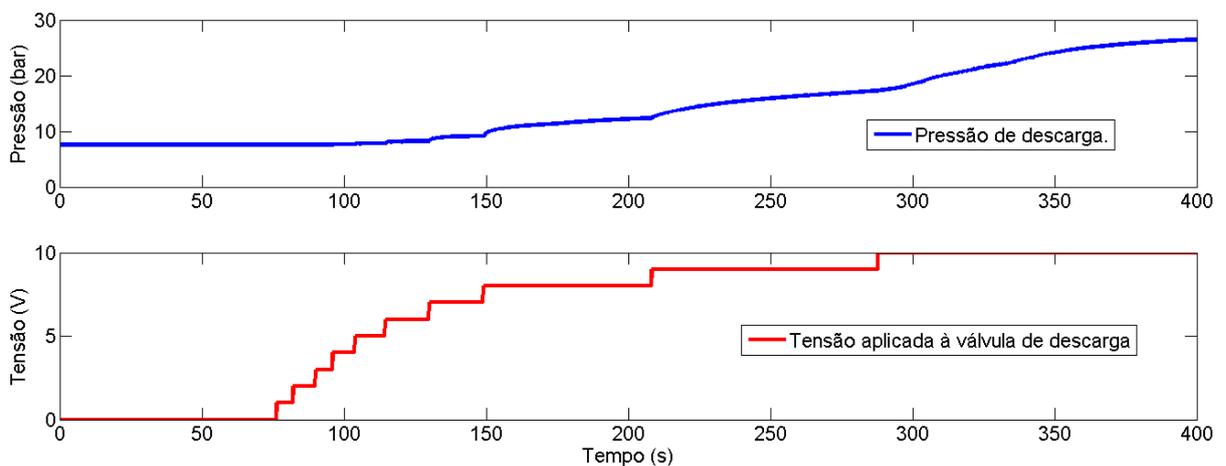
Com objetivo de comparar com os dados fornecidos pelo fabricante foi realizado um ensaio experimental com as válvulas de sucção e descarga. A figura 20 ilustra o fluxo procedural do ensaio para a válvula de descarga. O ensaio busca obter o perfil da variação da pressão através da aplicação de pequenos incrementos de tensão na forma de degraus na válvula, por exemplo de 1 V, e correspondendo toda o intervalo de atuação, no caso de (0 a 10) V.

Figura 20: Diagrama de fluxo das etapas do teste de linearidade dos atuadores.



A figura 21 mostra o resultado do ensaio de linearidade da válvula de descarga. A abertura da válvula de sucção permaneceu constante e totalmente fechada.

Figura 21: Teste de linearidade da válvula de descarga.



Conforme os degraus são aplicados na entrada, a variação da pressão em relação ao passo anterior aumenta, ou seja, o ganho em pressão fica maior a cada degrau.

Com os ensaios de linearidade concluídos pode-se obter o perfil de ganhos em pressão ao longo da faixa de atuação. Para o levantamento desses ganhos basta subtrair os valores finais das pressões a cada passo. O ganho é calculado segundo a equação (13).

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (13)$$

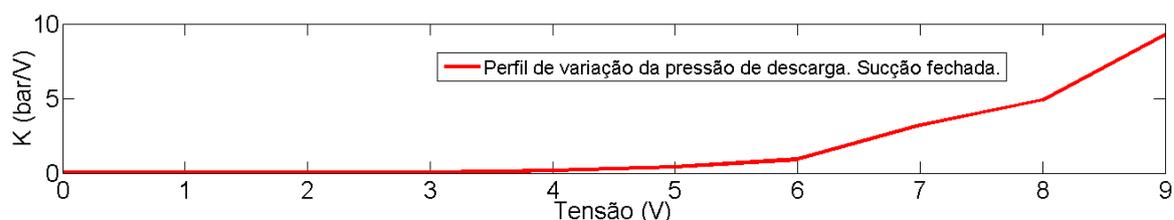
Onde:

$\Delta p$	Variação de pressão
$\Delta V$	Variação de tensão
$K$	Ganho

A tabela 2 mostra os ganhos referentes ao ensaio da figura 21.

A figura 22 mostra o perfil do ganho da válvula de descarga em relação à tensão aplicada. Pode-se concluir que a variação de pressão não é linear ao longo do intervalo de atuação da válvula e o ganho em pressão é maior para os valores em tensão acima de 6 V. Também nota-se que a variação de pressão não é tão expressiva para as tensões inferiores à 4 V. Esse resultado já era esperado e confere com os dados fornecidos pelo fabricante da válvula empregada.

Figura 22: Perfil da variação da pressão de descarga em relação à tensão aplicada.



*Tabela 2: Ganhos em pressão em relação às tensões.*

<b>Tensão (V)</b>	<b>Pressão (bar)</b>	<b>K (bar/V)</b>
<b>0</b>	7,55	0,01
<b>1</b>	7,56	0,02
<b>2</b>	7,58	0,05
<b>3</b>	7,63	0,02
<b>4</b>	7,65	0,15
<b>5</b>	7,80	0,40
<b>6</b>	8,20	0,91
<b>7</b>	9,11	3,19
<b>8</b>	12,30	4,89
<b>9</b>	17,19	9,28
<b>10</b>	26,47	-

#### **4.1.1.2: Linearidade e histerese da Válvula de Sucção**

O procedimento descrito na figura 20 foi repetido para a válvula de sucção, pois a mesma possui distintas características construtivas e de atuação da válvula de descarga. Vale lembrar que a válvula de sucção é normalmente fechada, portanto a tensão 10 V representa 100% de abertura.

Os gráficos das figuras 23 e 24 representam o teste de linearidade da válvula de sucção. Na primeira foram aplicados os degraus no sentido crescente e no segundo, de forma decrescente. A ideia de realizar o ensaio em ambos os sentidos é identificar a presença de histerese no atuador. Em ambos os ensaios foram aplicados degraus com incremento de 0,5 V.

Esse ensaio de identificação da histerese só foi executado para a válvula de sucção, pois segundo a trajetória de ensaio definida seção 4.2.1.1., a pressão de sucção será varrida em ambos os sentidos, enquanto a pressão de descarga somente no sentido crescente.

Figura 23: Teste de linearidade da válvula de sucção. Ensaio crescente.

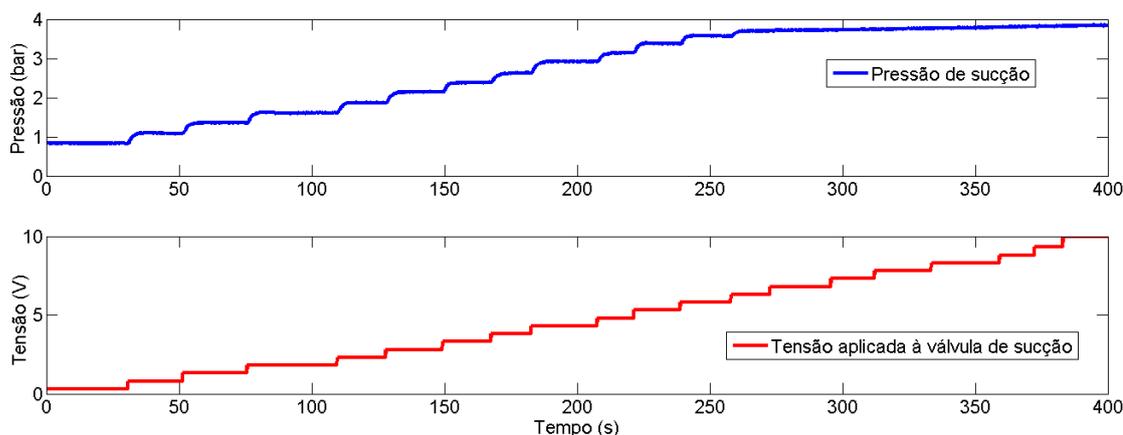
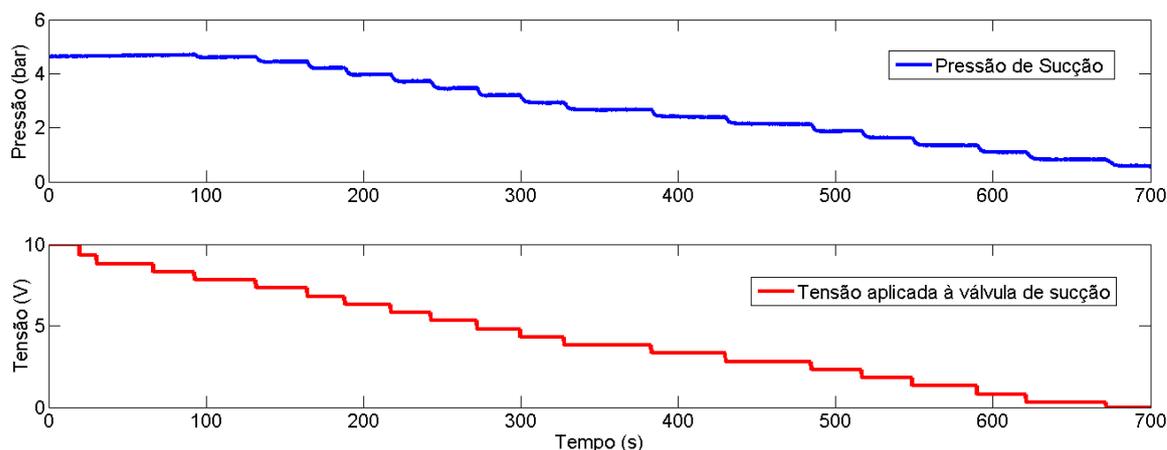


Figura 24: Teste de linearidade da válvula de sucção. Ensaio decrescente.



A partir dos ensaios visualiza-se que as variações das pressões são relativamente lineares, pois para os diferentes degraus no intervalo de atuação os ganhos em pressão são praticamente equivalentes. É importante observar que para os valores acima de 6 V as variações de pressão são insignificantes. Outro fator que deve ser considerado é a limitação da bancada em aumentar a pressão de sucção somente através da atuação da válvula, pois para atingir valores maiores que 4 bar é necessário o uso da linha de equalização, como comentado na seção 3.1.:

Os perfis de ganho de pressão de sucção em relação à tensão aplicada na válvula estão ilustrados nas figuras 25 e 26, sentidos crescente e decrescente, respectivamente.

Figura 25: Perfil de ganho em pressão em relação à tensão aplicada. Ensaio crescente.

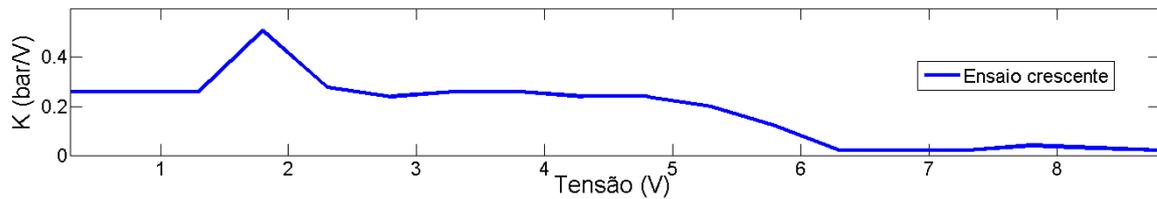
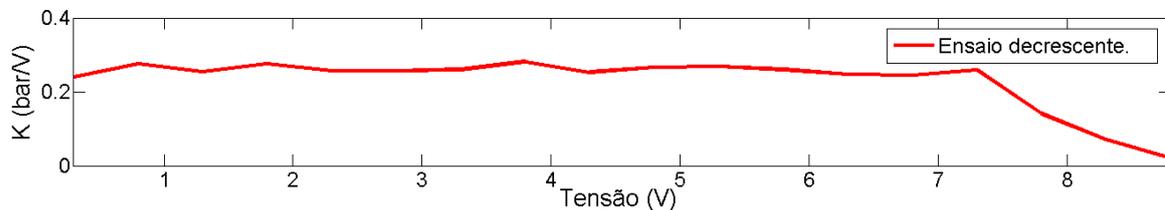


Figura 26: Perfil de ganho em pressão em relação à tensão aplicada. Ensaio decrescente.



No geral, os dois ensaios apresentaram um perfil de ganho linear, ou seja, a variação de pressão foi praticamente equivalente para cada degrau de mesma intensidade aplicado à válvula. Porém pode-se notar que para o caso do ensaio crescente para os valores acima de 6 V o ganho é desprezível, apresentando pouca variação na pressão. Já para o ensaio decrescente o efeito de redução de ganho está contido no intervalo de 10 V a 7.3 V. Podemos entender esse deslocamento do intervalo de atuação como uma histerese da válvula.

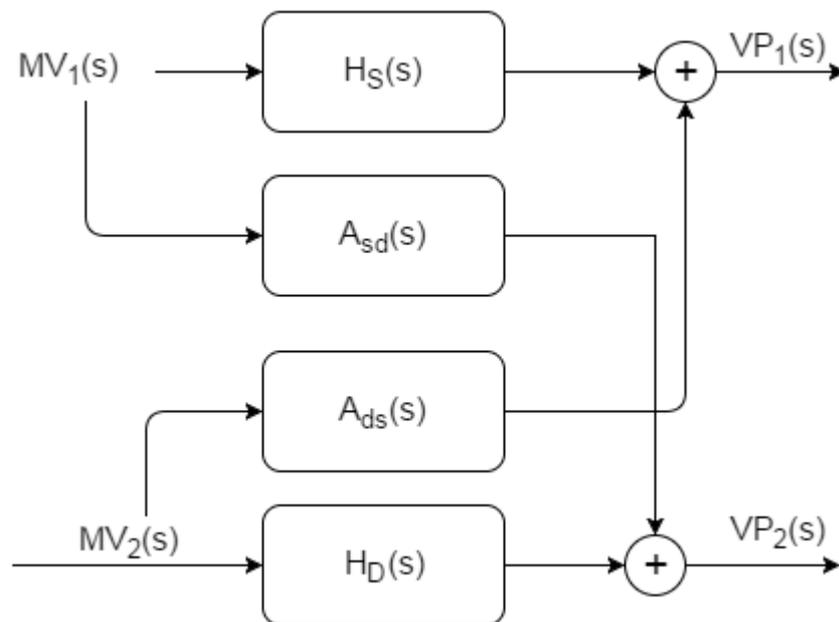
A histerese na válvula pode gerar oscilações na pressão de sucção, pois devido ao ruído de medição o erro nunca será constante, de modo que o sinal de controle sempre passará pela região de histerese toda vez que o sinal de erro for invertido. (HÄGGLUND, 2007).

Os resultados obtidos ao final desses testes auxiliaram o planejamento da estratégia de controle e permitiram um conhecimento mais detalhado das características do processo.

### 4.1.2: Identificação do sistema

O objetivo dessa etapa do projeto dos controles regulatórios é identificar os modelos dinâmicos do sistema. Esses modelos são importantes para o projeto e sintonia dos controles. Então, para melhores resultados de desempenho é necessário uma boa identificação do processo. A figura 27 ilustra o diagrama de blocos do processo.

Figura 27: Diagrama de blocos das relações dinâmicas do processo.



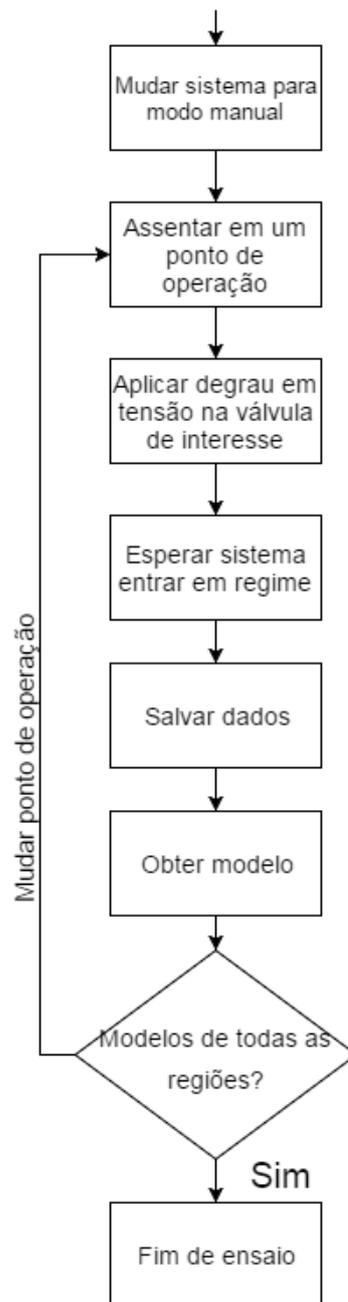
Onde:

- $MV_1(s)$  Tensão aplicada à válvula de sucção
- $MV_2(s)$  Tensão aplicada à válvula de descarga
- $VP_1(s)$  Pressão de sucção
- $VP_2(s)$  Pressão de descarga
- $H_S(s)$  Função de transferência entre  $VP_1$  e  $MV_1$
- $H_D(s)$  Função de transferência entre  $VP_2$  e  $MV_2$
- $A_{sd}(s)$  Função de transferência entre  $VP_2$  e  $MV_1$
- $A_{ds}(s)$  Função de transferência entre  $VP_1$  e  $MV_2$

Nota-se a partir da figura 27 que o processo consiste em um sistema multivariável, dessa forma, serão realizados ensaios a fim de identificar as relações dinâmicas diretas e de acoplamento entre as variáveis manipuladas e de processo.

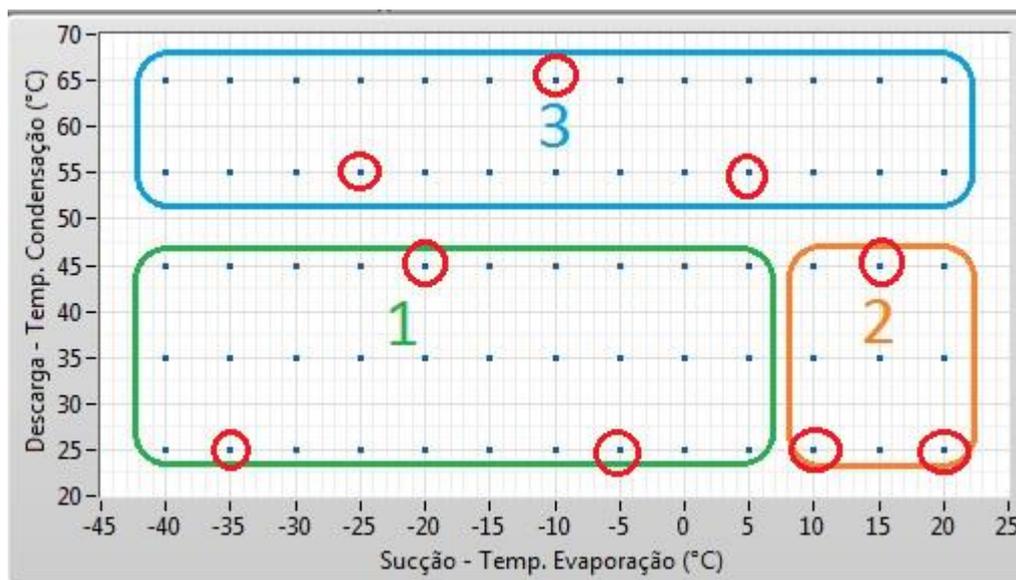
O diagrama de fluxo da figura 28 ilustra o procedimento genérico adotado para a identificação dos modelos que relacionam as pressões com as tensões aplicadas às válvulas. O procedimento foi adotado para a pressão de descarga e de sucção.

Figura 28: Diagrama de fluxo de trabalho para a identificação de sistemas.



O procedimento da figura 28 é de simples execução. No caso desse trabalho foram realizados três ensaios em cada região para as pressões de sucção e de descarga, totalizando 18 ensaios. A figura 29 ilustra os pontos de operação escolhidos e a divisão deles no mapa de referências.

Figura 29: Pontos de operação utilizados para a identificação dos sistemas.

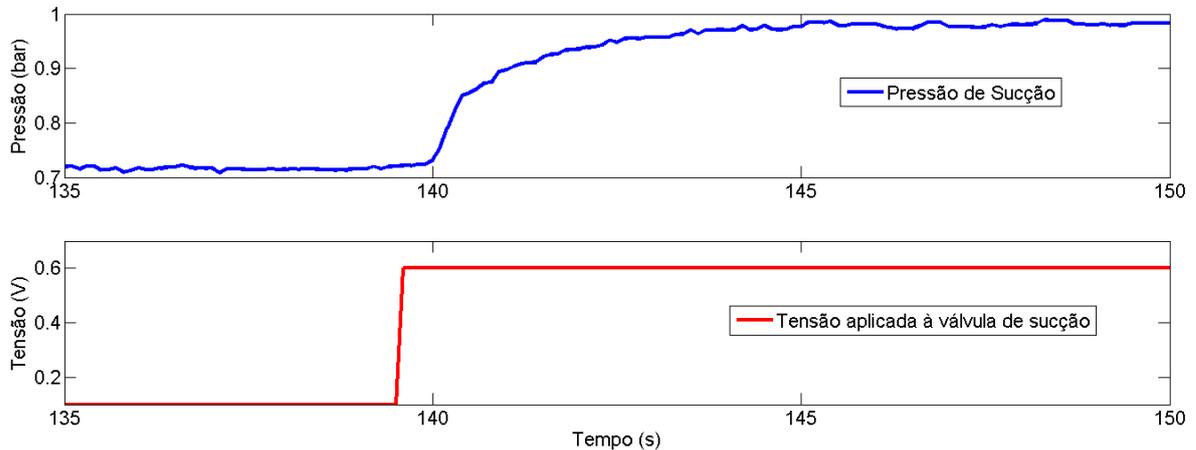


Essa quantidade de ensaios foi adotada para um levantamento mais criterioso do processo, dessa forma compreendendo melhor as dinâmicas e características do sistema nas diferentes condições de operação do compressor. Os conceitos teóricos para a obtenção dos modelos de primeira ordem a partir do ensaio da resposta ao degrau estão demonstrados no capítulo 2.

Basicamente, definem-se aberturas em ambas as válvulas de modo que o sistema atinja o ponto de operação de interesse. No ponto, com as pressões assentadas, aplica-se um pequeno degrau em tensão em uma das válvulas mantendo a outra constante no valor definido para o ponto em questão, por exemplo: Para identificar o modelo da pressão de sucção do ponto de coordenadas (-35; + 25) °C definiu-se a tensão aplicada à válvula de sucção em 0,1 V e a tensão aplicada à válvula de descarga em 5,5 V. Esperou-se ambas as pressões assentarem, então se aplicou um degrau de 5% do intervalo de atuação na válvula de sucção ( $\pm 0,5$  V). Esperou-se novamente o sistema entrar em regime, observando

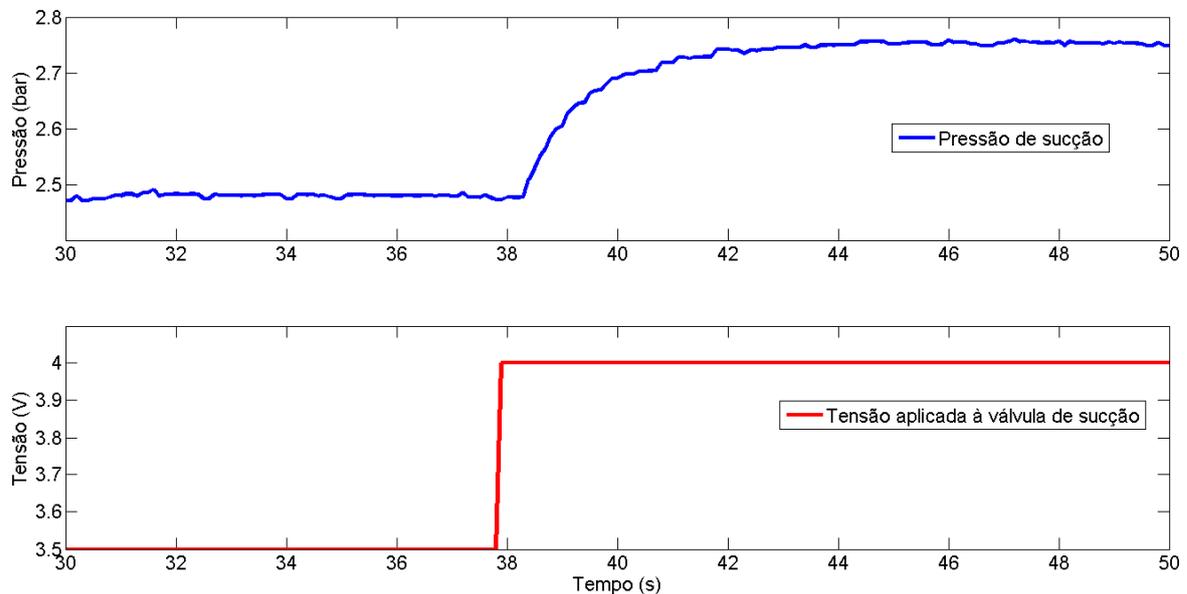
se as variáveis de processo não possuem alterações significativas em seus valores. A figura 30 mostra o resultado desse ensaio.

*Figura 30: Resposta ao degrau no ponto (-35; +25) °C.*



A figura 31 mostra o resultado para o ponto de coordenada (-5; +25) °C contido na região 1 do mapa.

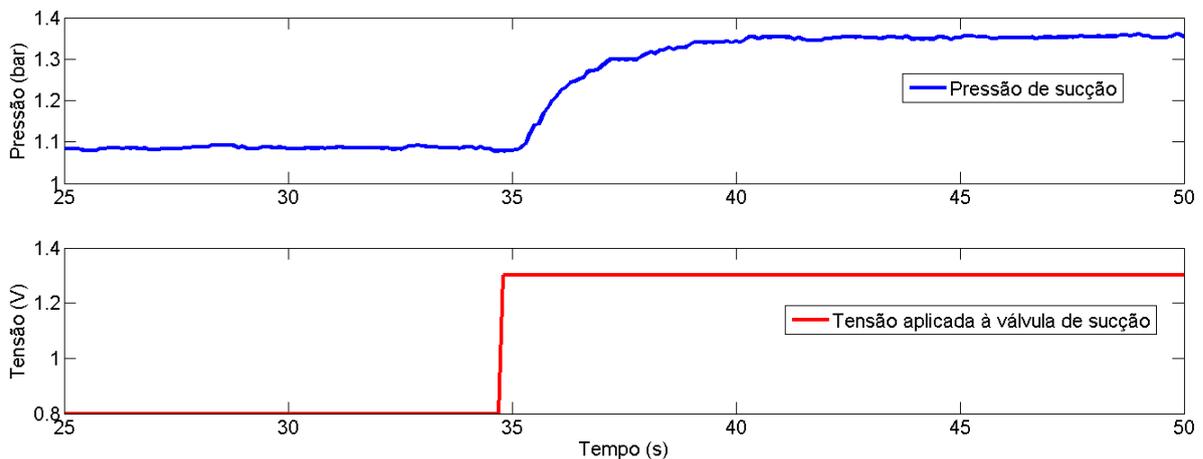
*Figura 31: Resposta ao degrau no ponto (-5; +25) °C.*



A figura 32 mostra a resposta ao degrau para o ponto (-25; +45) °C. Comparando qualitativamente os três ensaios, nota-se a semelhança entre os resultados, tanto em variação de pressão quanto em tempo de resposta. Então, conclui-se que não existem grandes variações para o modelo da pressão de sucção na região 1.

Portanto, pode-se utilizar para o projeto do controle o modelo obtido a partir de somente um dos ensaios ou, como no caso deste trabalho, realizar a identificação para os três casos e utilizar a média entre eles como o modelo nominal.

Figura 32: Resposta ao degrau para o ponto (-25; +45) °C.



Como as características predominantes das repostas são de um sistema de primeira ordem, foi adotada a função de transferência  $H_{S1}(s)$  para representar a relação entre a tensão aplicada à válvula de sucção e a pressão de sucção na região 1 (equação 14). Esse modelo será utilizado para o projeto do controlador.

$$H_{S1}(s) = \frac{0,54}{1,53s + 1} \quad (14)$$

Da mesma forma foram identificados os modelos para a pressão de sucção nas regiões 2 e 3, região de equalização e de alta descarga, respectivamente.

As repostas apresentaram poucas diferenças em relação ao ganho e dinâmica. Utilizando o método de identificação descrito no capítulo 2, foram obtidos os modelos para cada um dos ensaios e ao final foi calculada a média aritmética entre eles. A função de transferência média está representada pela equação (15).

$$H_{S3}(s) = \frac{0,38}{1,75s + 1} \quad (15)$$

Onde  $H_{S3}(s)$  é a função de transferência para a pressão de sucção na região de alta descarga.

Comparando a equação (14) com a equação (15) conclui-se que não há muita diferença entre os modelos para a pressão de sucção das regiões 1 e 3. Isso irá refletir positivamente no desempenho do controle, pois pode-se garantir através do projeto que o controlador seja capaz de atender mais facilmente as especificações desejadas para os dois casos, utilizando os mesmos parâmetros.

Da mesma forma foram realizados três ensaios para a pressão de sucção na região de equalização.

O modelo médio da pressão de sucção para a região de equalização está definido pela equação (16).

$$H_{S3}(s) = \frac{0,28}{1,98s + 1} \quad (16)$$

Onde  $H_{S3}(s)$  é a função de transferência para a pressão de sucção na região de equalização.

Conclui-se que existem variações dos modelos para a pressão de sucção em relação à tensão aplicada à válvula da sucção. A tabela 3 resume os parâmetros obtidos. Portanto, houve uma redução do ganho de aproximadamente 50% da região 1 para a região 2 e um aumento de 29% da constante de tempo.

Essas variações podem influenciar no desempenho dos controles, então o ideal é projetar um controle para cada uma das regiões. Optou-se para fins de projeto, por efetuar uma média dos parâmetros da tabela 3 e realizar um projeto de controlador robusto que leve em consideração essas diferenças de dinâmica.

Tabela 3: Parâmetros identificados para a pressão de sucção.

Regiões de operação	Ganho (bar/V)	Constante de tempo (s)
Região 1	0,54	1,53
Região 2	0,28	1,98
Região 3	0,38	1,75

O modelo final utilizado para projeto do controle da pressão de sucção é o da equação (17).

$$H_s(s) = \frac{0,4}{1,75s + 1} \quad (17)$$

#### 4.1.2.1: Modelo da pressão de descarga

Para a identificação do modelo que relaciona a pressão de descarga com a tensão aplicada à variável manipulada também foi utilizado o procedimento da Figura 28, com a diferença que foram aplicados degraus de 1 V em tensão. Após os ensaios notou-se que as respostas da pressão de descarga nas regiões 1 e 3 apresentam características semelhantes no tempo de resposta, mas verificou-se uma grande variação nos parâmetros na região de equalização (região 2). As respostas mantiveram as características de sistemas de primeira ordem.

Existe uma mudança em relação ao ganho e principalmente em relação às características dinâmicas da resposta ao longo das regiões de operação. Nas regiões 1 e 3 as constantes de tempo são aproximadamente 25 s, enquanto na região 2 são 5 s. A tabela 4 resume os parâmetros identificados nos ensaios de pressão de descarga.

*Tabela 4: Parâmetros identificados para a pressão de descarga.*

<b>Regiões de operação</b>	<b>Ganho (bar/V)</b>	<b>Constante de tempo (s)</b>
<b>Região 1</b>	3,23	24,8
<b>Região 2</b>	0,3	5,0
<b>Região 3</b>	6,27	27,6

Por simplicidade será utilizado o modelo da região 1 para o projeto do controlador de descarga. Uma justificativa para essa escolha é o fato das dinâmicas identificadas das regiões 1 e 3 serem semelhantes. O modelo para a pressão de descarga está definido pela equação (18).

$$H_D(s) = \frac{3,23}{24,8s + 1} \quad (18)$$

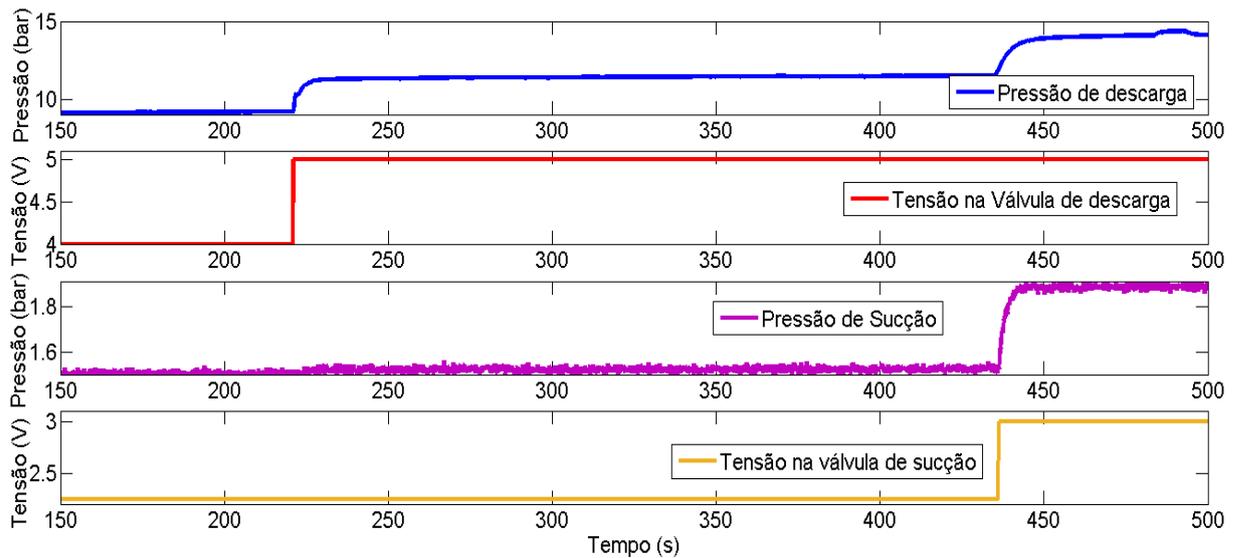
#### **4.1.2.2: Identificação do Acoplamento**

Existe um acoplamento físico entre as variáveis de processo, pois quando se atua na válvula de sucção, além de variar a própria pressão de sucção também ocorre uma variação na pressão de descarga, e vice-versa. Esse tipo de comportamento pode ser visto pelo sistema de controle como perturbações, pois toda vez que um dos controles atuar sobre sua válvula correspondente ocorrerá uma variação na outra variável de processo e o seu sistema de controle independente tentará ou deverá rejeitar esse distúrbio a fim de manter o ponto de operação.

É interessante realizar um levantamento de quão significativo é o acoplamento entre as variáveis de processo, pois isso facilitaria o projeto de desacopladores para atenuar esse efeito cruzado. Essa identificação pode ser feita da mesma forma, com ensaios da resposta ao degrau. A figura 33 mostra o resultado do ensaio.

Segundo Skogestad (2005) nem sempre é possível realizar a identificação dos acoplamentos entre as variáveis de processo, pois as interações podem levar o sistema à instabilidade durante a execução do ensaio.

Figura 33: Ensaio para a identificação dos acoplamentos entre as variáveis de processo.



No ensaio da figura 33 primeiramente o sistema foi levado para região 1 no ponto (-15; +35) °C. Depois, foi aplicado um degrau de 1 V na válvula de descarga e novamente esperou-se o sistema entrar em regime. Houve uma insignificante variação na pressão de sucção, logo o acoplamento Descarga-Sucção é desprezível. Por outro lado, ao aplicar degrau na válvula de sucção observou-se uma considerável variação na pressão de descarga, o que indica um forte acoplamento Sucção-Descarga.

Ao considerar o efeito do acoplamento Descarga-Sucção desprezível, será implementado um filtro desacoplador para atenuar a influência da ligação Sucção-Descarga. Para isso será utilizado o modelo da equação (19), que representa a função de transferência da relação entre a tensão aplicada à válvula de sucção e a pressão de descarga.

$$A(s) = \frac{3,47}{4,1s + 1} \quad (19)$$

### 4.1.3: Projeto dos controladores

Para o projeto dos controladores foi utilizado o método do Lugar das Raízes. A princípio, como uma abordagem inicial, foram projetados controladores do tipo PI, pois na prática a ação derivativa pode ser desprezada em situações onde a dinâmica dominante é de primeira ordem. (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

Neste trabalho, a funcionalidade principal do sistema de controle consiste no seguimento de referências do tipo degrau com erro mínimo, ou dentro do intervalo de tolerância em relação ao ponto de operação. Então, exige-se boa resposta frente às mudanças de referências. Não existem especificações fixas e bem definidas quanto ao tempo de assentamento ou percentual de sobressinal, porém quanto mais rápido for o comportamento de malha fechada menor será o tempo para percorrer todo o mapa de referências.

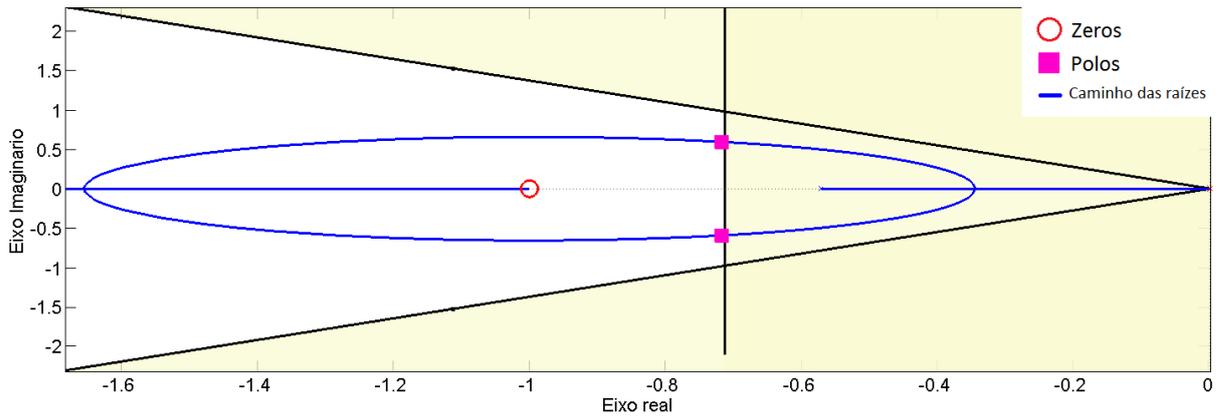
Esta seção apresenta, resumidamente, as especificações de projeto, o diagrama de polos e zeros, a resposta esperada e as repostas obtidas com os sistemas de controle.

#### 4.1.3.1: Controle da pressão de sucção

Para o projeto do controlador da pressão de sucção foi utilizado o modelo da equação (17). As especificações de projeto foram de seguimento de referências do tipo degrau com menor erro possível, o valor máximo de percentual de sobressinal foi definido em 10%. O tempo de 5% de malha fechada foi definido em 4,2 s (20% mais rápido que o tempo de 5% de malha aberta).

Para obter seguimento de referência com erro nulo em regime permanente foi definido um controlador do tipo PI. A figura 34 mostra o diagrama dos polos e zeros do sistema em malha fechada. A posição final dos polos no diagrama ficou  $(-0,72 \pm 0,60j)$  e do zero em -1. Após simular a resposta, o tempo de 5% foi de 4,01 s e o sobressinal foi de 5,65%, portanto dentro do especificado.

Figura 34: Diagrama de polos e zeros de malha fechada. Controle de sucção.



A função de transferência do controlador da pressão de sucção está descrita pela equação (19). O PI está na forma acadêmica (ISA).

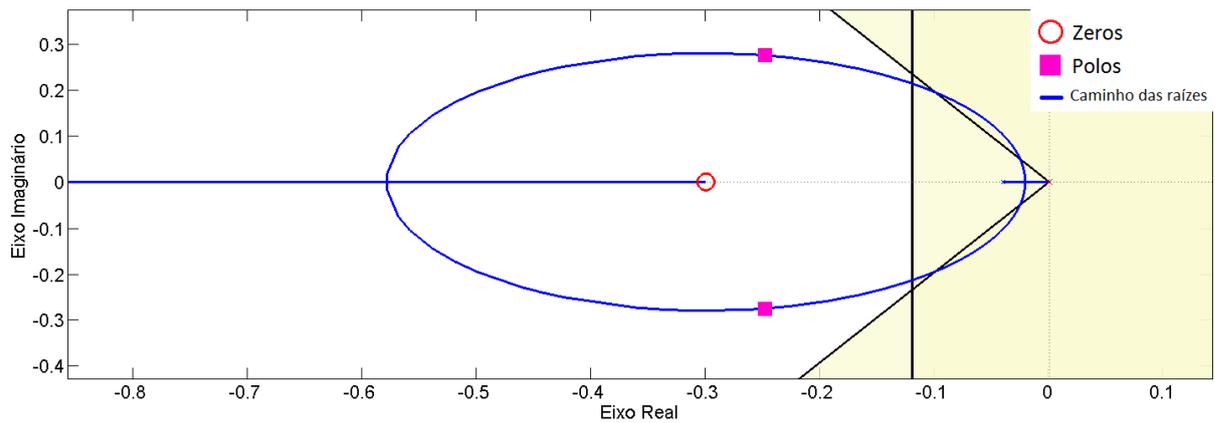
$$C_S(s) = \frac{3,78(s + 1)}{s} \quad (19)$$

Onde  $K_c = 3,78$  (bar/V) e  $T_i = 1$  s.

#### 4.1.3.2: Controlador da Pressão de descarga

Foi utilizado o modelo da equação (18) para o projeto do controlador para a pressão de descarga. As especificações para o sistema de controle foram: percentual de sobressinal menor que 20% e tempo de seguimento um terço de malha aberta, ou seja, 25 s. A figura 35 mostra o diagrama de polos e zeros de malha fechada. O controlador utilizado também é do tipo PI, pelos mesmos motivos que levaram à sua adoção para o controle da pressão de sucção.

Figura 35: Diagrama de polos e zeros de malha fechada. Controle de descarga.



Desejou-se acelerar a resposta da pressão de descarga, pois naturalmente ela é muito lenta e isso pode influenciar no tempo total de ensaio, pois segundo a estratégia definida *a priori*, a descarga deve se manter estável em determinado valor de pressão enquanto o mapa é varrido horizontalmente com a variação da pressão de sucção. Somente após todos os pontos da linha atual terem sido atingidos, a referência de descarga será alterada passando para a próxima linha.

Ao final do projeto os polos do sistema em malha fechada ficaram localizados em  $(-0,25 \pm 0,27j)$  e o zero em  $-0,3$ . Em simulação foi obtido sobressinal de 18,9% e tempo de seguimento de 5% de 11,8 segundos, logo dentro do especificado. A função de transferência do controle está definida pela equação 20.

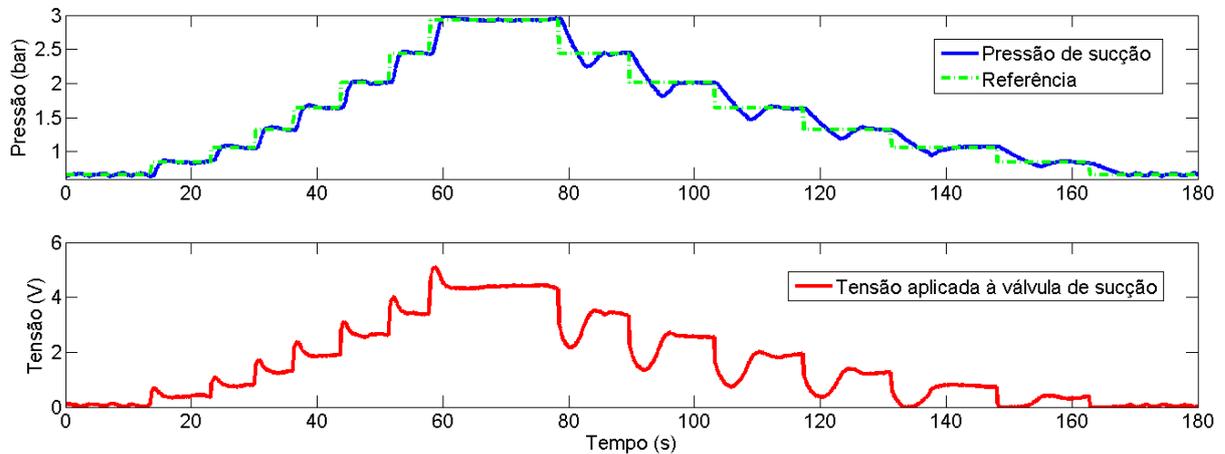
$$C_D(s) = \frac{3,5(3,33s + 1)}{3,33s} \quad (20)$$

Onde  $K_c = 3,5$  (bar/V) e  $T_i = 3,33$  s.

#### 4.1.4: Testes em malha fechada

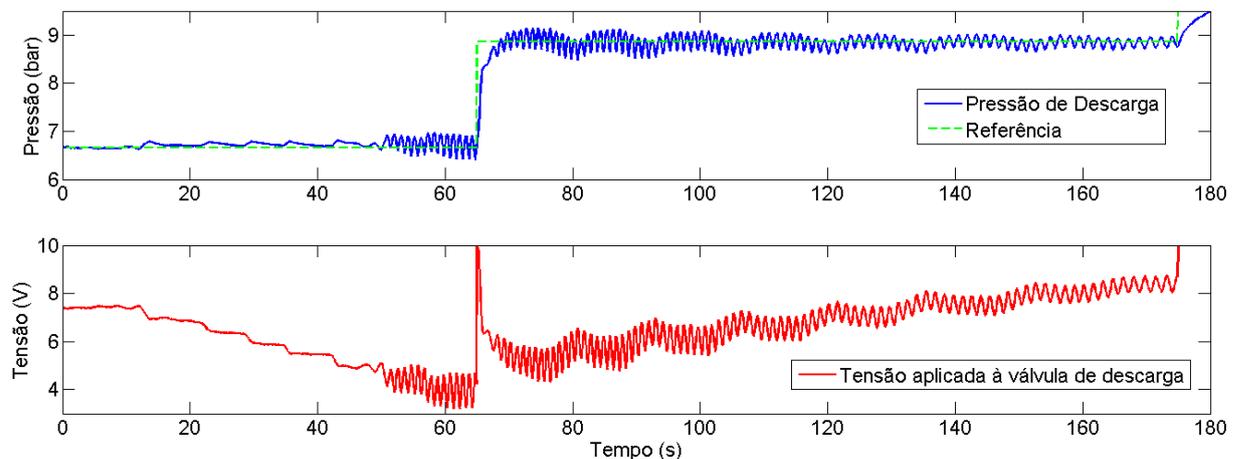
Foram realizados testes em malha fechada com os controladores projetados. Esse primeiro ensaio compreendeu somente as duas primeiras linhas da região 1. As referências foram alteradas manualmente conforme o sistema atingia e permanecia nos pontos de operação. A figura 36 mostra o resultado do ensaio para a pressão de sucção e a figura 37 para a pressão de descarga.

Figura 36: Ensaio em malha fechada do controle de pressão de sucção.



A resposta do sistema de controle da pressão de sucção foi relativamente satisfatória, dado que na maioria dos pontos o sobressinal foi menor que 5% e o tempo de seguimento foi de aproximadamente 4 s.

Figura 37: Ensaio em malha fechada do controle de pressão de descarga.



Através da figura 37 nota-se que o controle de descarga seguiu a referência, porém a resposta apresentou oscilações. Esse comportamento não é desejável, pois irá ocasionar um maior desgaste do atuador e reduzir sua vida útil. Uma possível solução é diminuir o ganho proporcional do controlador, mas isso pode impactar no tempo de resposta frente às perturbações ocasionadas pela influência das variações da pressão de sucção e também para seguimento de referência, afetando o desempenho do sistema como um todo.

Nota-se claramente o acoplamento entre as variáveis de processo, principalmente da resposta da pressão de descarga, efeito aqui chamado de acoplamento Sucção-Descarga. Na figura 37 observam-se pequenas perturbações que coincidem com as variações de referência da pressão de sucção mostradas na figura 36. Esses distúrbios são rejeitados pela ação do controlador.

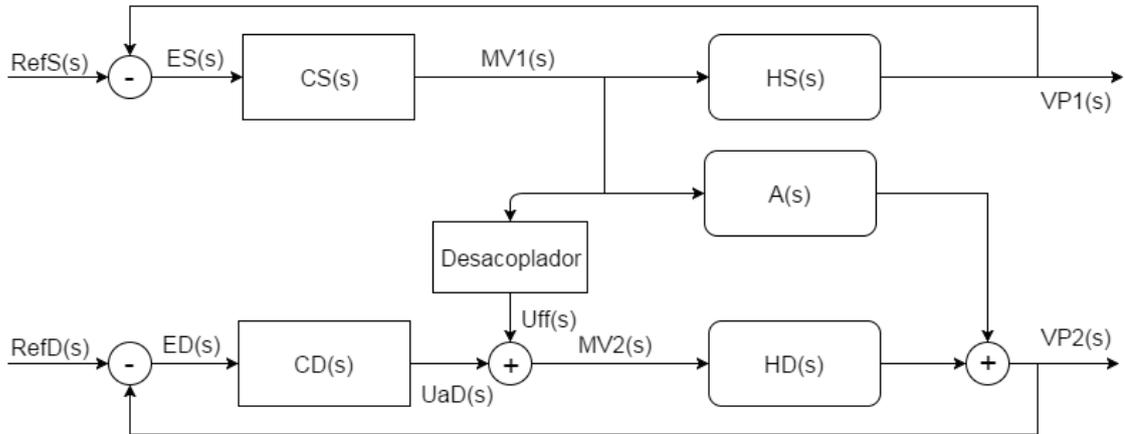
Como é possível acessar os sinais de controle podem-se projetar filtros desacopladores a fim de atenuar a influência das variáveis de processo. A implementação dessa estratégia será discutida na seção 4.1.5.

Vale lembrar que os projetos dos controladores do tipo PI a partir dos modelos médios das dinâmicas das regiões de operação consistem numa abordagem inicial para controle das pressões. Dessa forma, avalia-se uma alternativa de solução mais simples.

#### **4.1.5: Projeto dos desacopladores**

Para o projeto e implementação dos desacopladores será utilizada a técnica da ação *Feed Forward*, ou pré-alimentação, a qual consiste na antecipação do controle na presença de perturbações. Vale lembrar que essa estratégia só funciona quando a perturbação é mensurável. No caso deste projeto, a perturbação é a própria variável manipulada, a qual se tem acesso. Somente o desacoplador Sucção-Descarga será discutido neste documento, pois o efeito da relação cruzada Descarga-Sucção pode ser desconsiderado. A figura 38 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle das pressões.

Figura 38: Diagrama de blocos do sistema de controle com inclusão do desacoplador.



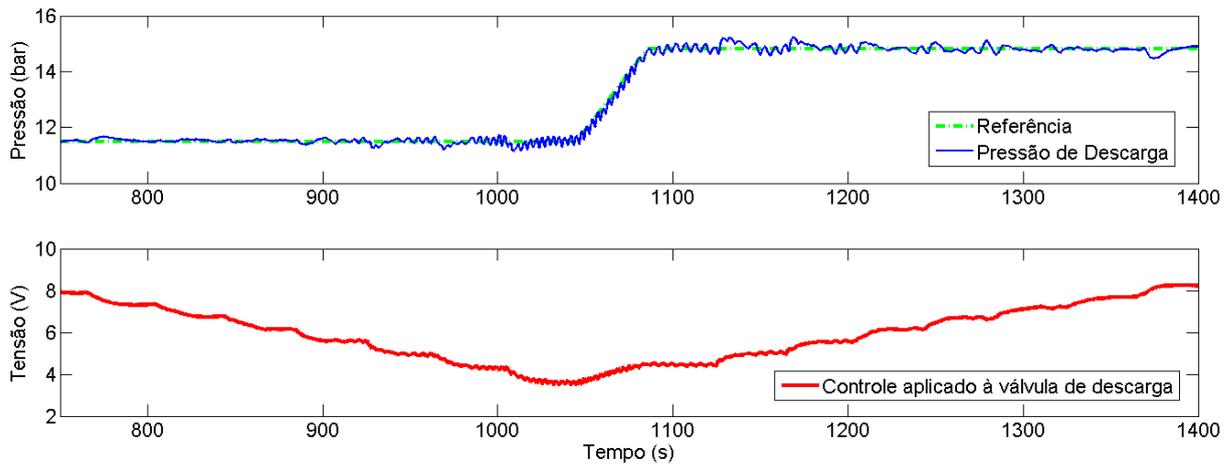
No diagrama da figura 38 pode-se observar a dinâmica cruzada Sucção- Descarga,  $A(s)$ , e também a inclusão do desacoplador. A dedução e fundamentação teórica da estratégia estão demonstradas no capítulo 2, na seção sobre controle *Feed Forward*. O desacoplador foi obtido a partir da equação (21).

$$Dff(s) = - \frac{A(s)}{HD(s)} \quad (21)$$

$$Dff(s) = - \frac{3,47 (24,8s + 1)}{3,22 (4,1s + 1)}$$

A função de transferência  $Dff(s)$  representa o modelo do desacoplador e está dividido em duas partes: a dinâmica e a estática. Por questões de praticidade, muitas vezes, somente um desacoplador estático é implementado, pois assim apenas é realizada a multiplicação do valor medido da perturbação por um ganho constante. No caso, a perturbação mensurável é a  $MV_1(s)$ , a tensão aplicada à válvula de sucção. A figura 39 mostra o resultado da inclusão do desacoplador no sistema. A princípio foi utilizado somente um filtro desacoplador estático ( $Dff = -1$ ).

Figura 39: Ensaio em malha fechada da pressão de descarga com a inclusão do desacoplador.



Comparando o resultado da figura 39 com o resultado da figura 37, pode-se observar que houve uma redução do efeito do acoplamento entre a sucção e a descarga, pois a cada mudança do valor de pressão de sucção, a ação de controle para o atuador da descarga já se antecipava para atenuar o efeito.

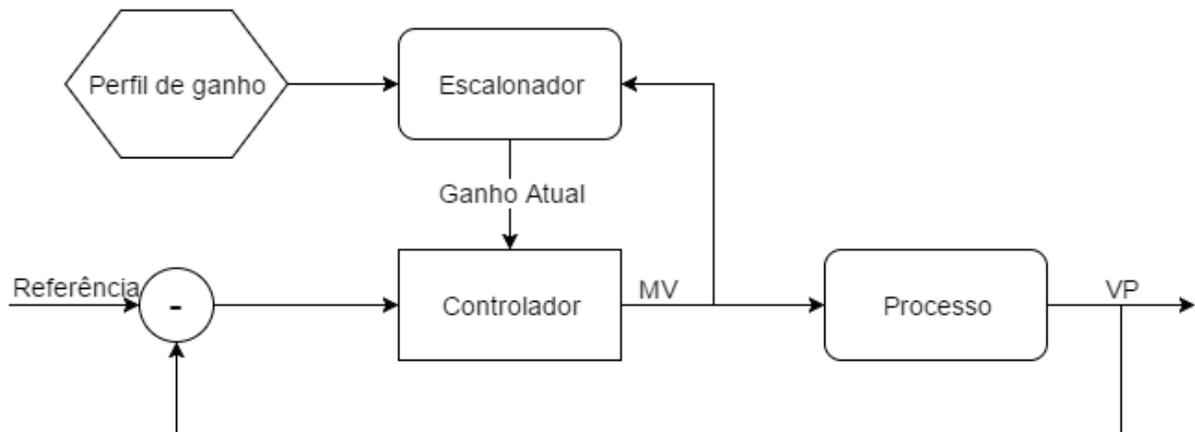
#### 4.1.6: Projeto do escalonador

Para melhorar o desempenho do sistema de controle em relação às não linearidades e variações paramétricas inerentes ao processo, foi utilizada uma solução prática, a estratégia dos ganhos escalonados. A ideia é simples e consiste basicamente na definição de uma tabela que rege os parâmetros atuais dos controladores ao longo do intervalo de operação de uma variável de processo ou da variável manipulada.

Como o controlador é projetado a partir de um modelo identificado num ponto de operação específico é esperado que o comportamento do sistema em malha fechada se modifique ao longo do ensaio pela mudança de dinâmica do processo, bem como pela não linearidade dos atuadores.

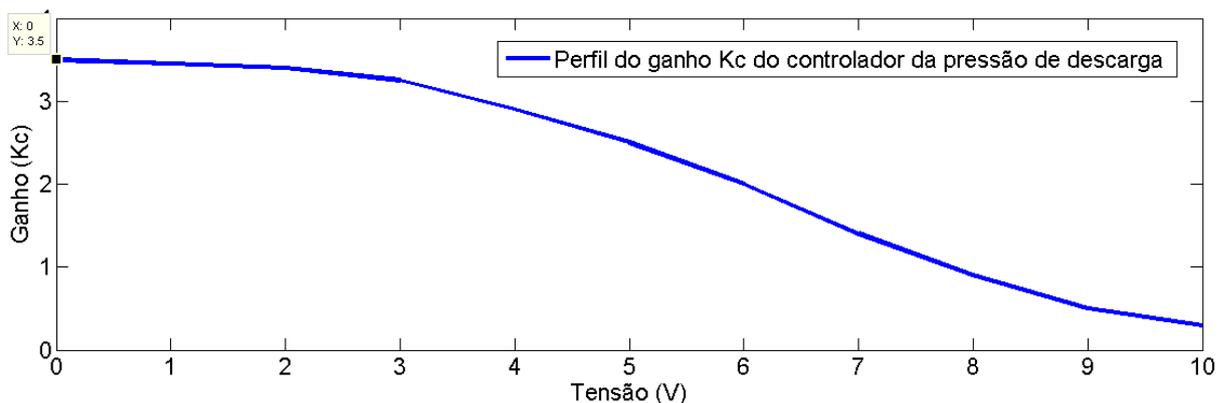
Os perfis de variação de pressão levantados a partir dos testes de linearidade dos atuadores foram utilizados para a definição da forma do escalonador de ganhos. O funcionamento dessa estratégia está ilustrado no diagrama da figura 40.

Figura 40: Funcionamento do escalonador de ganhos.



Paralelamente à malha de controle existe a estrutura do escalonador. O ganho atual é atualizado a partir da variável manipulada e do perfil de ganhos. A figura 41 mostra a relação entre a variação do ganho proporcional do controlador de descarga e a tensão aplicada ao atuador.

Figura 41: Perfil do ganho proporcional ao longo do intervalo de atuação.

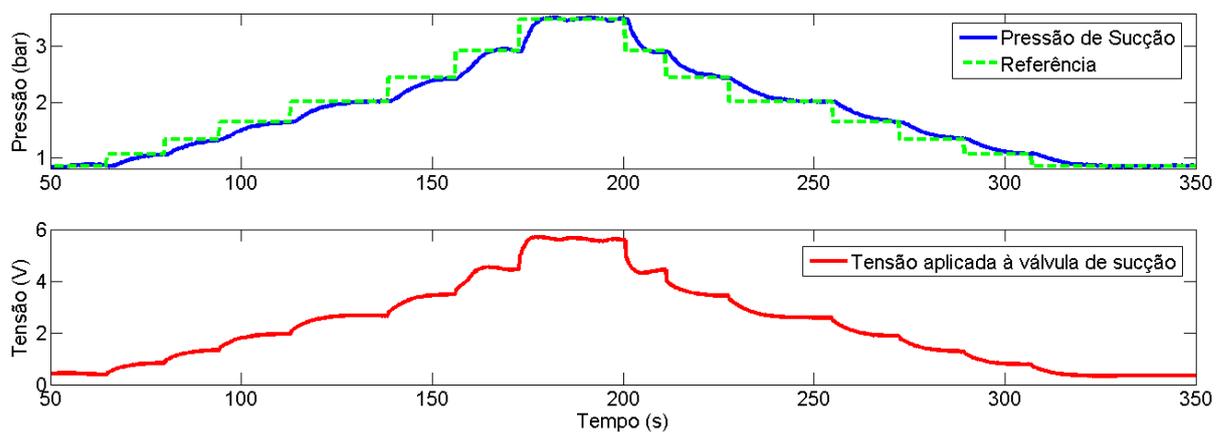


Dessa forma, os parâmetros do controlador se adaptaram às variações características dos atuadores reduzindo as influências da não linearidade, assim

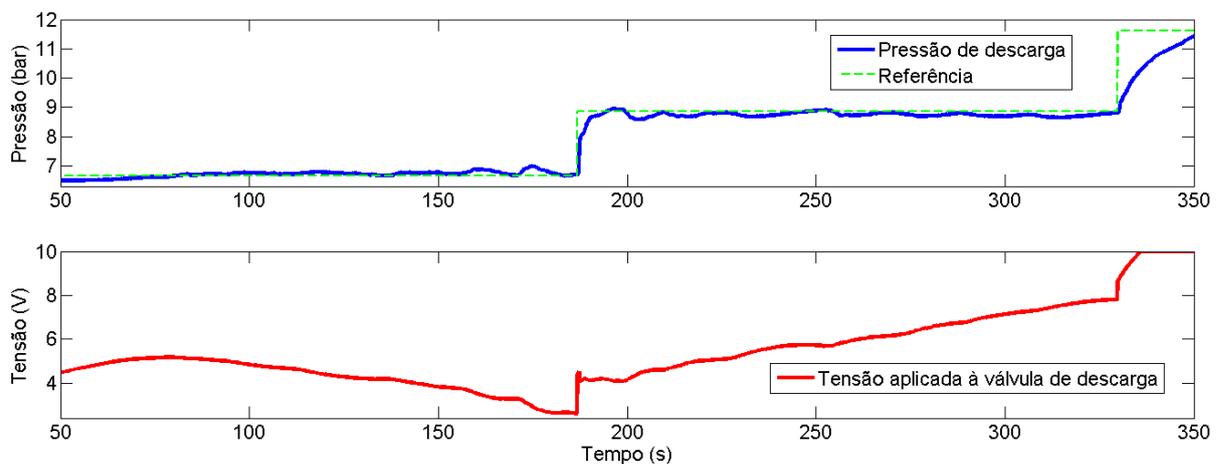
melhorando o desempenho do sistema. A figura 42 mostra o resultado da inclusão do escalonador de ganhos do controlador da pressão de sucção e a figura 43 da pressão de descarga.

Pode-se notar na figura 42 que a ação de controle da pressão de sucção está mais conservativa. Em média, a resposta apresentou um tempo de assentamento de 9 segundos e sobressinal desprezível. Comparando a figura 43 com a Figura 37, nota-se uma melhora considerável. O controle da pressão de descarga não apresentou comportamento oscilatório e isso é um forte indicativo que a estratégia dos ganhos escalonados funcionou devidamente. Também nota-se uma melhor rejeição das perturbações causadas pelas variações da pressão de sucção. Esse último resultado é devido, em parte, à inclusão do filtro desacoplador.

*Figura 42: Controle da pressão de sucção com o escalonador de ganhos.*



*Figura 43: Controle da pressão de descarga com o escalonador de ganhos.*



#### **4.1.7: Controle na região de equalização**

Para atingir os pontos da região de equalização é necessário o uso de uma linha auxiliar para adicionar pressão no ponto de sucção, a chamada linha de equalização. Dessa forma, transfere-se pressão da descarga para a sucção a fim de equalizá-las. Porém, para manter o processo regulado nos pontos dessa região é imprescindível o uso de um sistema de controle que controle a vazão de fluido na linha de equalização.

Então, a solução mais lógica foi instalar uma válvula de atuação proporcional, e implementar um controle automático. Para esse controle foi definida como variável de processo a própria diferença entre as pressões, pois é exatamente ela que se deseja controlar em valores específicos correspondentes aos pontos do mapa. Pode-se chamar essa diferença de “variável auxiliar de processo”. Obviamente a referência para esse controle será a própria diferença das referências dos controles independentes.

Foi realizado o teste de linearidade com o atuador e o mesmo apresentou uma resposta relativamente linear dentro do intervalo de atuação. Foi identificado modelo dinâmico da relação entre a diferença das pressões e a tensão aplicada à válvula de equalização e em seguida foi projetado o controlador.

#### **4.1.8: Comentário sobre o controle regulatório**

Ao final, os resultados dos controladores foram considerados satisfatórios. A eficiência também foi comprovada para as outras regiões do mapa e a estratégia de implementação de controladores do tipo PI monovariáveis e independentes para cada uma das pressões com inclusão de desacopladores mais a estrutura do escalonador de ganhos se mostrou suficiente para a aplicação do projeto. Portanto, foi concluída a base da pirâmide do projeto.

## 4.2: Automação do Ensaio

Estando o controle regulatório funcionando adequadamente, bem sintonizado e ajustado, passou-se para a camada superior do desenvolvimento da solução. Essa camada é responsável pela geração de referências, de modo que o sistema automaticamente seguirá os pontos de operação e a cada vez que uma referência for atingida, um novo par de referências será enviado aos controladores. Paralelamente, nessa etapa também está incluso o sistema de gestão e disparo das ações de intertravamento.

Para o ensaio totalmente automático, primeiro foi estudada e definida qual a melhor trajetória de ensaio no mapa. Depois, foi adaptado um sistema de mapeamento do ponto de operação do processo. Esse pode ser visto como a implementação de um sistema de coordenadas utilizado para definir a localização do processo no mapa.

Para a geração de referências foi necessário o desenvolvimento de um sistema com a capacidade de absorver a própria dinâmica do processo, ou seja, trabalha de acordo com a velocidade e conforme o processo for atingindo os pontos de operação, portanto as referências não podem simplesmente serem geradas e enviadas aos controladores, deve-se garantir que o ponto de operação foi atingido e que o próximo par de referências a ser enviado é realmente o seguinte.

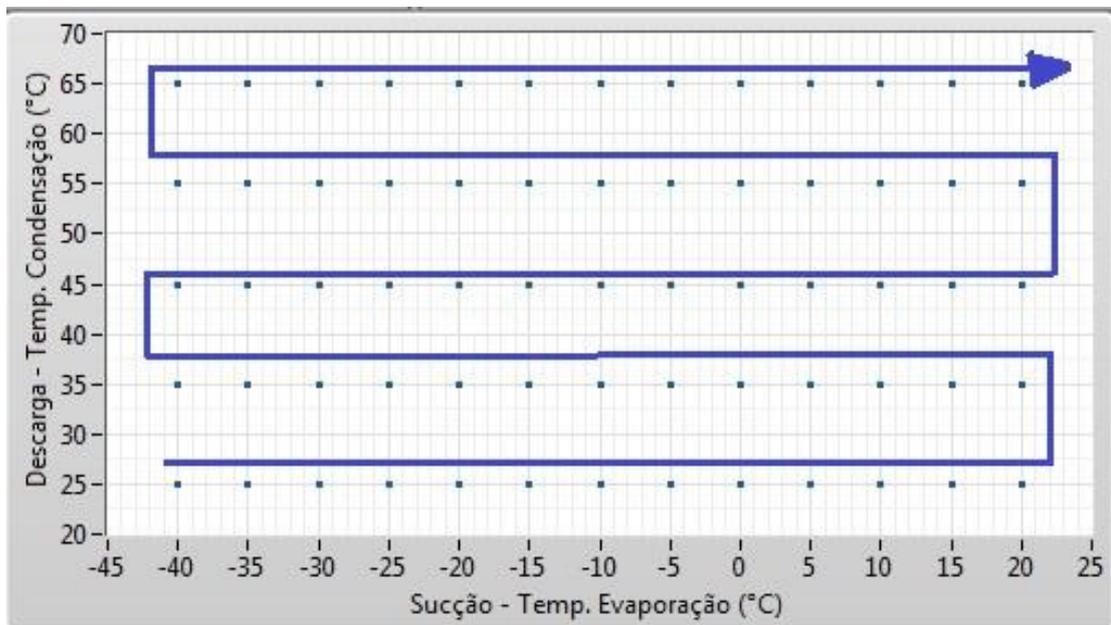
Primeiramente, esta seção abordará a escolha da trajetória de ensaio que o sistema percorrerá no mapa de referências. Depois, será demonstrado a implementação e o funcionamento do sistema de mapeamento e localização. Em seguida, será explicado a construção do sistema de geração de referências automáticas. Por último, será discutido sobre o sistema de intertravamento.

## 4.2.1: Definição da trajetória de ensaio e localização no mapa

### 4.2.1.1: Trajetória de ensaio

A sequência de envio das referências é definida pela trajetória de ensaio, ou seja, qual caminho através do mapa o ensaio automático irá percorrer. A figura 44 mostra o mapa de referências com o caminho escolhido *a priori*.

Figura 44: Mapa de referências com a ilustração da trajetória de ensaio escolhida.



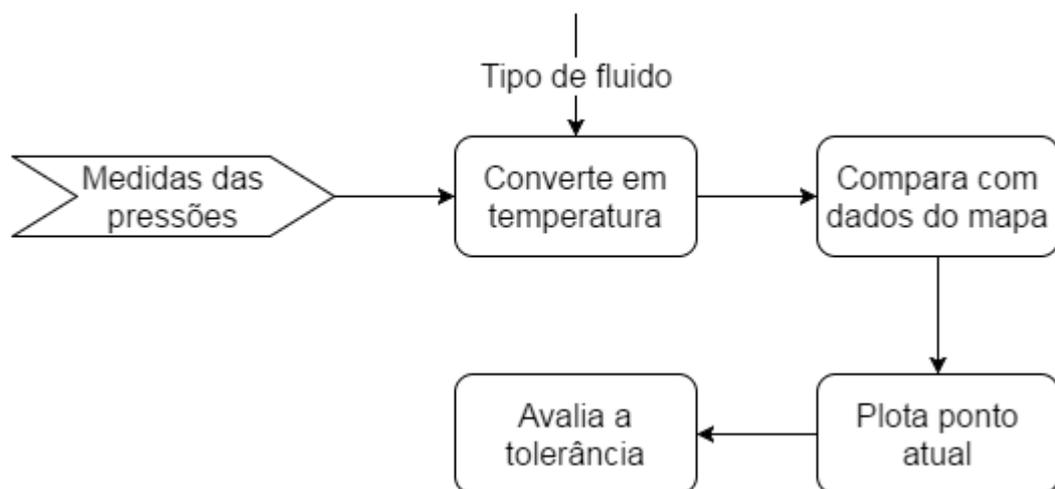
A trajetória foi escolhida por uma série de fatores, mas principalmente por causa do aquecimento do circuito pelo funcionamento natural do compressor, o que implica no aumento das pressões, mais significativamente na pressão de descarga, dessa forma dificultando o retorno para os valores de temperatura de condensação abaixo de 30 °C. Então, a solução é percorrer primeiramente os pontos das linhas de 25 °C e 35 °C e aproveitar o próprio aquecimento natural para atingir os pontos de alta descarga.

#### 4.2.1.2: Sistema de mapeamento e localização

Cada ponto no mapa é definido por uma temperatura de evaporação, que está relacionada à pressão de sucção, e por uma temperatura de condensação, que está relacionada com a pressão de descarga. A conversão de pressão para temperatura está discutida no capítulo 2, mas basicamente depende do tipo de fluido refrigerante. Para o ensaio são no total 65 pontos de operação definidos por 13 condições de pressão de sucção e 5 de pressão de descarga. Dessa forma, as referências são geradas em pares e funcionam como coordenadas.

Os limites e valores de temperatura dispostos no mapa-gráfico são definidos a partir dos princípios dos sistemas de refrigeração com compressores e são bem conhecidos. Para plotar o ponto atual de operação do processo no mapa foi adaptado um sistema que realiza a relação entre as variáveis de processo e as informações para a construção do mapa. A figura 45 ilustra os passos desse sistema.

*Figura 45: Fluxo de trabalho do sistema de mapeamento da posição de operação atual do compressor.*



As medidas das pressões são convertidas em temperatura e são comparadas com os próprios valores de temperaturas de condensação e evaporação usados para a construção do mapa de referências. Através dessa relação sabe-se qual é o

ponto do mapa mais próximo da condição atual de operação. Feito isso, o ponto do mapa nas proximidades da condição é atualizado no gráfico, então, é realizada a avaliação de tolerância.

A tolerância consiste numa região em torno de cada condição de operação de referência. Ela serve para identificar se o processo atingiu o ponto do mapa. Numericamente ela é definida como  $\pm 1$  °C para ambas as temperaturas.

As informações extraídas desse sistema são importantes para identificar qual é o estado atual de operação do compressor e quando o intervalo de tolerância é atingido. Sintetizam-se, dessa forma, as informações necessárias para estabelecer a conexão entre a representação gráfica do sistema e a real condição de operação do compressor.

#### 4.2.1.3: Matriz de mapeamento

Para a estruturação da localização do sistema de referências no mapa foram definidos índices para cada um dos pontos dos eixos coordenados. Sendo D = [0 ... 4] o índice para a descarga e S = [0 ... 12] para a sucção. Cruzando esses índices monta-se a seguinte matriz do quadro 3.

*Quadro 3: Matriz de Mapeamento.*

(0, 4)	(1, 4)	...	(12, 4)
...	...	...	...
(0, 1)	(1, 1)	...	(12, 1)
(0, 0)	(1, 0)	...	(12, 0)

A essa matriz daremos o nome de “matriz de mapeamento” e para cada célula do quadro 3 está associado um ponto de operação. Por exemplo: o ponto de coordenadas (0, 0) da matriz de mapeamento corresponde ao ponto (-40; +25) °C do

mapa de referências. Dessa forma, o índice S representa o eixo das abscissas e o D representa o eixo das ordenadas.

De acordo com a trajetória definida na Figura 44 foi desenvolvida uma forma de varrer os índices conforme os pontos são atingidos ao longo da execução do ensaio.

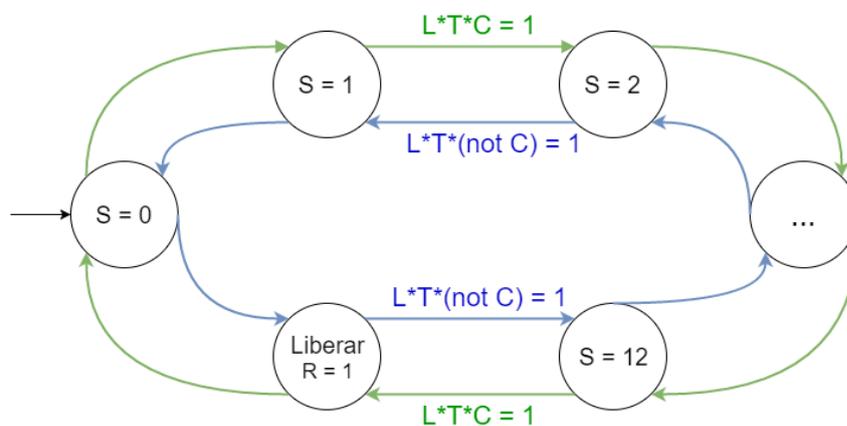
## 4.2.2: Sistema de geração de referências automáticas

### 4.2.2.1: Máquinas de Estados Finitos

A solução encontrada para a modificação dos índices S e D foi a implementação de máquinas de estados finitos (FSM). Essas FSM são independentes uma da outra, porém há troca de informações entre elas. As figuras 46 e 47 ilustram os diagramas de estados. As mudanças dos estados dependem de várias condições, mas principalmente das informações fornecidas pelo sistema de mapeamento e da localização do ponto de operação atual.

Na FSM da figura 46, cada estado define o índice S, iniciando em  $S = 0$ .  $L = 1$  indica que o sistema está dentro do intervalo de tolerância em torno do ponto de operação.  $T = 1$  significa que o sistema permaneceu dentro do intervalo por um tempo determinado.  $C = 1$  representa que a alteração do índice deve ser crescente e  $(\text{not } C) = 1$  decrescente.  $R = 1$  significa que a máquina de estado já percorreu todos os índices de S pelo sentido crescente ou pelo sentido decrescente. Nos demais estados  $R = 0$ .

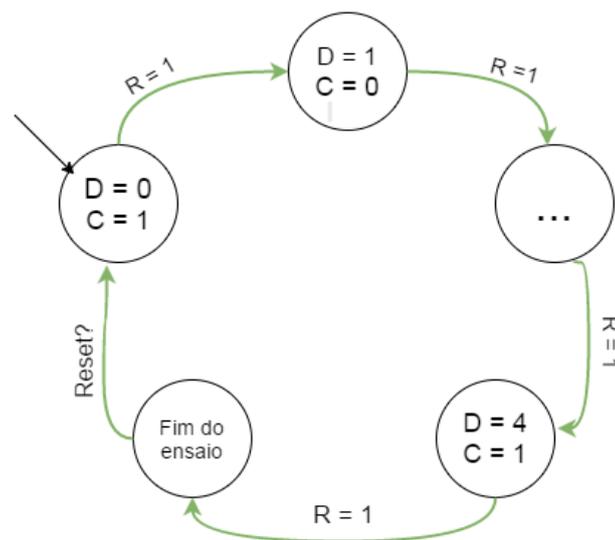
Figura 46: Diagrama de estados da FSM do Índice S.



As condições para a mudança de estado são: ponto de operação atual dentro do intervalo de tolerância e tempo de permanência no intervalo por no mínimo dois segundos. T é definido por um temporizador que é disparado cada vez que a tolerância é atingida e é zerado fora do intervalo. A variável C é definida de acordo com a linha do mapa, portanto, depende do índice D.

Na FSM da figura 47, os estados representam o índice D, iniciando em D = 0 e também definem o sentido de evolução do índice S, crescente ou decrescente, através da variável booleana C. O índice D só é alterado quando R = 1, ou seja, somente quando todos os treze valores de S foram varridos, significando que a próxima linha pode ser varrida.

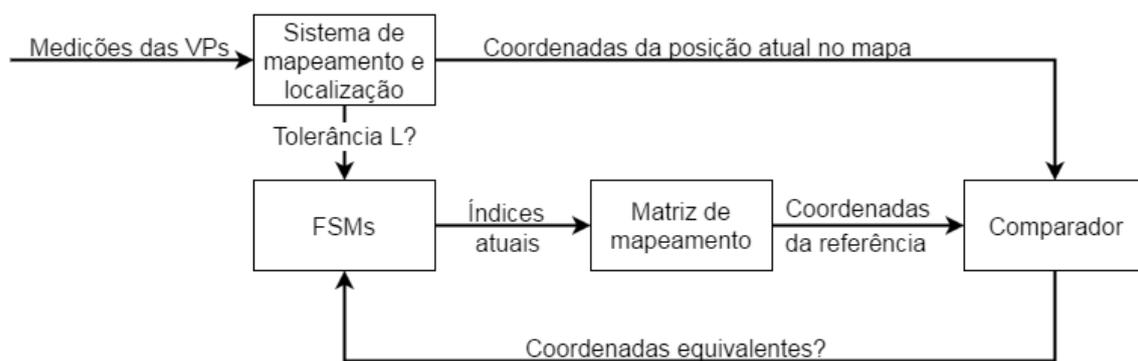
Figura 47: Diagrama de estados da FSM do índice D.



É interessante salientar que a transição dos estados que definem o índice S só ocorrerá quando a posição do sistema de referências for equivalente à posição do ponto atual de operação do compressor plotado no gráfico. Essa condição é necessária para que a FSM não mude de estados de forma equivocada, pois a variável L está associada apenas ao intervalo de tolerância e não possui informação sobre qual é o ponto de referência, então, dessa forma, se a condição de operação atual do compressor estiver dentro da margem de tolerância de qualquer ponto do mapa, a FMS do índice S estará apta a trocar de estado, o qual pode não corresponder com o próximo definido pela trajetória.

Cruzando os índices S e D obtêm-se os elementos da matriz de mapeamento, os quais representam as posições do sistema de referências. E comparando o elemento atual dessa matriz com a informação obtida no sistema de mapeamento sobre qual é o ponto mais próximo da condição de operação atual, pode-se identificar a posição definitiva do sistema, ou seja, confirmar se as coordenadas do ponto de operação são equivalentes às coordenadas do ponto de referência. Dessa forma, permite-se o avanço do ensaio, liberando a transição do índice S, e garante-se que todos os pontos são atingidos e que a próxima referência a ser enviada é realmente a seguinte da trajetória.

*Figura 48: Diagrama da comparação da localização do sistema de mapeamento com o sistema de geração de referências.*



Resumidamente no diagrama da figura 48 observa-se que o sistema de mapeamento, através da leitura das medições das pressões, fornece as coordenadas do ponto de operação atual do compressor. Os estados das FSM geram os índices S e D e estão associados às coordenadas do ponto de referência atual. Tanto a coordenada gerada pelas FSM quanto a coordenada atual do processo estão em temperatura e são comparadas. Se as coordenadas forem iguais, a posição dos sistemas de geração de referência e de localização será a mesma. Dessa forma, a FSM torna-se apta para mudar de estado e a transição irá depender dos valores das variáveis booleanas L, T, C.

As máquinas de estados foram implementadas e testadas em programa separado. Após o resultado ser o desejado, o programa foi integrado no software da bancada. Como as FSM funcionam através do compartilhamento de variáveis, há

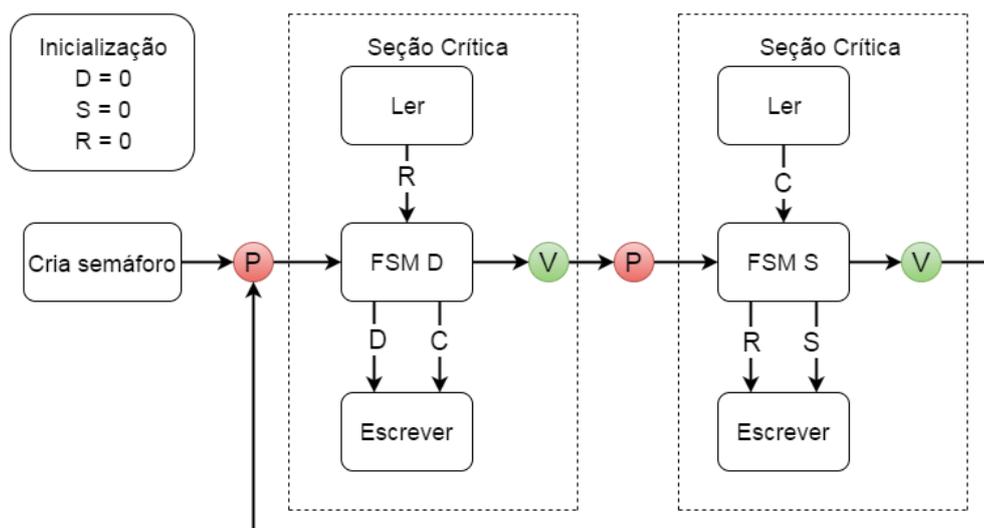
necessidade de proteção dessas informações. Para isso, foi utilizada a técnica de exclusão mútua através de semáforos, impossibilitando que uma FSM escreva enquanto a outra estiver lendo a mesma variável e vice-versa.

#### 4.2.2.2: Proteção das variáveis compartilhadas

Para o correto funcionamento das FSMs foi necessário garantir sincronismo entre as operações de leitura e escrita das variáveis. Para isso, um fluxo de trabalho foi implementado e a imposição da sequência de execução das ações dos processos foi realizada através de semáforos. Os conceitos envolvidos nessa técnica estão detalhados no capítulo 2.

Resumidamente, as FSMs são tratadas como processos concorrentes. Foi definido um semáforo unitário, de modo que somente um processo pode executar a seção crítica por vez, liberando o recurso após a execução do código. A figura 49 ilustra a execução das tarefas com a inclusão do semáforo, onde P é a operação testar e V é a operação incrementar sobre o semáforo.

Figura 49: Diagrama do esquema de implementação dos semáforos aplicados às FSMs.



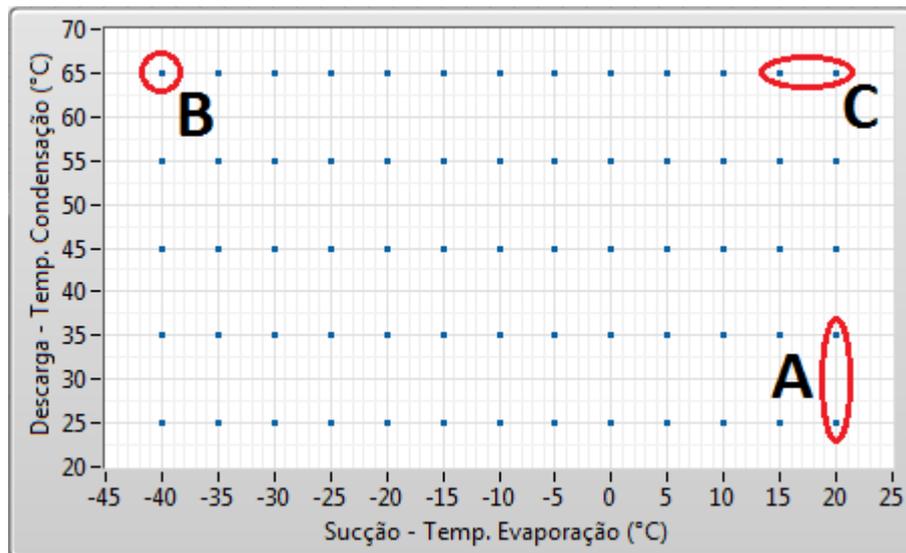
No diagrama da Figura 49, primeiro são inicializadas as variáveis, em seguida é criado o semáforo para as duas tarefas. De forma sincronizada a tarefa da FSM D adquire o semáforo, escreve nas variáveis D e C, no caso do primeiro estado  $D = 0$  e  $C = 1$ , lê a variável R, e libera o semáforo. Em seguida o processo da FSM S adquire o recurso, lê a variável C, começa a alterar os estados, se  $C = 1$  em sentido crescente e  $C = 0$  em sentido decrescente, atualizando os valores de S conforme o sistema vai atingindo os pontos de operação. Escreve  $R = 1$  ao final dos treze pontos de referência de sucção e libera o semáforo. Dessa forma, as tarefas executam seus códigos de forma alternada durante todo o ensaio.

### **4.2.3: Intertravamento**

Somente com os controles regulatórios e com o sistema de geração de referências não foi possível realizar o ensaio completamente autônomo, pois devido a algumas limitações físicas do processo, alguns pontos mais críticos de operação não foram atingidos. Esse problema não permite a evolução das FSM, portanto estagnando o ensaio. Foi implementado em software um comando para avanço dos estados referentes a essa situação, porém em suma é desejável que todos os pontos do mapa sejam alcançados.

A Figura 50 ilustra os principais pontos críticos de operação. Para atingir esses pontos foi necessário o uso de artifícios que tornaram mais favoráveis as condições de alcance. Os artifícios são recursos físicos instalados na própria bancada e são acionados através das ações de intertravamento disparadas a partir da região do mapa, da localização do processo ou das condições de operação atuais. Essas ações incluem o acionamento de válvulas solenoides, dos resistores térmicos e da alteração de modo de operação dos controles, manual ou automático.

Figura 50: Identificação dos pontos críticos.

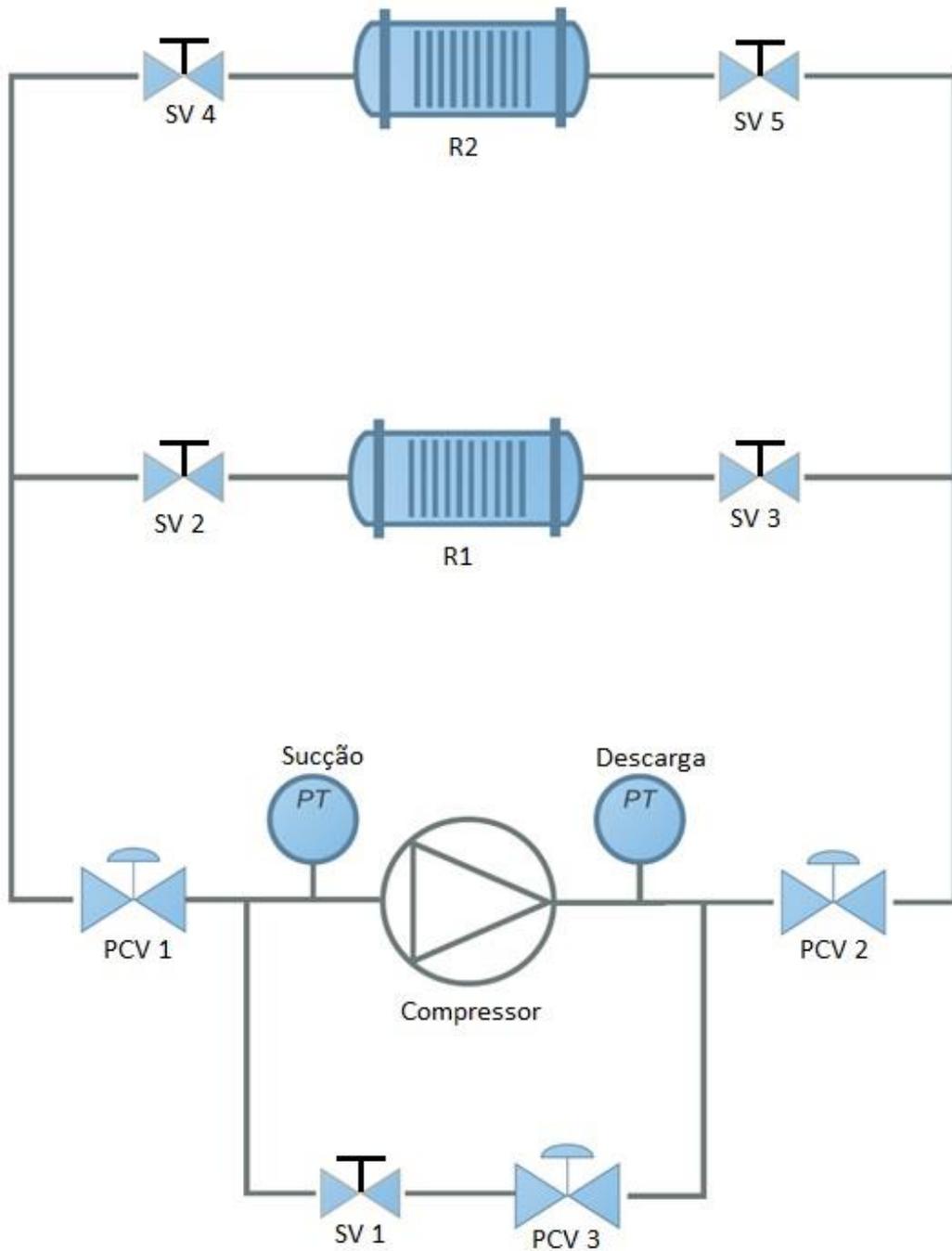


Na figura 50, os pontos em (A) são considerados críticos pela limitação do circuito em elevar a pressão de sucção. A solução encontrada para esse problema foi fornecer pressão da descarga para a tomada de sucção através da linha de equalização e da liberação de carga do reservatório R1 da Figura 51.

O ponto (B) é difícil de ser atingido pelo compressor. Esse ponto consiste na condição mais complexa de operação, pois se trata de um ponto de alta pressão de descarga e de baixa pressão de sucção, dessa forma gerando oscilações na resposta e dificultando a regulação do processo nesse ponto. Ainda estudam-se os reais efeitos e causas dessa condição e uma forma eficaz para contornar o problema, porém foi encontrada uma solução experimental através do isolamento do reservatório pulmão R2 (figura 51) por certo período de tempo, fechando e abrindo a solenoide SV 4.

Para alcançar os pontos contidos em (C) foi necessário o acionamento dos resistores térmicos, dessa forma aquecendo o fluido e elevando a pressão interna, permitindo a liberação de carga do reservatório R1, assim elevando a pressão de sucção. A nomenclatura dos elementos da bancada está ilustrada na figura 51.

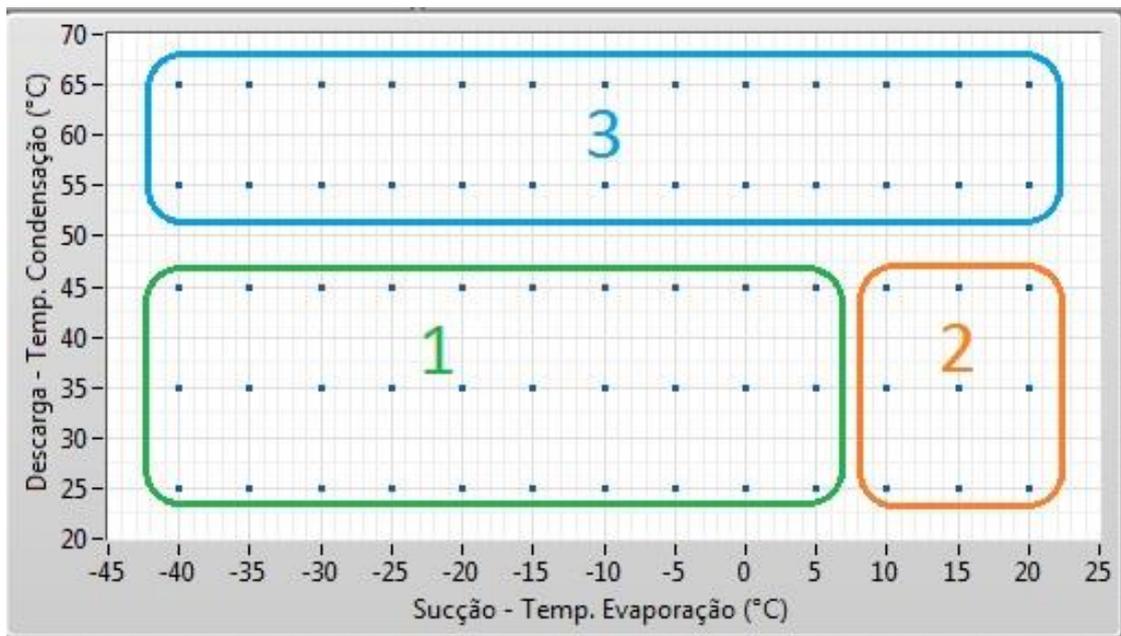
Figura 51: Diagrama de processo e instrumentação ilustrativo.



### 4.2.3.1: Regiões de operação

Para projeto do sistema de intertravamento foi realizada a divisão do mapa por regiões agrupando os pontos em condições semelhantes de operação, representados pelos números de 1 a 3. A figura 52 ilustra essa divisão.

Figura 52: Divisão do mapa em regiões de operação.



As regiões definidas e enumeradas na figura 52 são as seguintes:

1) região normal de operação: essa região é facilmente atingida apenas com o controle regulatório das pressões de sucção e descarga.

2) região de equalização: essa região necessita de tratamento especial; é necessária a utilização de recursos para a elevação da pressão de sucção e a diminuição da diferença entre as duas variáveis de processo.

3) região de alta descarga: nessa região é necessária alta temperatura de condensação, ou seja, pressões maiores na descarga; a pressão nessa condição varia no intervalo de (14,9 a 19) bar.

A divisão por regiões tornou a estratégia de disparo das ações mais clara e objetiva, facilitando a sua implementação e associação com o sistema de localização e mapeamento.

#### 4.2.3.2: Ações de comando

Uma vez ativado o início do ensaio por parte do usuário, o sistema de intertravamento irá começar sua operação. Já na região 1 os controles regulatórios são alterados para modo automático e permanecerão assim nas três regiões do mapa. Depois, seguindo para a região 2, primeiramente o controle de equalização será ativado, através da mudança para o modo automático, em seguida abrindo a válvula solenoide SV1, mantendo-se nesse estado durante toda a região 2, e desativando essas ações ao sair da região, conforme trajetória definida na Figura 44. Na região 3 a principal ação é a ativação dos resistores térmicos dos reservatórios R1 e R2. A tabela 5 resume as ações por regiões.

*Tabela 5: Ação de comando do intertravamento.*

<b>Ações</b>	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>	<b>Região 3</b>
<b>Controles</b>	LIGADO	LIGADO	LIGADO
<b>Resistores</b>	DESLIGADO	DESLIGADO	LIGADO
<b>Controle Eq. &amp; SV1</b>	DESLIGADO	LIGADO	DESLIGADO
<b>Manobra Ponto B</b>	DESLIGADO	LIGADO	DESLIGADO
<b>Manobra Auxiliar</b>	DESLIGADO	DESLIGADO	LIGADO

A ação chamada “Manobra Ponto B” é referente à estratégia utilizada no ponto crítico homônimo. Ela consiste numa rotina que combina um temporizador e o acionamento da SV 4. As condições de disparo são: sistema de referências deve estar na Região 3; a posição indicada pelo elemento da matriz deve ser a do ponto B; enquanto a condição de operação não é atingida, fecha-se a SV 4, esperam-se 5 segundos, abre SV 4, esperam-se outros 5 segundos, e esse procedimento se

repete até que o ponto seja alcançado. Caso a estratégia falhe, o operador pode comandar o sistema para a próxima referência.

A ação chamada “Manobra Auxiliar” é utilizada para os pontos em (A) e (C). Durante o ensaio o processo pode ter dificuldades em elevar a pressão de sucção para os valores mais altos. Isso se deve à falta capacidade do compressor ou até mesmo às limitações físicas da bancada, então uma alternativa é aumentar a quantidade de fluido no reservatório R1 e acionar o resistor térmico para aumentar a temperatura, dessa forma aumentando pressão interna do vaso para liberar essa diferença de pressão diretamente no ponto de sucção do circuito, possibilitando alcançar os pontos mais a direita do mapa.

Para isso, abre-se a válvula SV 3, fecha-se a SV 5, mantém-se fechada a SV 2 e aberta a SV 4, assim o fluido irá acumular no reservatório R1, quando a pressão interna alcançar um valor específico isola-se novamente o reservatório R1, fechando a SV 3 e abrindo a SV 5. Aciona-se o resistor acoplado ao reservatório R1 para iniciar o aquecimento. O resistor será desativado quando a pressão interna do reservatório atingir certo valor. Em seguida, pode-se liberar a carga do reservatório R1 para o ponto de sucção conforme necessário.

A implementação do sistema de intertravamento foi feita através de funções condicionais, ou seja, são executadas após as condições necessárias serem satisfeitas. Os disparos das ações dependem da posição atual da matriz de mapeamento e dos índices S e D.

### **4.3: Comentários finais**

Com o funcionamento conjunto dos sistemas de geração de referências, controle regulatório e intertravamento o ensaio pôde ser realizado de forma totalmente automática. A identificação minuciosa do processo permitiu um ajuste fino da técnica do escalonamento de ganhos e possibilitou o controle regulatório em todas as regiões de operação. Além disso, a estratégia de geração das referências por FSMs se mostrou robusta e satisfatória para a aplicação.

## Capítulo 5: Testes e resultados práticos

Para validação do sistema desenvolvido foram realizados testes práticos em compressores de diferentes capacidades de refrigeração, que implicam em diferentes vazões sendo aplicadas ao sistema. Foram escolhidos compressores de baixa capacidade, capacidade intermediária e capacidade alta, de forma a ter uma maior representatividade da família de compressores produzidos pela Embraco. Apesar de os modelos de compressores terem sido divididos em maior, intermediária e menor capacidade de refrigeração, todo o projeto e implementação do sistema foi realizado com o modelo de capacidade intermediária instalado na bancada.

Para avaliação foram observados os seguintes pontos: capacidade de seguimento de referência, estabilidade, comportamento dinâmico da resposta em malha fechada, presença de oscilações nos sinais de controle e tempo total de ensaio.

Com o compressor intermediário todo o ensaio foi realizado em aproximadamente 25 minutos e o sistema não apresentou oscilações. Os controladores projetados e a configuração do escalonador estabilizaram o processo em todas as regiões de operação.

Para o compressor de menor capacidade não foi necessário realizar mudanças nos parâmetros dos controladores, porém o sistema apresentou uma maior dificuldade em atingir os pontos da região de alta descarga, ocasionando num maior tempo de execução de ensaio, em torno de 30 minutos. O sistema manteve-se estável em todos os pontos.

Já para o compressor de maior capacidade de refrigeração, os pontos da região de equalização foram os mais críticos. O sistema apresentou oscilações nos atuadores e, dessa forma, foi necessário um ajuste fino dos parâmetros. Isso se deve à dinâmica mais rápida do sistema, imposta pelo compressor. O sistema também apresentou dificuldade para assentamento nos pontos de baixa pressão de sucção. No total foram 28 minutos de ensaio.

A fim de realizar um maior levantamento sobre as dinâmicas do processo, foram realizados ensaios em malha aberta com os diferentes modelos de

compressores em todas as regiões de operação. Após análise dos dados obtidos com os ensaios, encontrou-se uma relação entre os parâmetros dos modelos identificados e dos controladores projetados. A partir dessas relações foram obtidas as tabelas 6 e 7, onde  $\tau$  é a constante de tempo e  $K$  é o ganho estático do modelo de primeira ordem identificado, demonstrando uma sugestão empírica para a sintonia dos controladores.

*Tabela 6: Sintonia empírica para o controlador da pressão de sucção.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Relações</b>
$K_c$	$\frac{\tau}{2K}$
$T_i$	$0,6\tau$

*Tabela 7: Sintonia empírica para o controlador da pressão de descarga.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Relações</b>
$K_c$	$\frac{\tau}{K} 0,4$
$T_i$	$\frac{\tau}{9}$

As tabelas 6 e 7 foram definidas para que a resposta do sistema em malha fechada apresente sobressinal menor que 20% e tempo de seguimento igual a um terço do tempo de malha aberta. Como as sintonias dependem apenas dos próprios parâmetros dos modelos, as mudanças decorrentes da troca do compressor são levadas em consideração no cálculo dos ganhos dos controladores.

As respostas das pressões controladas com a utilização das sintonias empíricas estão demonstradas nas figuras 53 e 54.

Figura 53: Resposta da pressão de sucção com a utilização da sintonia empírica.

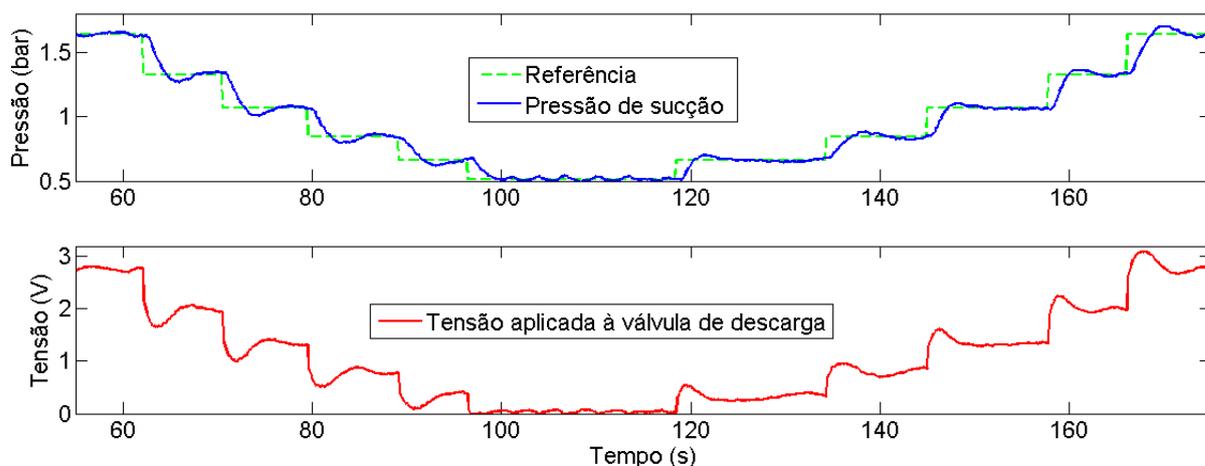
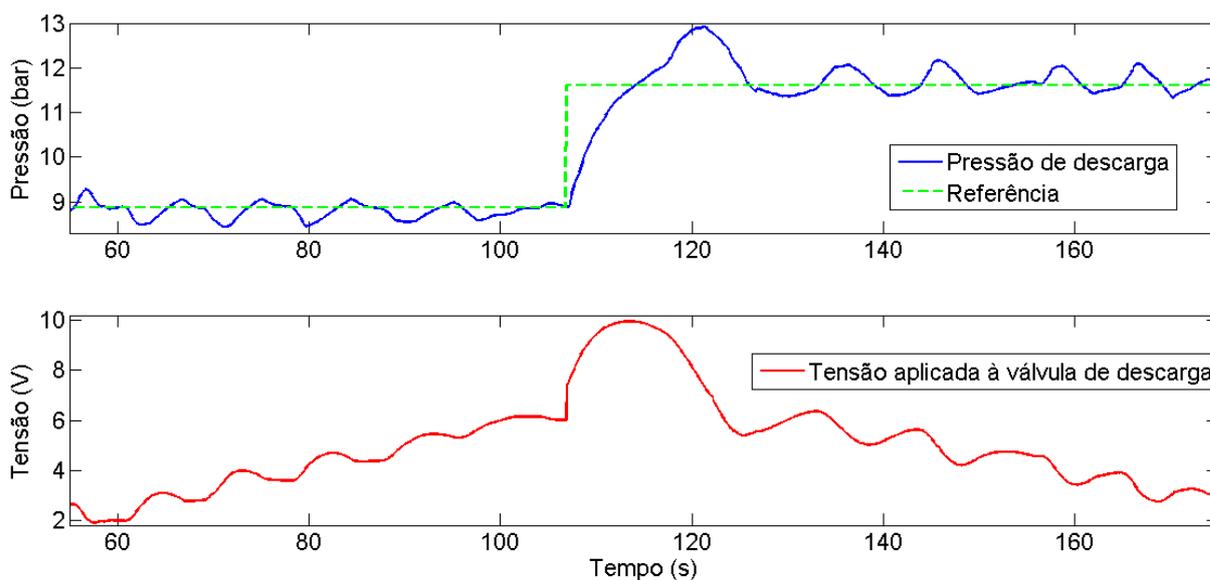


Figura 54: Resposta da pressão de descarga com a utilização da sintonia empírica



Os ensaios das figuras 53 e 54 foram realizados com o compressor de maior capacidade. Para ambas as pressões obteve-se seguimento de referência. A pressão de descarga apresentou sobressinal de 10% e a resposta a sucção 5%. Os tempos de assentamento foram de 5 segundos e 18 segundos para a pressão de sucção e de descarga, respectivamente. Devido à oscilação na resposta, foi necessário reduzir os ganhos proporcionais do escalonador do controlador da pressão de descarga.

Esses resultados são satisfatórios para a aplicação. Conclui-se que a utilização da sintonia empírica, com a adição da implementação do escalonador de ganhos, e um posterior ajuste fino nos parâmetros, obtêm-se um controle regulatório funcional para as pressões do compressor.

## Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas

Ao longo do projeto foi desenvolvida uma estratégia para a realização do ensaio automático de variação das condições de operação do compressor. Os estudos sobre o processo e as técnicas realizadas proporcionaram, além de uma experiência e conhecimentos aplicados de engenharia, uma oportunidade para aplicação na prática os conceitos vistos ao longo da graduação.

Foi desenvolvida uma metodologia para a identificação do sistema, a fim de obter as características dinâmicas do processo ao longo das diversas condições de operação e avaliar as relações entre as variáveis de processo. Através de um estudo mais profundo sobre as condições de operação do compressor foi possível definir uma trajetória de ensaio para a automação do teste.

Este trabalho proporcionou uma revisão e aplicação prática de vários conceitos vistos ao longo da graduação do curso de Engenharia de Controle e Automação para a solução de um problema real. A grande característica deste projeto é o seu aspecto multidisciplinar, pois envolveu conhecimentos sobre controle de processos, instrumentação, sistemas de eventos discretos, termodinâmica e fenômenos de transporte.

Resumidamente, nesse trabalho foram estudadas e implementadas técnicas populares de controle de processos, como a estratégia de *gain scheduling*, muito utilizada para sistemas com características não lineares, e o controle *Feed forward*, para redução do efeito de perturbações nas variáveis controladas. Conclui-se que com controle linear clássico não foi possível solucionar o problema foco deste trabalho, porém com pequenas adaptações de implementação permitiram o uso de técnicas clássicas do controle de processos para resolver um problema real com dinâmicas variáveis e características não lineares.

As máquinas de estado implementadas para o sistema de referências automáticas se mostraram uma solução efetiva e satisfatória para a aplicação, pois as mudanças das referências ocorreram respeitando a trajetória definida para o ensaio. As lógicas de intertravamento possibilitaram permitiram o alcance de alguns

pontos críticos, bem como aceleraram a resposta do sistema em algumas regiões, como é o caso dos pontos de alta descarga.

Ao final, conclui-se que a solução proposta para o problema foi satisfatória e atingiu os objetivos gerais e específicos do projeto. Assim, considerando as devidas adaptações, pode-se adotar esta solução em bancadas equivalentes na indústria. O operador dos ensaios da empresa pode sintonizar facilmente os controladores das pressões do compressor a partir da metodologia de identificação de sistemas utilizada neste trabalho, e dos parâmetros dos controladores calculados através das tabelas de sintonia empírica sugeridas no capítulo 5.

A sugestão para trabalhos futuros é estudar a viabilidade de desenvolvimento e implementação de um sistema de controle adaptativo, ou uma solução que permita a identificação automática do processo, dessa forma permitindo uma melhor adequação dos parâmetros dos controladores ao longo do ensaio.

## Referências:

- ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. North Carolina: ISA, 1995.
- BEGA, E. A. (ED.). **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- COELHO, Augusto A. R.; COELHO, Leandro. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- DORF, Richard C; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos** - 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração**. 1. ed. São Paulo: Hemus, 2004.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- HAUGEN, F., **Basic Dynamics and Control**. 1. ed. Noruega: TechTeach, 2009.
- KATSUHIKO, Ogata, **Modern Control Engineering**. 2. ed., Nova Jersey: Pearson, 2002.
- MILLER, R.; MILLER, M. **Ar-condicionado e refrigeração**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- OLIVEIRA, R. S. e CARISSIMI, A. S. e TOSCANI, S. S. **Sistemas Operacionais**. 3. ed., volume 11. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- OOSTING, K.W.; DICKERSON, S.L., **Feed Forward Control for Stabilization**. 1. ed. ASME, 1987.
- SKOGESTAD, Sigurd; POSTLETHWAITE, Ian. **Multivariable Feedback Control: Analysis And Design**. 2. ed. Wiley, 2005.
- STOECKER, W. F. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- SEBORG, D. E. et al. **Process Dynamics and Control**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

TROTT, Paul. **Gestão da inovação e desenvolvimento de novos produtos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

WRIGHT, David R. **Finite State Machines**. 1. ed. Carolina do Norte: Class Notes, 2005.