

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Curso de Especialização em Automação Industrial

## **Automação do Processo de Colagem na Fabricação de Louças Sanitárias**

Bruno Carneiro Moita Andrade

Orientador: Prof. Pedro Manuel Gonzalez del Foyo

Monografia apresentada ao Centro de  
Tecnologia e Geociências da Universidade  
Federal de Pernambuco como parte dos  
requisitos para obtenção do Certificado de  
Especialista em Automação Industrial

Recife, 2016

## **Resumo**

# **Automação do Processo de Colagem na Fabricação de Louças Sanitárias**

**Bruno Carneiro Moita Andrade**

**Março/2016**

Orientador: Prof. Pedro del Foyo

Área de concentração: Automação Industrial

Palavras-chaves: automação, louças sanitárias, competitividade

Com o mercado cada vez mais competitivo, torna-se necessária a adoção de mecanismos de produção que diminuam ou, se possível, eliminem desperdícios dos recursos utilizados. Em muitas indústrias de louças sanitárias, o processo de colagem (secagem), onde as louças ficam após a etapa de formação da massa, apresenta perdas de material por falta de controle da pressão do ar comprimido. Ora as louças são danificadas, quando a pressão é ajustada acima da pressão ideal, ora o tempo desse processo é prolongado, quando a pressão fica abaixo da ideal. O processo de secagem na referida indústria é realizada em 10 bancadas, onde ficam 30 peças por onde passa ar comprimido sob pressão ideal de 4,5 psi. Portanto, é de fundamental importância que a pressão do ar que passa pelas louças na etapa de colagem esteja sempre nesse valor. Como o equipamento utilizado nesse processo é uma válvula reguladora de pressão mecânica e manual, a pressão sofre interferência da vazão, temperatura, pressão primária do ar comprimido, etc. Com isso, a pressão é constantemente desajustada, o que causa atraso ou danificação de peças durante o processo, conforme já exposto. Como forma de reduzir essas perdas no processo de colagem, foi proposta e aplicada a utilização de uma válvula reguladora proporcional de pressão com controle por realimentação de forma a garantir que a pressão de saída do ar comprimido fosse sempre 4,5 psi, valor ideal para o processo. A bancada onde foi realizado o teste produzia 5800 louças/mês, enquanto que a capacidade de produção de cada bancada é de 6100 louças por mês. Após o teste nessa bancada, foi observado que a produção nela subiu para 6040 louças/mês, ou seja, aumentou mais de 4% em sua produção e ficou a apenas 1% abaixo da ideal. Portanto, foi comprovado que a automação do processo de colagem na indústria de louças sanitárias pode ajudar bastante no aumento da produção e, como consequência, no aumento de faturamento das empresas.

## CONTEÚDO

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Motivação.....	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Organização do trabalho.....	4
1.5 Processo de fabricação de louças sanitárias.....	5
1.6 Processo de colagem.....	6
1.7 Descrição dos equipamentos.....	7
1.7.1 Compressor tipo parafuso.....	7
1.7.2 Válvula Mecânica Reguladora de pressão.....	9
1.7.3 Manômetro tipo bourdon.....	11
1.7.4 Válvula de esfera.....	12
Capítulo 2.....	13
Tecnologias Disponíveis.....	13
2.1 Identificação do ponto de melhoria.....	13
2.1.1 Malha aberta.....	14
2.1.2 Malha fechada.....	14
2.2 Restrições limitantes ao espaço de solução.....	15
2.3 Controladores Lógicos Programáveis.....	17
2.4 Válvula reguladora proporcional de pressão.....	20
2.5 Fundamentação da especificação.....	23
Capítulo 3.....	25
Proposta de Solução.....	25
3.1 Funcionamento do sistema em malha fechada e seus componentes.....	27
3.2 Identificação do modelo utilizado.....	27
3.3 Identificação da função de transferência do sistema.....	28
3.4 Sintonia do controlador PID para a função de transferência.....	31
Capítulo 4.....	33
Implementação do Sistema Projetado e Resultados Obtidos.....	33
4.1 Implementação da malha fechada de controle.....	33
4.2 Resultados obtidos.....	38
Capítulo 5.....	41
Conclusão.....	41
5.1 Trabalhos Futuros.....	42
Referências.....	43

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 – Representação das louças na bancada de sistema de colagem.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 1.2 - Disposição real das louças sanitárias na bancada de sistema de colagem.....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 1.3 – Compressor tipo parafuso.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 1.4 – Simbologia gráfica de compressor conforme Norma ISO 1219 (NBR 8896) .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 1.5 – Esquema e foto de válvula reguladora de pressão. ....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 1.6 - Gráfico de pressão x vazão de uma série de válvula reguladora de pressão mecânica. ....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 1.7 – Manômetro analógico.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 1.8– Válvula de esfera .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 1.9 – Simbologia gráfica de válvula 2 vias, 2 posições, normalmente fechada, acionamento manual de acordo com a Norma ISO 1219 (NBR 8896) .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.1 – Sistema de malha aberta (sem realimentação) no processo de colagem.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2.2 – Sistema de malha fechada (com realimentação).....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2.3 – Diagrama de blocos do processo de colagem antes da solução automatizada.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.4 – Painél com CLP disponível na indústria de louças sanitárias onde o teste foi realizado. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.5 – Diagrama de bloco de uma válvula reguladora de pressão proporcional. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.6 – Gráfico vazão x pressão de uma válvula reguladora de pressão proporcional.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.7 – Válvula reguladora de pressão proporcional. ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.8 – Diagrama de blocos do processo de colagem após automação.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 3.1 – Gráfico de controle PID.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 3.2 – Entrada degrau e resposta do sistema [4].....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 3.3 – Parâmetros de uma função de transferência de primeira ordem.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 3.4 – Cálculo do valor de T através de interpolação linear em programa computacional .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 3.5 – Diagrama de bloco do processo com o controlador.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 4.1 – Bloco PID presente no software utilizado na aplicação.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 4.2 – Esquematização das ligações da aplicação em forma de diagrama de uma malha PID. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 4.3 – Gráfico da resposta do sistema implantado.....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1 – Valores coletados do sistema em execução .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 3.2 – Tabela de Ziegler e Nichols baseada na resposta ao degrau da planta. ....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 3.3 – Constantes do modelo .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 4.1 – Características de catálogo da válvula reguladora de pressão proporcional.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 4.2 – Parâmetros de configuração da válvula reguladora de pressão proporcional.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 4.3 – Características de catálogo do CLP utilizado na aplicação. ....</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 4.4 – Descritivo das funções presente no bloco PID do software do CLP utilizado.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4.5 – Quantidade total de louças produzidas mês x quantidade idealizada.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 4.6 – Quantidade de louças produzidas por mês na bancada testada antes da aplicação x quantidade de louças produzidas após a automação desta bancada. ....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 4.7 – Simulação comparativa de faturamento entre a quantidade de louças produzidas por mês nas bancadas antes da automação e caso as bancadas fossem todas automatizadas e oferecessem o mesmo resultado da bancada testada. ....</b>	<b>39</b>



# Capítulo 1

## Introdução

Há uma necessidade cada vez maior do controle dos processos industriais em todos os segmentos, pois com tal controle, obtém-se confiabilidade e precisão nos processos e uma maior segurança aos operadores. Outros benefícios daí oriundos são redução de perdas de materiais durante o processo, maior velocidade de produção e diminuição de mão-de-obra braçal, gerando economia e segurança no setor industrial.

No mercado de cerâmicas e louças sanitárias, onde o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, não é diferente, o controle dos processos industriais é fundamental para obtenção de confiabilidade, precisão e redução de custos.

O segmento cerâmico de louça sanitária integra o ramo de produtos de minerais não metálicos da indústria de transformação e tem como especialização produtiva a fabricação de bacias, caixas d'água, bidês, lavatórios, colunas, mictórios, tanques de lavar roupas e acessórios.

Internacionalmente, a indústria de louças sanitárias caracteriza-se por compor um mercado oligopolizado, dominado por cerca de uma dezena de grupos multinacionais, que integram uma cadeia produtiva globalizada.

No Brasil, a predominância em sua estrutura de mercado de louças sanitárias é de unidades fabris de médio a grande porte. A partir do final da década de 1960, a produção brasileira de louças sanitárias saltou de 2 milhões de peças para os mais de 20 milhões de peças atuais.

Nos últimos anos, deu-se o surgimento de grupos pequenos no Brasil, voltados à fabricação de peças sanitárias de baixo custo, concorrendo com as tradicionais gigantes do setor no mercado local. Dessas, quatro estão situadas na região Nordeste e três em Minas Gerais. Apesar da pequena fatia do mercado interno conquistado por esses novos empreendimentos (menos de 10%), trata-se de movimentação empresarial significativa em busca de oportunidades relacionadas às camadas de renda relativamente mais baixas. Essas indústrias são classificadas como de pequeno, médio ou grande porte dependendo do faturamento mensal das empresas. As empresas de pequeno porte do setor de louças sanitárias são as que faturam até R\$5.000.000,00/mês. Todas as empresas de pequeno porte que atuam no Brasil são empresas nacionais, pois as multinacionais que atuam no país classificam-se entre médio e grande porte. Já as empresas de médio porte são as que faturam entre R\$5.000.000,00 e R\$10.000.000,00/mês. Enquanto que as de grande porte são as que apresentam faturamento superior a R\$10.000.000,00 mensalmente. A empresa onde o teste foi aplicado é classificada como uma empresa de pequeno porte, pois seu faturamento mensal é menor do que R\$5.000.000,00.

O coeficiente de ocupação média por unidade de produção em uma indústria sanitária no país situa-se em torno de 235 peças/funcionários/mês ou 2800 peças/funcionários/ano. Esta produtividade varia entre 300 peças/funcionários/mês nas fábricas mais automatizadas, obtendo índices similares às empresas líderes internacionais e 180 peças/funcionários/mês, índice obtido pelas empresas geralmente mais antigas e com menor nível de automação [3].

Baseado nesse parâmetro, foi observado que indústrias de louças sanitárias de menor porte podem obter maior produtividade realizando simples modificações em alguns processos. Uma dessas modificações visualizadas é no processo de colagem, no qual as louças, após a formação da massa, vão para a etapa de secagem em moldes. Em uma indústria de louças sanitárias em Caruaru, agreste pernambucano, foi observado que, nessa etapa, as louças devem passar por uma bancada recebendo ar comprimido a 4,5 psi (*pounds per square inch* – libras por plegada quadrada) de pressão. Caso essa pressão seja reduzida, as louças levam mais tempo para passar por esse processo, o que gera redução de produtividade diária. E, caso a pressão seja elevada, pode ocorrer estouro de louças, o que também gera redução de produtividade, pois menos louças serão fabricadas ao final de todo processo.

O controle da pressão de ar comprimido, estava sendo feito através de uma válvula reguladora de pressão mecânica para o ajuste desta variável em malha aberta. Estas válvulas não



apresentam confiabilidade necessária ao processo, e pelo fato de funcionarem em malha aberta, mudanças na pressão podem acontecer devido a perturbações.

Para resolver esse problema, propomos que o controle da pressão do ar comprimido seja feito através de uma malha fechada de controle, substituindo a válvula reguladora de pressão mecânica. A malha de controle estará formada por uma válvula reguladora proporcional de pressão como elemento atuador e um CLP (controlador lógico programável), o qual será responsável pela execução da lei de controle.

Desta forma, o processo torna-se mais confiável e preciso, visto que a pressão não cairá a ponto de as louças sanitárias passarem mais tempo do que o necessário no processo de colagem, nem a pressão será elevada a ponto de ocorrer estouro de louças de forma que haja perdas de materiais ao final do processo.

## **1.1 Objetivo**

Aumentar a eficiência da linha de produção de louças sanitárias aumentando a confiabilidade – probabilidade de um produto desenvolver sua função sem falhar até um certo tempo - do processo de secagem (colagem) nas indústrias de louças sanitárias através da melhoria do controle da pressão de ar comprimido. No processo de colagem, quando a pressão da válvula reguladora mecânica de pressão é ajustada a uma pressão de saída de 4,5 psi e a saída real é diferente desse valor, pode se considerar que houve uma falha no processo. Em média, o processo apresenta uma falha a cada 4 horas.

## **1.2 Motivação**

Este trabalho tem como motivação buscar uma solução para aumentar a produtividade – relação entre os resultados obtidos em um processo e os recursos utilizados para a sua obtenção - em indústrias de louças sanitárias. O aumento de produtividade poderá ser atingido de duas formas: aumentando a quantidade de peças produzidas por unidade de tempo e/ou reduzindo a quantidade de peças danificadas durante o processo de produção. Na bancada onde o teste foi realizado, eram produzidas 5800 louças mensalmente.

O processo de secagem das louças sanitárias é uma parte do processo de produção em que estas melhorias podem ser atingidas através de um investimento para melhoria do controle da pressão de ar comprimido usado para a secagem das louças sanitárias neste processo.

### **1.3 Metodologia**

Primeiramente foi estudado o processo atual do sistema de colagem. Analisando a pressão de saída da válvula reguladora de pressão mecânica utilizada nas bancadas no processo de colagem, para verificar como variações na pressão de ar comprimido afetam a eficiência do processo de secagem das louças sanitárias.

Para manter um controle preciso desta pressão será proposta a mudança de controle em malha aberta para um de malha fechada de forma a garantir que eventuais perturbações não impactem a qualidade do processo.

A escolha dos elementos da malha de controle será feito levando em consideração a capacidade de produção da linha de secagem e o possível aproveitamento de equipamentos já presentes na indústria de forma a diminuir os custos deste projeto.

A primeira parte será o dimensionamento de uma válvula proporcional pneumática que garanta a vazão de ar comprimido necessária, além de trabalhar na faixa de pressão adequada ao processo.

Logo alguns experimentos serão conduzidos para determinar a lei de controle a ser utilizada na malha de controle procedendo ao ajuste dos parâmetros da mesma até atingir as especificações do comportamento da pressão de ar comprimido.

Finalmente será realizado um estudo do impacto desta melhora tecnológica na produtividade da linha de produção de louças sanitárias.

### **1.4 Organização do trabalho**

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos:

Capítulo 1 – Neste capítulo está a parte introdutória, detalhando características do mercado de louças sanitárias no Brasil e no mundo. E foi explicado o problema em uma etapa da produção de louças sanitárias, em uma indústria localizada em Caruaru, agreste de Pernambuco. Foram explicitados o objetivo, motivação e metodologia deste trabalho. Foi explicitado também o processo de fabricação de louças sanitárias, como também foram detalhados os equipamentos utilizados no processo antes da automação da etapa de colagem.

Capítulo 2 – Neste capítulo foram detalhados os equipamentos utilizados no sistema antes da automatização. Também será detalhada a ideia da solução e a explicação a respeito de sistemas de malha aberta e fechada.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo foi descrito com maiores detalhes o problema do sistema de colagem. Foi detalhada toda a solução do sistema, a partir do modelo matemático da planta, até a sintonia para a inserção dos parâmetros dos ganhos PID no bloco específico do CLP.

Capítulo 4 – Neste capítulo foi mostrado o comparativo de produção do sistema antes e depois da montagem do sistema automatizado.

Capítulo 5 – No último capítulo estão as conclusões após a comparação do quantitativo de produção de louças antes e depois da montagem do sistema automatizado. E também estão as sugestões para trabalhos futuros.

## **1.5 Processo de fabricação de louças sanitárias**

A fabricação de louças sanitárias inicia-se com o processo de pesagem das matérias-primas como argila, caulim, quartzo, filito, pegmalito, entre outras. Esses componentes são testados e em seguida pesados na proporção exata para composição da massa.

Após a etapa de pesagem, os compostos passam pela etapa de moagem. Nessa etapa, adiciona-se água às matérias-primas durante, aproximadamente, 20 horas. Neste tempo, os componentes são moídos e, como resultado, obtém-se a barbotina ou massa líquida.

Na sequência, a barbotina passa pelo processo de fundição (moldagem), onde a massa é colocada em fôrma de gesso para adquirir a conformação do molde. Esse processo dura, em média, 1h30m.

Após a moldagem, as peças passam pela etapa de colagem, secagem, em bancadas com passagem de ar comprimido entre as peças, até a peça adquirir consistência para avançar para a etapa de esmaltação. O processo de colagem dura entre 4 e 8 horas.

O processo de esmaltação consiste na aplicação manual de esmalte cerâmico nas peças, através de pistolas de ar comprimido mais esmalte, em cabines individuais.

Por fim, as louças passam pelo processo de queima, onde as louças ficam por cerca de 13 horas, em fornos a uma temperatura de até 1250 °C.

## 1.6 Processo de colagem

Após a aplicação da massa cerâmica nos moldes das louças, as peças são expostas em bancadas para secagem. Essa etapa é chamada de colagem ou secagem. Para que esta etapa seja acelerada, é aplicado nas louças um jato de ar comprimido. A pressão ideal desse jato varia conforme a quantidade de louças no processo e da consistência da massa. Na indústria onde foi realizado o teste prático, a pressão ideal é 4,5 psi. Pois na prática, quando a pressão aumenta, podem ocorrer danos em louças. E quando a pressão fica abaixo do ideal, o processo pode levar mais tempo para ser finalizado. As figuras 1.1 e 1.2 mostram a representação das louças na bancada de colagem e a disposição real das louças sanitárias em uma bancada durante o processo de colagem.



Figura 1.1 – Representação das louças na bancada de sistema de colagem.



**Figura 1.2 - Disposição real das louças sanitárias na bancada de sistema de colagem.**

Em seguida, serão descritos os equipamentos utilizados na etapa de colagem das louças sanitárias sem controle da pressão de saída.

### **1.7 Descrição dos equipamentos**

Antes da automação da bancada, eram utilizados no processo os seguintes equipamentos:

1. Compressor tipo parafuso
2. Válvula reguladora de pressão
3. Manômetro tipo bourdon
4. Válvula de esfera

#### **1.7.1 Compressor tipo parafuso**

Compressor é o equipamento responsável por comprimir o ar captado no ambiente, com isso elevando a pressão de um certo volume de ar até determinada pressão exigida para a execução dos trabalhos realizados pelo ar comprimido.

O compressor é classificado através de dois tipos de princípio de trabalho: deslocamento positivo e deslocamento dinâmico.

O compressor de deslocamento positivo baseia-se fundamentalmente na redução do volume. O ar é admitido em uma câmara isolada do meio exterior, onde seu volume é gradualmente diminuído, processando-se a compressão. Quando uma certa pressão é atingida, provoca a abertura de válvulas de descarga, ou simplesmente o ar é empurrado para o tubo de descarga durante a contínua diminuição do volume da câmara de compressão.

Já no compressor de deslocamento dinâmico, a elevação da pressão é obtida por meio de conversão de energia cinética em energia de pressão, durante a passagem do ar através do compressor. O ar admitido é colocado em contato com impulsores (rotor laminado) dotados de alta velocidade. Esse ar é acelerado, atingindo velocidades elevadas e conseqüentemente os impulsores transmitem energia cinética ao ar. Posteriormente, seu escoamento é retardado por meio de difusores (espécie de dutos que provoca diminuição na velocidade de escoamento de um fluido, causando aumento de pressão), obrigando a uma elevação na pressão.

Há diversos tipos de compressores que trabalham de acordo com os princípios de trabalho acima. Os que trabalham com deslocamento dinâmico são os de fluxo radial, fluxo axial rotativos e ejetores. Os que trabalham com deslocamento positivo são os de palheta, parafuso e de pistão.

Neste trabalho foi utilizado compressor de deslocamento positivo tipo parafuso, cuja foto de um modelo é representada na figura 1.3 e sua simbologia é representada na figura 1.4. Esse compressor é dotado de uma carcaça onde giram dois rotores helicoidais em sentidos opostos. Um dos rotores possui lóbulos convexos, o outro uma depressão côncava e são denominados, respectivamente, rotor macho e rotor fêmea. Os rotores são sincronizados por meio de engrenagens. O processo mais comum é acionar o rotor macho, obtendo-se uma velocidade menor do rotor fêmea. Esses rotores revolvem-se numa carcaça cuja superfície interna consiste de dois cilindros ligados como um oito. Nas extremidades da câmara existem aberturas para admissão e descarga do ar. O ar à pressão atmosférica ocupa o espaço entre os rotores e, conforme eles giram, o volume compreendido entre os mesmos é isolado da admissão. Em seguida, começa a decrescer, dando início à compressão. Esta prossegue até uma posição tal que a descarga é descoberta e o ar é descarregado continuamente, livre de pulsações. No tubo de descarga existe uma válvula de retenção, para evitar que a pressão faça o compressor trabalhar como motor durante os períodos em que estiver parado [2].



Figura 1.3 – Compressor tipo parafuso

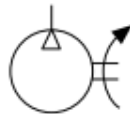


Figura 1.4 – Simbologia gráfica de compressor conforme Norma ISO 1219 (NBR 8896)

### 1.7.2 Válvula Mecânica Reguladora de pressão

Os reguladores de pressão mecânicos foram projetados para proporcionar uma resposta rápida e uma regulação de pressão acurada para o maior número de aplicações industriais. Estes equipamentos apresentam como características: resposta rápida, longa vida útil e fácil manutenção.

A seguir será detalhada a operação de um regulador de pressão mecânico. A explicação da operação é baseada no modelo de uma válvula disposta na figura 1.5.

O ar comprimido entra por (P) e pode sair por (P') apenas se a válvula de assento estiver aberta. A secção de passagem regulável está situada abaixo da válvula de assento (C). Girando totalmente a manopla (D) no sentido anti-horário (mola sem compressão), o conjunto da válvula de assento (C) estará fechado [2].

Girando a manopla no sentido horário, aplica-se uma carga numa mola calibrada de regulação (A) fazendo com que o diafragma (B) e a válvula de assento (C) se desloquem para

baixo, permitindo a passagem do fluxo de ar comprimido para a utilização (H). A pressão sobre o diafragma (B) está balanceada através do orifício de equilíbrio (G) quando o regulador está em operação. A pressão secundária, ao exceder a pressão regulada, causará, por meio do orifício (G), ao diafragma (B), um movimento ascendente contra a mola de regulagem (A), abrindo o orifício de sangria (F) contido no diafragma. O excesso de ar é jogado para atmosfera através de um orifício (E) na tampa do regulador (somente para reguladores com sangria). Portanto, uma saída de pressão pré-regulada é um processo de abre-fecha da válvula de assento (C), que poderia causar certa vibração. Isso é evitado porque certos reguladores são equipados por um amortecimento (I) à mola ou ar comprimido. O dispositivo autocompensador (CI) permite montar o regulador em qualquer posição, e confere ao equipamento um pequeno tempo de resposta [2].

A pressão de saída é alterada pela atuação sobre a manopla de regulagem, não importa se é para decréscimo - quando a pressão secundária regulada é maior, o ar excedente desta regulagem é automaticamente expulso para o exterior através do orifício (F) até a pressão desejada ser atingida - ou acréscimo - o aumento processa-se normalmente atuando-se a manopla e comprimindo-se a mola (A) da forma já mencionada; através de um manômetro (J) registram-se as pressões secundárias reguladas [2].

• Seção de um regulador de pressão com escape

- A - Mola
- B - Diafragma
- C - Válvula de assento
- D - Manopla
- E - Orifício de exaustão
- F - Orifício de sangria
- G - Orifício de equilíbrio
- H - Passagem do fluxo de ar
- I - Amortecimento
- J - Comunicação com manômetro

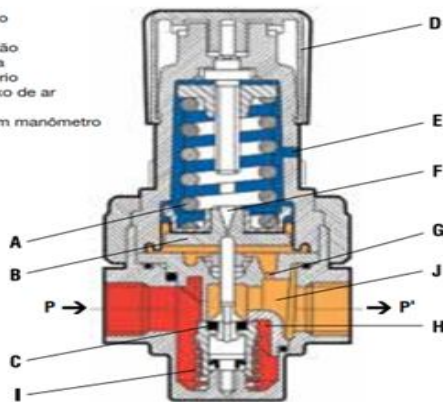
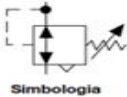


Figura 1.5 – Esquema e foto de válvula reguladora de pressão.

A vazão de uma válvula reguladora de pressão depende da bitola da conexão. Na figura 1.6 pode-se verificar o gráfico da vazão para válvulas reguladora de pressão de mesma série de um mesmo fabricante com duas bitolas de rosca diferente, 1/4" e 1/2".



## Série 06

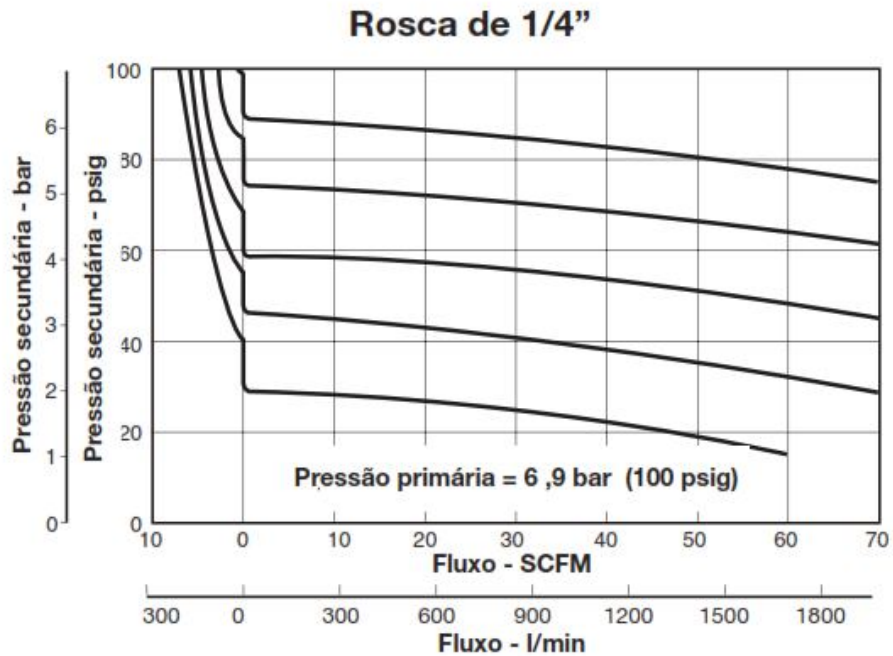


Figura 1.6 - Gráfico de pressão x vazão de uma série de válvula reguladora de pressão mecânica.

### 1.7.3 Manômetro tipo bourdon

São instrumentos utilizados para medir e indicar a intensidade de pressão do ar comprimido, óleo, etc. Nos circuitos pneumáticos e hidráulicos, os manômetros são utilizados para indicar o ajuste de pressão no sistema.

Existem dois tipos principais de manômetros: os manômetros capsulares (0 - 1000 mBar) e os manômetros tipo de Bourdon. Os mais utilizados no mercado são os tipo de Bourdon.

O tubo de bourdon consiste em uma escala circular sobre a qual gira um ponteiro indicador ligado a um jogo de engrenagens e alavancas. Este conjunto é ligado a um tubo recurvado, fechado em uma extremidade e aberto em outra, que está ligada com a entrada de pressão. Aplicando-se pressão na entrada, o tubo tende a endireitar-se, articulando-se as alavancas com a engrenagem, transmitindo movimento para o indicador e registrando a pressão sobre a escala [2].

Um exemplo de manômetro do tipo bourbon está disposto na figura 1.7.



**Figura 1.7 – Manômetro analógico.**

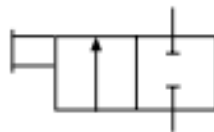
#### **1.7.4 Válvula de esfera**

A função da válvula de esfera é dar passagem plena do ar comprimido para as louças que estão nas bancadas no momento do processo de colagem. Caso não haja louça nesse processo, a válvula de esfera deverá estar fechada. Ocorre que em muitas ocasiões onde não há louças no processo de colagem, a válvula fica aberta, o que acarreta queda de pressão do processo e perda de energia em virtude do aumento de consumo do compressor.

As figuras 1.8 e 1.9 representam uma imagem real de uma válvula de esfera e sua simbologia respectivamente.



**Figura 1.8– Válvula de esfera**



**Figura 1.9 – Simbologia gráfica de válvula 2 vias, 2 posições, normalmente fechada, acionamento manual de acordo com a Norma ISO 1219 (NBR 8896)**

# Capítulo 2

## Tecnologias Disponíveis

### 2.1 Identificação do ponto de melhoria

As fábricas de louças, em geral, não automatizam o processo de colagem. Elas utilizam equipamentos sem controle da pressão de saída para secagem das peças sanitárias. Portanto, como forma de dar maior eficiência a essa etapa, foi sugerida a utilização de equipamentos capazes de controlar a pressão secundária ao valor de referência de 4,5 psi, de forma que o processo finalize no tempo ideal sem que ocorram estouros nas peças.

Existem diversas formas de se implementar sistemas de controle automático, entretanto, a mais utilizada é com sistemas eletroeletrônicos, devido principalmente a versatilidade e dinamismo necessários a um controle de processo. Dado que um sistema de controle é predominantemente elétrico e os processos envolvem transformações mecânicas, químicas e físicas, deve-se converter o sinal de um controlador eletrônico no sinal adequado ao processo, tanto do ponto de vista da

natureza, quanto do ponto de vista de magnitude. Este elemento é o atuador, pois é ele quem atua diretamente sobre o processo, sempre em resposta à saída do controlador.

Para que o controlador gere o sinal de controle para o atuador, ele precisa de uma referência, ou seja, um sinal na sua entrada que diga ao controlador o que ele deve fazer com o processo.

Em um sistema de controle, é necessário saber como anda o processo e obter informações a respeito de parâmetros do mesmo. Ou seja, é necessário um dispositivo capaz de converter uma grandeza física em uma grandeza elétrica, com o objetivo de possibilitar a medição do andamento do processo. Este dispositivo é o transdutor.

Há duas formas de controle, o sistema de controle de malha aberta o de malha fechada.

### 2.1.1 Malha aberta

Quando o controlador gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, sem obter nenhuma informação a respeito do andamento do processo. Ou seja, trata-se de um sistema sem realimentação, sendo o sinal de entrada o próprio sinal de referência (*setpoint*). No processo de colagem, o controlador é o operador da bancada que ajusta a pressão da válvula reguladora de pressão a 4,5 psi. Quando a pressão é desajustada, através de distúrbios externos, o operador corrige a pressão manualmente.

A figura 2.1 representa o diagrama do sistema de malha aberta no processo de colagem antes de sua automação.

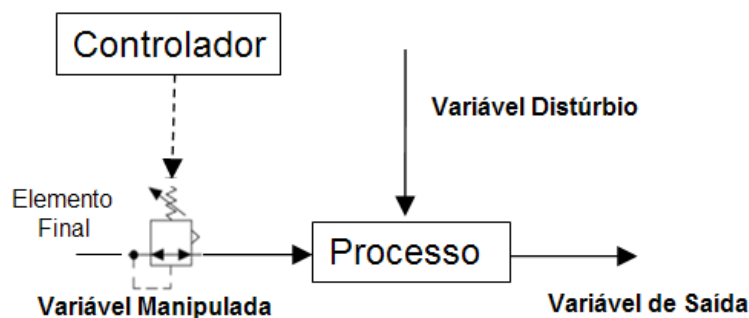


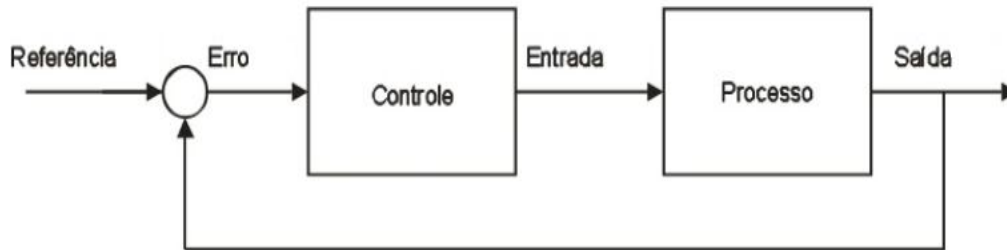
Figura 2.1 - Sistema de malha aberta (sem realimentação) no processo de colagem.

### 2.1.2 Malha fechada

Quando o controlador gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, porém agora ele recebe informação a respeito do andamento do processo, através de um transdutor. O sinal de

entrada, neste caso, corresponde a diferença entre a referência e o sinal do transdutor. O sinal de controle é determinado de forma a corrigir o desvio entre a saída e o sinal de referência.

A figura 2.2 representa o diagrama de um sistema de malha fechada.



**Figura 2.2 – Sistema de malha fechada (com realimentação).**

A utilização de sistemas de controle por malha fechada apresenta algumas vantagens com relação aos sistemas de controle por malha aberta, dentre elas:

1. aumento da precisão do sistema;
2. redução do efeito de perturbações externas;
3. melhora a dinâmica do sistema e, eventualmente, estabiliza sistemas naturalmente instável em malha aberta;
4. diminuição da sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo, ou seja, torna o sistema robusto.

## **2.2 Restrições limitantes ao espaço de solução**

Quando se fala em automação de processos, há a impressão de que a aquisição de materiais e serviços para tornar o sistema automatizado terá um alto valor a ser pago. E na automação do processo de colagem não foi diferente. Nas primeiras tratativas a respeito da automação do processo de colagem na indústria de louças sanitárias localizada em Caruaru, interior de Pernambuco, os responsáveis pela negociação da aquisição dos componentes para automatizar o processo tinham exatamente a ideia de que a compra dos materiais custaria um valor considerável e a solução traria resultados inexpressivos.

Dentre os equipamentos necessários para a automação do sistema de colagem era necessário um controlador, um atuador e um transdutor. A proposta de solução consistia apenas na aquisição de uma válvula reguladora proporcional de pressão, que funcionaria tanto como atuador, quanto

como um transdutor. Não era necessária a aquisição de um controlador, pois já havia um que não possuía utilização na fábrica onde o teste foi realizado.

Além da questão financeira, quase sempre há a resistência a mudanças por parte dos operadores. Pois eles já estão acostumados com a rotina da operação e quando há modificações no processo, nem sempre a adaptação se dá de forma fácil. Ainda há o receio dos operadores de que a automação de processos resulta em eliminação de mão-de-obra humana.

Foi necessário comparar o diagrama de blocos do processo antes e depois da automação, representados através das figuras 2.3 e 2.8 respectivamente, para comprovar que o operador não teria sua função eliminada, mas sim facilitada após a implementação do sistema controlado por malha fechada. E sem a necessidade de compra do controlador, tornou-se viável a aquisição apenas da válvula reguladora proporcional de pressão. Na negociação foi firmado o acordo onde caso o sistema trouxesse benefício na bancada de teste, a solução seria replicada para todas as bancadas.

Outro ponto positivo para a realização do teste foi a verificação de uma alta taxa de falhas no processo, onde, em média, a cada 4 horas o operador detectava pressão fora da medição ideal e este realizava ajustes com frequência. Em muitos casos, o operador estava realizando outras tarefas e a pressão estava desajustada há algum tempo, quando nessas situações a pressão estava acima da pressão ideal, ocorriam os estouros das louças. E com a automação do processo de colagem, a tendência era minimizar ou diminuir essa falha.

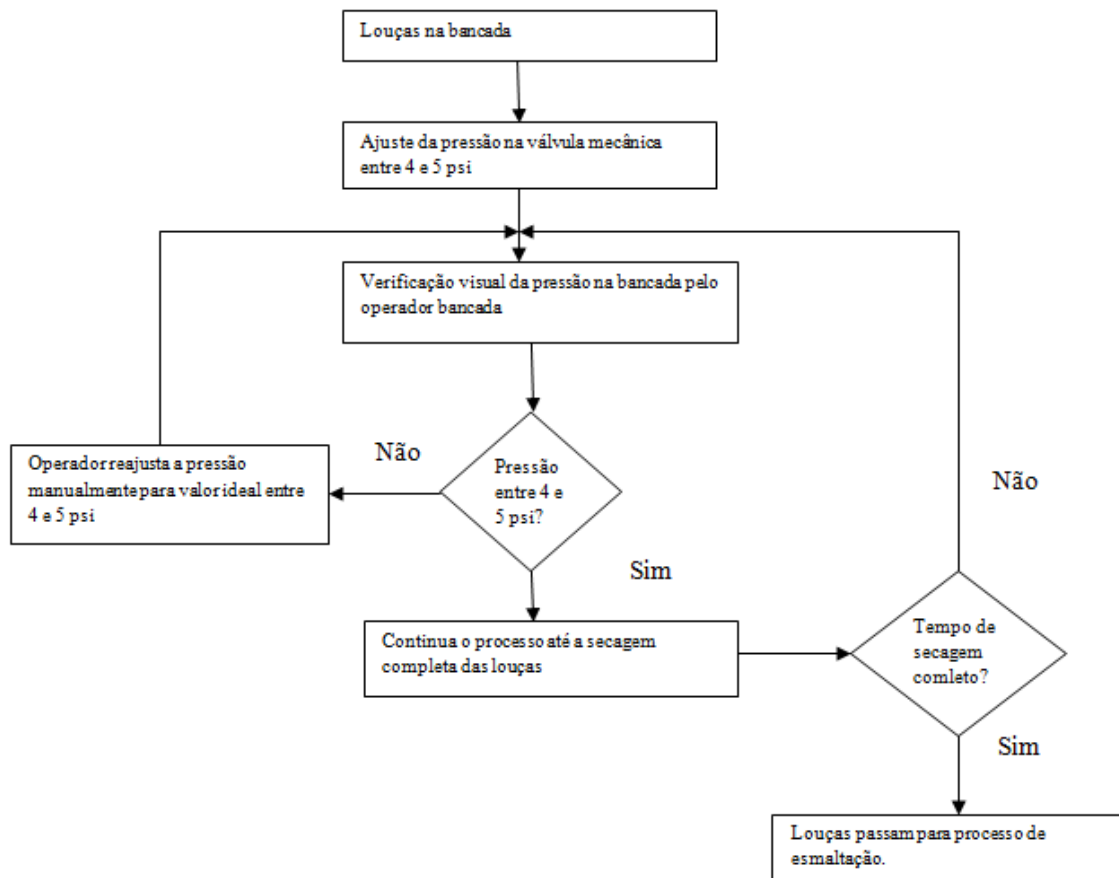


Figura 2.3 – Diagrama de blocos do processo de colagem antes da solução automatizada.

Os itens necessários para a automação do sistema de colagem são os seguintes:

1. Controlador lógico programável;
2. Válvula reguladora proporcional de pressão.

### 2.3 Controladores Lógicos Programáveis

O controlador lógico programável (CLP) adveio da necessidade da indústria automobilística dos Estados Unidos. Em meados de 1968, o engenheiro da *Hydronic Division* da *General Motors*, Richard Morley, criou o primeiro CLP diante da dificuldade em mudar a lógica de controle nos painéis de comando na medida em que havia alteração na linha de montagem.

O CLP foi definido pela NEMA (*National Electronic Manufacturing Association – USA*), em 1978, como “um aparelho eletrônico digital que contém uma memória programável para armazenamento de instruções que são utilizadas para implementar funções específicas, tais como

lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, com o objetivo de controlar máquinas”.

Os controladores lógicos programáveis apresentam como características:

1. o baixo consumo de energia elétrica;
2. capacidade de operação confiável em ambiente industrial;
3. baixos níveis de ruídos elétricos;
4. interface de comunicação com outros equipamentos;
5. permite a expansão de capacidade de memória;
6. utilização de até cinco linguagens de programação padronizadas;
7. possibilita o desenvolvimento de cálculos complexos;
8. podem ser reprogramados;
9. permitem o envio e recebimento de informações no modo on-line.

O CLP funciona como um fluxo de informações entre módulos com funções distintas. Nesta configuração, um módulo de monitoração obtém uma informação proveniente do processo e envia ao módulo de controle. O controlador, ao receber esta informação, toma decisões e envia uma informação ao módulo de atuação. Este, por sua vez, realiza alguma interferência no início do processo, com o intuito de controlar o processo corretamente, conforme o programa.

O CLP apresenta dois modos de operação, o modo STOP e o modo RUN, sendo que, no modo RUN, todas as instruções ora programadas são executadas. Neste modo, a lógica programada é executada e as saídas são atualizadas de acordo com o resultado da execução. Enquanto que no modo STOP o CLP fica em estado de espera e independente de qualquer estímulo, nenhuma ação é tomada. Neste modo, as saídas são atualizadas, entretanto permanecem inalteradas visto que o programa é ignorado, quando em modo STOP.

Atualmente, existem CLPs dos mais diversos tipos. Com isso, cada aplicação requer um modelo. Os CLPs dividem-se, por exemplo, por tamanho:

1. Nano e Micro CLPs – possuem pouca capacidade de entradas e saídas (E/S), máximo de 16 entradas e 16 saídas. Normalmente digitais, composto de um módulo, baixo custo e reduzida capacidade de memória.
2. CLPs de médio porte – capacidade de até 256 E/S digitais e analógicas. São formados por um módulo básico expansível. Com custo médio.



3. CLPs de grande porte – apresentam construção modular, uma fonte de alimentação, CPU principal, módulos de E/S digitais e analógicos, Módulos de E/S especializados, Módulos de redes locais ou remotas. Apresentam custo mais elevado.

Com uma variedade de especificações de controladores lógicos programáveis, percebe-se que cada aplicação requer um tipo de CLP específico, pois para aplicações que requerem poucas entradas e saídas, pouca memória, velocidade não tão crítica de resposta, não se faz necessário um CLP de grande porte, pois neste caso seria desperdício, porquanto muitos recursos do controlador não seriam utilizados.

Para a automação do processo de colagem na indústria de louças sanitárias não era necessário um CLP com muitos recursos. Para isso, foi utilizado um CLP CLIC02 da WEG que estava de posse da indústria onde foi realizado o experimento e o equipamento apresentava todas as funções necessárias para a aplicação.

O CLIC02 é ideal para aplicações de pequeno e médio porte, em tarefas de intertravamento, temporização e contagem, operações matemáticas básicas. Além disso, apresenta controle PID, funções aritméticas, boa capacidade de programação.

A seguir seguem outras características do CLIC02:

1. tensão de alimentação 12 Vcc, 24 Vcc 08 110-220 Vca (50/60 Hz);
2. expansão de módulos de entradas e saídas;
3. configuração máxima de até 44 pontos de entradas e saídas digitais, 4 pontos para Pt-100, 4 entradas e 4 saídas analógicas;
4. relógio de tempo real;
5. software de programação gratuito CLIC02 Edit V3;
6. programa em Ladder ou diagrama de blocos da função (FDB)
7. controle PID e funções aritméticas;
8. comunicação em RS485/Modbus mestre/escravo;
9. cartão de memória PM05-3rd (opcional).

A técnica mais frequentemente utilizada em sistema que apresenta uma entrada e uma saída é a do controle proporcional, integral e derivativo (PID). Trata-se da mais utilizada por possuir simples ajuste. Além disso, em muitos CLPs já existe um algoritmo PID pronto para ser aplicado. E o CLIC02 possui este algoritmo [5].

A figura 2.4 mostra o painel com o CLIC02 utilizado na fábrica onde foi realizada a automação do processo de colagem de louças sanitárias.



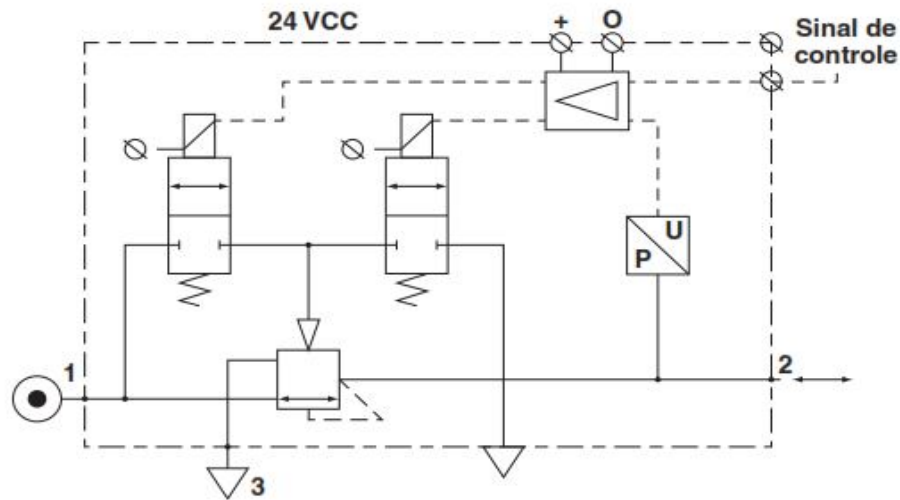
Figura 2.4 – Painél com CLP disponível na indústria de louças sanitárias onde o teste foi realizado.

## 2.4 Válvula reguladora proporcional de pressão

Compacta e leve, a válvula proporcional reguladora de pressão séries P3HPA e P3KNA da Parker tem como principal função regular rapidamente, e com precisão, a pressão de utilização. Perfeita em sistemas onde se deseja um contínuo controle de pressão, independente dos efeitos que podem interferir na pressão de saída, tais como variações de fluxo, pressão de entrada, pressão de retorno, etc. Possui um sistema integrado que controla a pressão de saída proporcionalmente a um sinal de controle analógico, através de tensão ou corrente, com excelente precisão obtida através de um sensor de pressão integrado que atualiza os valores de pressão modulada, através de um amplificador diferencial. Possui um display com LED (*Light Emitting Diode*) de alta visibilidade que indica a pressão de saída e alertas de segurança. Configurações podem ser realizadas facilmente através dos controles localizados na parte frontal da válvula. Apresenta como características baixo consumo de energia e nenhuma perda de ar, quando estabilizada a pressão de saída. Trabalha com tensão de 24 VCC e sinal de controle através de tensão (0 a 10 V) ou corrente (4 a 20 mA), que modula proporcionalmente a pressão de saída na escala de 0 a 10 bar. Este controle pode ser configurado no próprio equipamento, através de um simples ajuste em seu painel. Além disso, através dos comandos de configuração da válvula é possível obter um sinal de saída digital PNP ou

NPN e analógico de 0 a 10 V ou de 4 a 20 mA, obtendo assim controle por feed-back (realimentação) [6].

A figura 2.5 representa o diagrama de bloco de uma válvula reguladora de pressão proporcional.



**Figura 2.5 – Diagrama de bloco de uma válvula reguladora de pressão proporcional.**

A figura 2.6 representa as características de vazão das séries da válvula reguladora proporcional de pressão. A diferença entre as séries de válvula está apenas no tamanho da rosca de alimentação, onde a série P3KNA é de 1/2" e a válvula da série P3HPA é de 1/4".

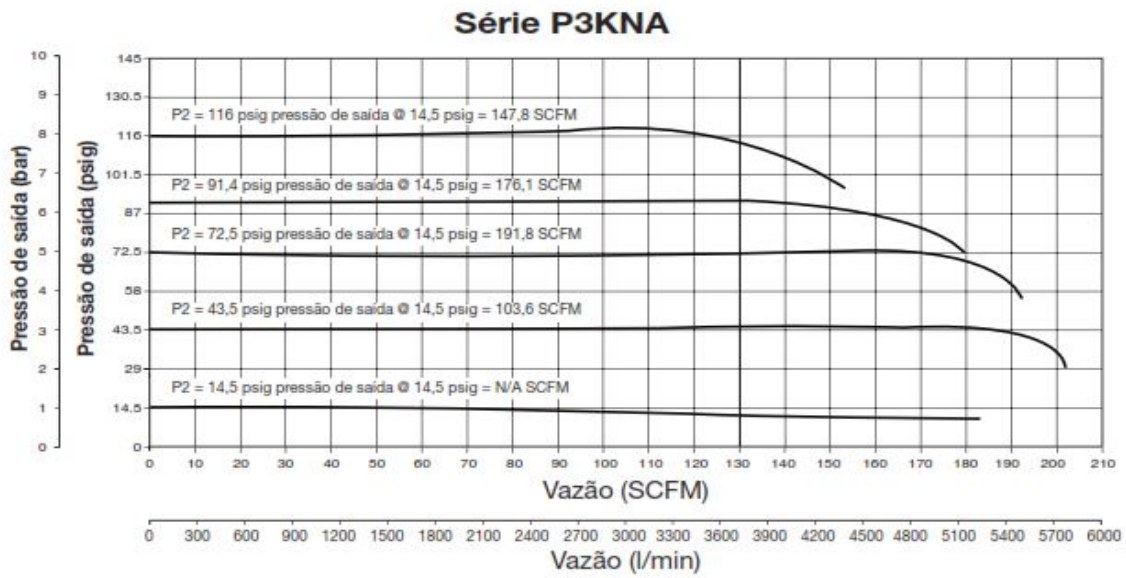


Figura 2.6 – Gráfico vazão x pressão de uma válvula reguladora de pressão proporcional.



Figura 2.7 – Válvula reguladora de pressão proporcional.

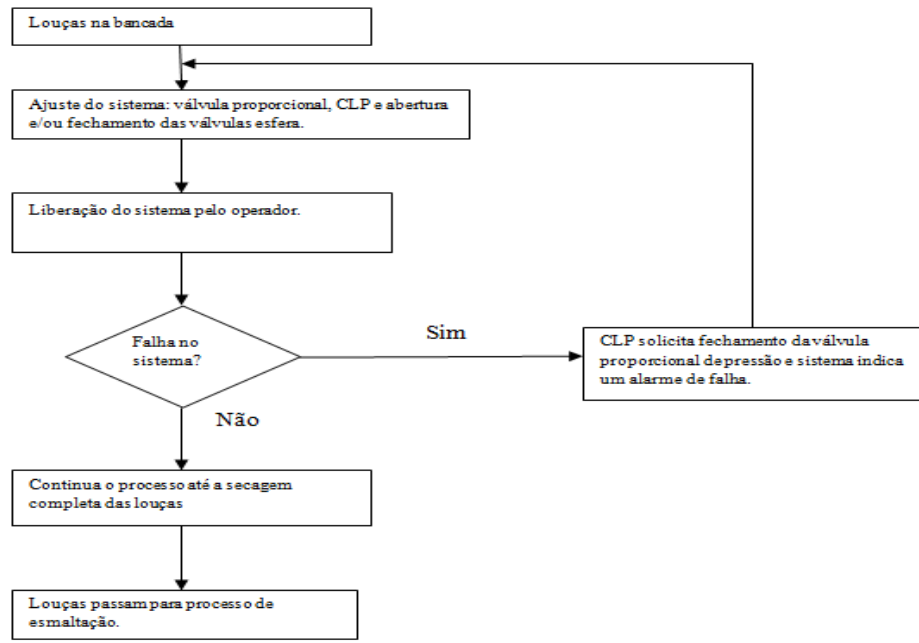
A escolha do equipamento foi confirmada ao avaliar que, na curva característica do equipamento, a pressão de saída já apresenta uma boa estabilidade mesmo sem controle, conforme figura 2.6, e que a válvula reguladora proporcional de pressão, representada na figura 2.7, apresenta como possibilidade uma saída para controle por realimentação.

## **2.5 Fundamentação da especificação**

Após a automação do sistema, o diagrama de blocos do processo de colagem será conforme figura 2.8. Com isso, comprova-se que a figura do operador não será eliminada, conforme receio do mesmo. E que sua tarefa será facilitada, pois nas vezes em que o processo falhar, será soado um alarme acionado pelo controlador. Então ele não terá mais a obrigação de verificar a pressão no manômetro da válvula reguladora mecânica de tempos em tempos.

A escolha do CLP da WEG CLIC02 deve-se pelo fato de já existir o equipamento na indústria onde o teste foi executado. Visto que um dos empecilhos era quanto ao custo da aquisição de materiais, a posse de um dos equipamentos foi um ponto a favor para liberação do teste. Visto que só fez-se necessária a aquisição da válvula reguladora proporcional de pressão. Além disso, os recursos existentes no mesmo bastavam para a aplicação. Pois nele há um bloco PID pronto para uso e entradas e saídas digitais e analógicas suficientes para a aplicação.

Quanto a escolha da válvula reguladora proporcional de pressão deveu-se ao fato de ser ao mesmo tempo atuador e transdutor, pois ele funciona tanto quanto o regulador da pressão quanto como o equipamento que transforma o sinal de entrada de tensão em um sinal de saída de pressão. Além disso, esse equipamento apresenta sinal para realimentação transformando o verdadeiro sinal de saída de pressão em um sinal de realimentação em tensão para que o controlador possa comparar com o sinal de referência.



**Figura 2.8 – Diagrama de blocos do processo de colagem após automação.**

Para a implementação do controle por malha fechada do sistema faz-se necessária a identificação da função de transferência (FT) do sistema e a sintonia para esta FT.

# Capítulo 3

## Proposta de Solução

Como o sistema de colagem não apresenta controle algum sobre a pressão de saída da válvula reguladora de pressão mecânica, de modo que, para obtenção do controle desta variável, com acompanhamento de desajuste dessa pressão e correção automática para o valor de referência, necessita-se de um sistema de controle por malha fechada (pois, com esse controle, o sistema apresenta aumento de precisão, melhora sua dinâmica, torna-o robusto e menos sensível a perturbações externas).

Logo, uma solução vislumbrada para o processo foi obter um controle preciso e estável, no qual a pressão de saída pudesse ser controlada - mesmo em caso de variação da vazão e da pressão de entrada do ar comprimido.

Assim, para a obtenção desse controle, buscou-se um equipamento que permitisse o controle por malha PID, o qual consiste em calcular um valor de atuação das informações da variável do processo atual e do valor desejado (referência). O valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado, garantindo um controle com boa estabilidade e precisão. Em virtude da precisão e da estabilidade, esse tipo de controle é amplamente utilizado nas indústrias.

Basicamente, o PID é composto de três modos de controle: o proporcional (P), o integral (I) e o derivativo (D). No controle proporcional, a correção a ser aplicada no processo deve crescer na proporção em que cresce o erro entre o valor desejado e o valor real. Porém, este tipo de controle apresenta erro em regime. No controle integral, a correção é proporcional ao produto entre o erro e o tempo. Neste tipo de controle os erros pequenos que existem há muito tempo requerem correção mais intensa. Porém, neste tipo de controle, dependendo do ganho  $K_i$ , a resposta pode ser lenta ou até instável. No controle derivativo, a correção é proporcional à taxa de variação do erro. Neste tipo de controle, se o erro estiver variando muito rapidamente, esta taxa de variação deve ser reduzida, de modo a evitar oscilações.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (3.2)$$

A equação acima apresenta a equação do PID, onde  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são os ganhos das parcelas proporcional, integral e derivativo, e esses ganhos representam a intensidade de cada ação de controle.

Considerando  $K_i = K_d = 0$ , teremos o controle proporcional. Neste tipo de controle, aumentando o  $K_p$ , os efeitos dos distúrbios e a sensibilidade à variação de parâmetros são reduzidos. Entretanto, os erros em estado estacionário irão persistir. E em malha fechada, ao aumentar bastante o  $K_p$ , o sistema pode tornar-se instável e pode ocasionar a amplificação de ruídos.

Já para um controlador integral, com  $K_d = K_p = 0$ , os erros em um estado estacionário são reduzidos.

E um controlador derivativo, com  $K_i = K_p = 0$ , permite aumentar o amortecimento e melhorar a estabilidade do sistema.

Portanto, um controle PID envolve os benefícios dos três controles juntos.



A figura 3.1 mostra como é o gráfico de um controlador PID e ganho conforme função (3.2), com  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  diferentes de 0. De acordo com o gráfico, pode-se observar que o sistema apresenta resposta satisfatória, pois não apresenta *overshoot* (pico acima do valor desejado) na saída do controlador e nem apresenta *offset* (erro de regime permanente). Ou seja, com o sistema PID tende a se equilibrar no *setpoint*. Algo bastante desejado para a aplicação deste projeto. Além disso, verifica-se a resposta rápida do sistema.

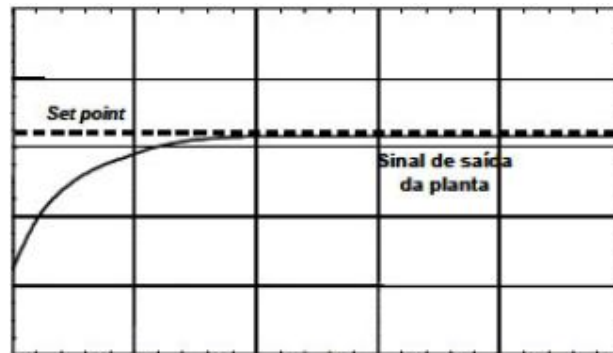


Figura 3.1 - Gráfico de controle PID.

### 3.1 Funcionamento do sistema em malha fechada e seus componentes

O sistema em malha fechada apresenta algumas vantagens em relação à malha aberta, principalmente no que tange à menor sensibilidade a interferências e ruídos. Isso porque, em sendo realimentado o sistema, qualquer desvio seu gera um erro que tende a ser compensado. Além disso, o sistema fica mais independente dos parâmetros da planta, já que ele passa a atuar sobre o sinal de erro.

Para a aplicação sugerida, necessitava-se de um controlador. E, para completar o sistema de malha fechada, foi sugerido um transdutor que apresentasse controle da pressão de entrada e saída para realimentação. Ao procurar no mercado, foi encontrado um equipamento do mesmo fabricante da válvula reguladora de pressão mecânica já utilizada no sistema de colagem. Trata-se da válvula reguladora proporcional de pressão com saída para realimentação. Já detalhado no capítulo 2.4.

### 3.2 Identificação do modelo utilizado

No controlador, os parâmetros do PID devem ser ajustados, visto que a performance da malha de controle está condicionada a seus ajustes. Esse processo de ajuste denomina-se sintonia e há diferentes

caminhos de se ser realizado. Um exemplo é através de análise de comportamento de uma malha e se fazendo o ajuste sucessivas vezes até que se obtenha um funcionamento satisfatório. Outro exemplo é obter um modelo matemático que descreve o processo, e através de alguns parâmetros desse modelo, determina-se o ajuste necessário. A dinâmica de um processo pode ser determinada através da resposta do processo ao pulso, degrau, rampa ou outros sinais determinísticos. Muitas características de processos podem ser verificadas através da resposta em degrau em malha aberta, se essa ocorrer monotonicamente para um outro valor estacionário.

Visto a que o sistema obedece a um sistema de primeira ordem, foi utilizado o segundo método de Ziegler-Nichols para determinação dos parâmetros do controlador PID. Esse método é apresentado como método da resposta ao degrau e propõe-se a determinar os parâmetros de sintonia do controlador PID através de um modelo de primeira ordem a três parâmetros (tabela 3.2).

### 3.3 Identificação da função de transferência do sistema

Um controlador automático compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle. Entretanto, para utilizá-lo, faz-se necessário o conhecimento do modelo da planta de controle de primeira ordem.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{T \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

A resposta ao degrau da função obedecerá a figura 3.2:

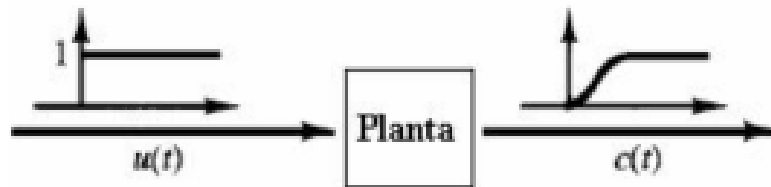


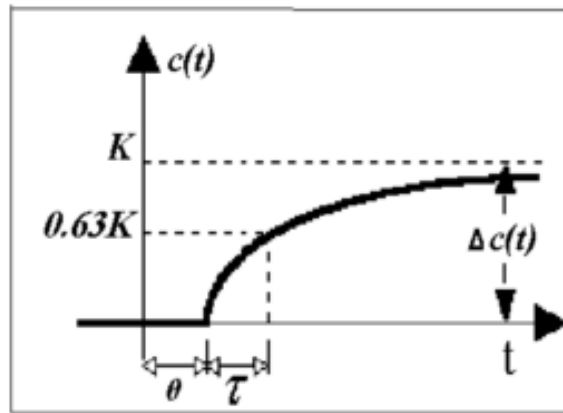
Figura 3.2 – Entrada degrau e resposta do sistema [4].

Para a obtenção dos dados da função de transferência e para verificação da estabilidade do sistema, foram coletados valores reais do sistema em malha aberta, a tensão de entrada, em Volts, e pressão de saída, em psi, quando o sistema é ligado até o atingimento da pressão de estabilidade. adquiridos conforme tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Valores coletados do sistema em execução**

Tempo (s)	Pressão (psi)
0,0267	1,109
0,0587	1,111
0,0856	1,156
0,1159	3,021
0,14535	4,041
0,1748	4,067
0,20425	4,101
0,2337	4,12
0,26315	4,208
0,2926	4,212
0,32205	4,289
0,3515	4,311
0,38095	4,319
0,4104	4,322
0,43985	4,329
0,4693	4,451
0,49875	4,492

A figura 3.3 representa graficamente alguns parâmetros que são necessários para montar a representação dessa função.



**Figura 3.3 – Parâmetros de uma função de transferência de primeira ordem.**

Ganhos do processo (K): expressa quando se altera a variável de saída para cada unidade de variação da variável de entrada.

$$K = \frac{\Delta c(t)}{\Delta u(t)} \quad (3.4)$$

$$K = \frac{Ky}{Ku} = \frac{4,492}{0,31} = 14,48 \left(\frac{psi}{V}\right) \quad (3.5)$$

Onde:

Ku – o valor de entrada degrau.

Ky – o valor do sistema a entrada degrau.

K – ganho do processo.

Atraso ou tempo morto ( $\theta$ ): é o tempo que o processo leva para começar a responder à variação ao degrau.

$$L = \theta = 0,0856 \text{ segundos} \quad (3.6)$$

Constante de tempo (T): é o tempo que o processo demora, uma vez iniciada a variação da entrada, para a saída chegar aos 63% da variação final total. Calculado por interpolação linear, conforme figura 3.4.

```

>> x=[3.577;14.4903];%Valores de pressão mínimo e máximo divididos por 0.31.
>> y=[0.0267;0.49875];%Tempos correspondentes ao mínimo e máximo de pressão.
>> tempo=spline(x,y,9.1289);%Comando para calcular tempo correspondente a 63% de 14.4903
>> tempo

tempo =

    0.2668

```

**Figura 3.4 – Cálculo do valor de T através de interpolação linear em programa computacional**

$$T = 0,2668 - L = 0,2668 - 0,0856 = 0,1812 \text{ segundos} \quad (3.7)$$

Com os parâmetros encontrados, a planta recebe uma função de transferência de primeira ordem conforme a fórmula 8.

$$G(s) = \frac{14,48 \cdot e^{-0,0856 \cdot s}}{0,1812 \cdot s + 1} \quad (3.8)$$

### 3.4 Sintonia do controlador PID para a função de transferência

Existem diversos métodos de ajustes dos parâmetros do PID, associados de alguma forma com os critérios de desempenho. Uma das formas mais utilizadas na prática para sintonia de controladores PID, como forma de ajustar os valores de Kp, Ti e Td, baseadas na resposta experimental ao degrau ou baseado no valor de Kp que resulta em estabilidade marginal, quando só uma ação proporcional de controle é usada, é o primeiro método de Ziegler-Nichols. Esta regra fornece estimativa dos valores e proporciona um ponto de partida na sintonia fina.

O primeiro método obém experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, conforme figura 3.3.

Após a obtenção dos parâmetros da função de transferência de primeira ordem pode-se calcular as constantes do controlador PID através desse método.

**Tabela 3.2 – Tabela de Ziegler e Nichols baseada na resposta ao degrau da planta.**

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
PID	$1,2 \cdot \frac{T}{L}$	2.L	0,5.L

Como  $T = 0,1812$  segundos e  $L = 0,0856$  segundos. Então, os valores dos parâmetros PID obtidos a partir destas constantes estão listados na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Constantes do modelo**

Parâmetro	Valor
<b>Kp</b>	2,54
<b>Ti</b>	0,1712
<b>Td</b>	0,0428

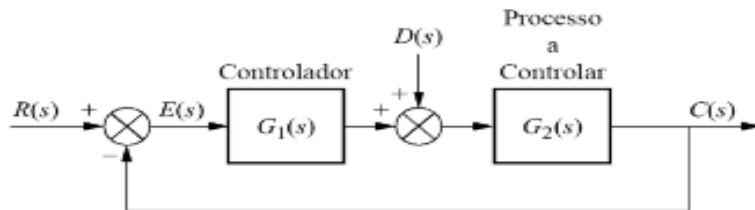
A equação característica do controlador PID é da seguinte forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left( 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right) \quad (3.9)$$

Através dos valores obtidos a equação característica do controlador PID do processo fica:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,54 \left( 1 + \frac{1}{0,1712 \cdot s} + 0,0428 \cdot s \right) \quad (3.10)$$

O diagrama de bloco do processo com o controlador fica conforme figura 3.5:



**Figura 3.5 – Diagrama de bloco do processo com o controlador.**

Pelo diagrama de bloco do processo com o controlador,

$$G1(s) = 2,54 \left( 1 + \frac{1}{0,1712 \cdot s} + 0,0428 \cdot s \right) \quad (3.11)$$

$$G2(s) = \frac{14,48 \cdot e^{-0,0856 \cdot s}}{0,1812 \cdot s + 1} \quad (3.12)$$

# Capítulo 4

## Implementação do Sistema Projetado e Resultados Obtidos

Como forma de obter um controle preciso da pressão de saída do sistema de colagem de louças sanitárias, a proposta foi a substituição de uma válvula reguladora de pressão mecânica por uma válvula reguladora proporcional de pressão. Pois, de acordo com o gráfico da figura 1.6, a pressão de saída não apresenta estabilidade ao processo, enquanto que o gráfico 16 mostra uma melhor estabilidade que o de uma válvula reguladora mecânica. Além disso, a válvula reguladora proporcional de pressão possui saída para realimentação, pois, em caso de a saída estar fora da referência, o CLP pode corrigir através de um bloco PID, de forma que a saída fique sempre estável em 4,5 psi.

### 4.1 Implementação da malha fechada de controle

A tabela 4.1 apresenta as características e configurações da válvula reguladora proporcional de pressão da Parker de código P3KNA14AD2VD1A.

Tabela 4.1 – Características de catálogo da válvula reguladora de pressão proporcional.

<b>P3KNA14AD2VD1A</b>	
<b>Conexão</b>	½" G (BSP)
<b>Faixa de temperatura</b>	0°C a 50 °C
<b>Pressão de entrada</b>	2 a 10 bar
<b>Pressão de utilização</b>	0 a 10 bar
<b>Histerese</b>	1,1% da escala total
<b>Linearidade</b>	< 0,3% da escala total
<b>Tensão de alimentação</b>	24 Vdc
<b>Consumo de energia</b>	1,1W
<b>Sinal de controle</b>	0 a 10 V ou 4 a 20 mA

A tabela 4.2 indica os possíveis parâmetros de utilização do regulador proporcional de pressão.

Tabela 4.2 – Parâmetros de configuração da válvula reguladora de pressão proporcional

<b>Parâmetros</b>	<b>Configuração</b>	<b>Configuração de fábrica</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ação</b>	<b>Resultado</b>
0	3		Tecla verde	Retorna as configurações de fábrica	Configurações padrão
4	0	1	mA	Sinal de controle em corrente	4 - 20 mA
	1		V	Sinal de controle em tensão	0 a 10 V
6	0		NPN ou PNP	Retorno com o sinal de saída digital ou analógico	Saída digital
	1		V		0 a 10 V
	2		mA		4 a 20 mA
14	0	0	bar	Configura a unidade de pressão	Indica pressão em bar
	1		psi		Indica pressão em psi

Portanto, o único parâmetro modificado foi o 6, pois o retorno do sinal analógico de 0 a 10 V foi jogado para o CLP para a comparação com a referência de 4,5 psi.



Como visto no capítulo anterior, o controle PID é uma solução bastante satisfatória para o controle de malha fechada de um sistema e é bastante comum em diversos dispositivos de CLP no mercado, tendo sido verificado que o controlador lógico programável, disponível na indústria na qual a aplicação foi sugerida, possuía um bloco PID pronto, e as quantidades de entradas e saídas eram suficientes, então foi utilizado o CLP da WEG o CLW-02/12HT-D com suas características representadas na tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Características de catálogo do CLP utilizado na aplicação.**

<b>CLW-02/12HT-D</b>	
<b>Alimentação</b>	24 Vdc
<b>Entradas digitais</b>	6
<b>Entradas analógicas</b>	2
<b>Saídas digitais</b>	4
<b>Saídas analógicas</b>	4
<b>Relógio tempo real</b>	Sim
<b>Saída PWM</b>	Sim
<b>Rede de comunicação</b>	Não
<b>LCD/Teclado</b>	Sim
<b>Expansão</b>	Sim

Após a obtenção dos parâmetros do controlador, ( $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ ), através do método Ziegler e Nichols, foi configurado o controlador PID do CLP. Os parâmetros foram inseridos no bloco representado na figura 4.1.

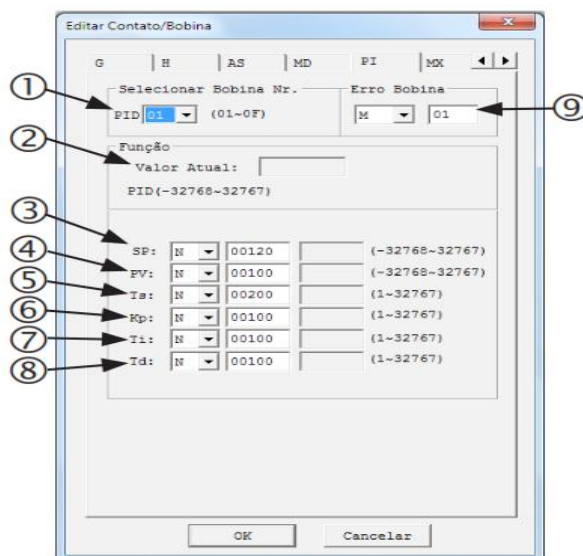


Figura 4.1 – Bloco PID presente no software utilizado na aplicação.

Tabela 4.4 – Descritivo das funções presente no bloco PID do software do CLP utilizado.

Símbolo	Descrição
1	Número da função
2	Valor de atual saída
3	SP - Set Point
4	Pv - Valor atual de processo
5	Ts - Período de amostragem
6	Kp - Ganho proporcional
7	Ti - Tempo integral
8	Td - Tempo derivativo
9	Saída de erro

Onde a fórmula executada pelo controlador é a seguinte:

$$EVn = SV - PVn \quad (4.1)$$

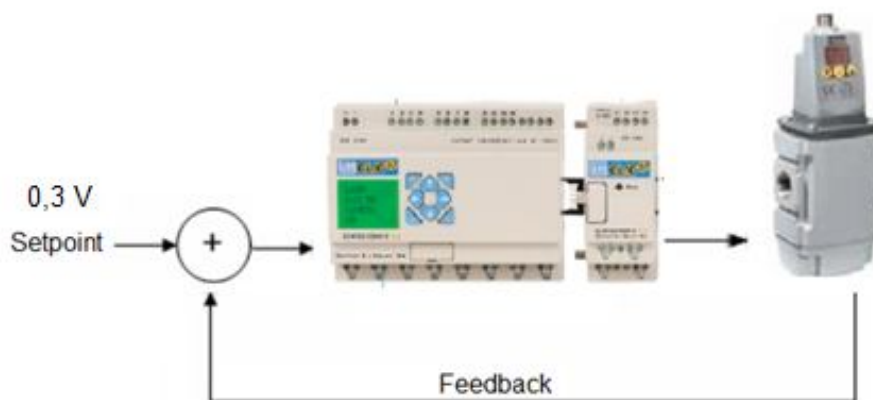
$$\Delta PI = KP \left\{ (EV - EVn - 1) + \frac{TS}{Ti} + EVn + Dn \right\} \quad (4.2)$$

$$Dn = \frac{TD}{TS} (2PVn - 1 - PVn - PVn - 2) \quad (4.3)$$

$$Dn = \frac{TD}{TS} (2PVn - 1 - PVn - PVn - 2) \quad (4.4)$$

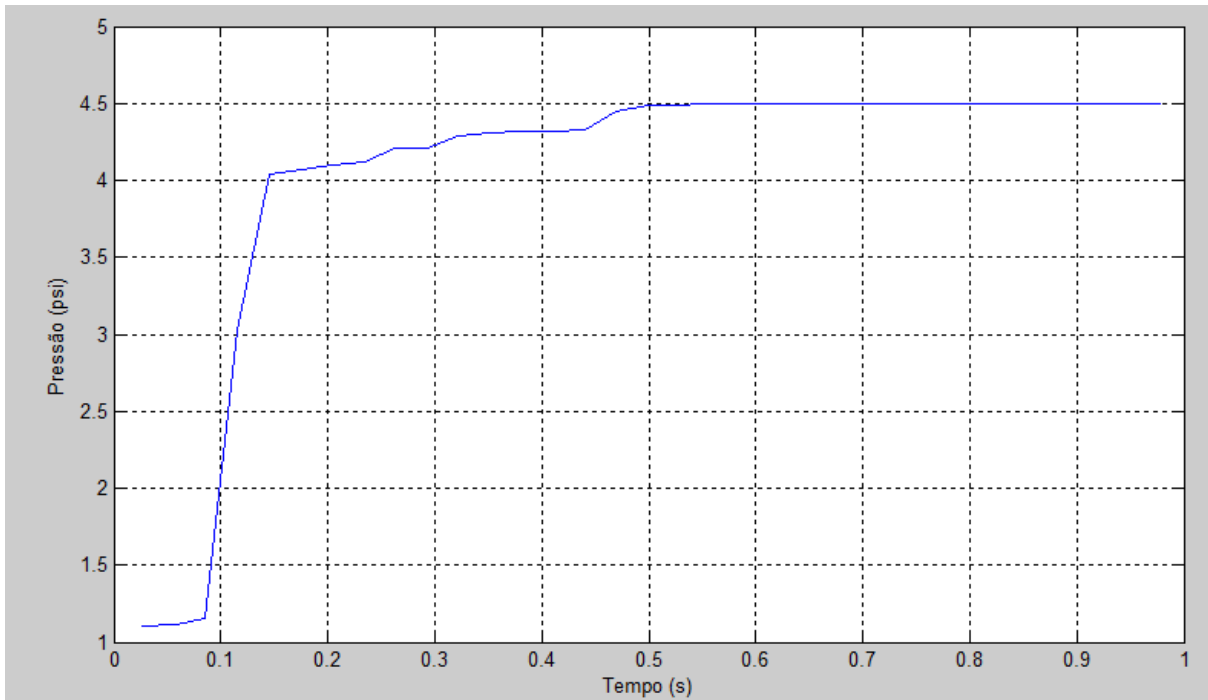
A variável PI01 contém o resultado de saída da fórmula processada, onde 01 é o número da função PID que foi utilizada nesta aplicação.

A figura 4.2 representa a configuração do sistema proposto.



**Figura 4.2 – Esquematização das ligações da aplicação em forma de diagrama de uma malha PID.**

Após a implantação do sistema, foram novamente coletados dados para verificação através de um gráfico, conforme figura 4.3, a fim de comprovar a estabilidade do sistema. E, após a confirmação do sucesso do sistema, era de se esperar uma melhora nos indicadores de produção de louças sanitárias.



**Figura 4.3– Gráfico da resposta do sistema implantado.**

## 4.2 Resultados obtidos

Esta aplicação foi realizada em uma bancada com capacidade para 30 louças. Há nessa indústria 10 bancadas na etapa de colagem. Foram coletados dados de valor médio de faturamento de louças, média da quantidade de louças finalizadas no processo por mês antes e depois da substituição do sistema sem controle. E com isso foi realizada estimativa em caso de substituição de todas as bancadas desta indústria para um sistema automatizado.

Os resultados obtidos na bancada testada após a implantação do sistema automatizado seguem de acordo com as tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e explicações.

**Tabela 4.5 – Quantidade total de louças produzidas mês x quantidade idealizada.**

<b>Louças produzida real/mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
58000	R\$ 55,00	R\$ 3.190.000,00
<b>Capacidade de Louças produzida/mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
61000	R\$ 55,00	R\$ 3.355.000,00
	<b>Perda/mês</b>	<b>R\$ 165.000,00</b>

Ou seja, está ocorrendo perda de faturamento na ordem de R\$165.000,00 todos os meses. O que acarreta perda de faturamento na ordem de R\$1.980.000,00 todos os anos. Esse é o valor que poderia estar no balanço anual da fábrica com a aplicação de um simples controle preciso no processo de colagem.

Após a automação do processo de colagem em uma bancada, o aumento do número de louças finalizadas na etapa de colagem elevou a valores próximos do ideal.

**Tabela 4.6 – Quantidade de louças produzidas por mês na bancada testada antes da aplicação x quantidade de louças produzidas após a automação desta bancada.**

<b>Louças produzida antes/mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
5800	R\$ 55,00	R\$ 319.000,00
<b>Louças produzida após automação/mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
6040	R\$ 55,00	R\$ 332.200,00
	<b>Ganho mês</b>	<b>R\$ 13.200,00</b>

Fazendo uma simulação para a automação do processo de colagem para todas as bancadas, o comparativo ficaria conforme tabela 4.7:

**Tabela 4.7 – Simulação comparativa de faturamento entre a quantidade de louças produzidas por mês nas bancadas antes da automação e caso as bancadas fossem todas automatizadas e oferecessem o mesmo resultado da bancada testada.**

<b>Louças produzida /mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
58000	R\$ 55,00	R\$ 3.190.000,00
<b>Louças produzida bancadas automatizadas/mês</b>	<b>Custo médio cada louça</b>	<b>Faturamento final</b>
60400	R\$ 55,00	R\$ 3.322.000,00
	<b>Ganho mês</b>	<b>R\$ 132.000,00</b>

Ou seja, caso o desempenho nas 10 bancadas fosse o mesmo após a automatização do processo de colagem, o ganho mensal de faturamento dessa empresa seria de R\$132.000,00. O que acarretaria ganho anual de R\$1.584.000,00. Ou seja, aumento de 4% na produtividade. E tudo isso com investimento de apenas R\$4000,00 para aquisição dos equipamentos e montagem do sistema.

Além disso, foi verificado que antes o processo apresentava uma falha a cada 4 horas e após a automação do processo, houve uma falha a cada 192h. Ou seja, houve uma melhora significativa na confiabilidade.

E, num mercado tão competitivo como o de louças sanitárias, ganhos como esses não podem e nem devem ser ignorados.

# Capítulo 5

## Conclusão

A automação é de extrema importância para a indústria, pois ela tem a função de dar mais precisão aos sistemas, prover reduções de perdas, dar mais confiança aos processos industriais, aumentar velocidade de produção, reduzir acidentes e, como consequência, ganho de faturamento. Neste trabalho, foi verificado justamente ganho de faturamento devido à substituição de uma etapa onde não havia controle, por um processo mais confiável e que apresenta um controle estável e ajuste rápido e preciso. O aumento no número de produtividade foi de aproximadamente 4%, pois antes da automação, na bancada de colagem onde o teste foi realizado, eram produzidas 5800 louças em média e após a automação da bancada, 6040 louças passaram a ser produzidas em média. Além disso, com a válvula mecânica, em média uma vez a cada 4 horas ocorria falha no processo devido a desajuste da pressão por fatores externos. Com o processo automatizado, a falha devido a desajuste passou a ocorrer uma vez a cada 192 horas. Ou seja, aumentou bastante a confiabilidade do sistema.

Nem sempre são necessários muitos recursos para se investir em automação. Neste caso, com um investimento baixo, a empresa conseguirá lucrar consideravelmente. Basta enxergar as oportunidades onde ainda não há um processo automatizado para se estudar a possibilidade de substituir esses processos. Caso a automação dos processos ainda não automatizados acarrete algum resultado como: redução de desperdício, aumento de produtividade, redução e/ou eliminação de acidentes, redução de custo de produção já deve ser estudada a possibilidade de automatização deste processo.

## **5.1 Trabalhos Futuros**

Como proposta para um trabalho futuro seria o de substituir as válvulas esfera, que são manuais, por válvulas solenóide e sensores para abertura e fechamento dessas válvulas. Pois um dos fatores para o desajuste da pressão de saída é quando as válvulas esfera estão abertas ou fechadas indevidamente. Quando há bancada no processo de colagem, a válvula deve estar aberta, e quando não há, a válvula deve estar fechada. Ou seja, algumas louças não chegam ao final em virtude de elas estarem na bancada, mas a válvula esfera estar fechada. E há casos em que não há louças na bancada e a válvula estar aberta, o que acarreta despressurização na linha e conseqüentemente demora nesta etapa, pois a pressão tende a ir para um valor menor do que o valor ideal. Portanto, a tendência é de ocorrer um aumento no número de louças que chegariam ao final do processo de colagem.



## Referências

- [1] BROTZ, F. J. ; CINO, Francisco; **Tecnologias Modernas para a Produção de Louça Sanitária**. Jundiaí, SP: 1996.
- [2] LERIN, José; **Tecnologia Pneumática Industrial**. Jacareí, SP: Parker Hannifin LTDA, 2002.
- [3] COELHO, José Mário; **Relatório Técnico Cadeia de Louças – Perfil de Louças Sanitárias e de Mesa**. Brasília: J. Mendo Consultoria, 2009.
- [4] OGATA, Katsuhiko; **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2003.
- [5] PARKER HANNIFIN. **Catálogo de Moduflex Proportional Regulator**. Disponível em [http://www.autprzemyslowa.pl/pdf/pneumatyka/przygotowanie\\_podzespoly\\_proporcjonalne\\_Parker\\_Global.pdf](http://www.autprzemyslowa.pl/pdf/pneumatyka/przygotowanie_podzespoly_proporcjonalne_Parker_Global.pdf)
- [6] WEG. **“Micro Controlador Programável CLIC-02”**. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-rele-programavel-clic-02-3rd-manual-portugues-br.pdf>