

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

ALAN DANILO MARTINS BRAGA

**CONTROLE DA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE NITRETAÇÃO POR
PLASMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2014

ALAN DANILO MARTINS BRAGA

CONTROLE DA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE NITRETAÇÃO POR PLASMA

Trabalho de conclusão de curso de especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel

CURITIBA
2014

AGRADECIMENTOS

Reverencio o Professor Dr. Sergio Leandro Stebel por sua dedicação e orientação deste trabalho.

Reverencio o Professor MSc. Guilherme Alceu Schneider por ter me inspirado ainda no curso de graduação a trabalhar com automação industrial.

Agradeço aos Professores Dr. Carlos Raimundo Erig de Lima e Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabaspor por fazerem parte da banca examinadora, pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Agradeço a meu irmão Jean Carlos Martins Braga e a seus sócios Adriano Moreno e Wilstermar de Moura Martins por me deixarem conduzir este trabalho em sua empresa.

Agradeço minha família que sempre me apoiou na busca pelo conhecimento.

RESUMO

BRAGA, Alan Danilo M.. **Controle da Pressão em um Sistema de Nitretação por Plasma**. 2014. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Este trabalho apresenta uma solução para controlar a pressão em um sistema de nitretação por plasma. O controle é realizado através de uma válvula conectada entre a câmara e a bomba geradora de vácuo. A válvula manual existente na máquina foi adaptada para realizar o papel de elemento final de controle, para isso, foi empregado um motor de passo comandado por um sistema eletrônico de posicionamento. Foi empregado um controlador universal para o sistema de controle, a sintonia deste controlador foi realizada com base no método CHR. O desenvolvimento mecânico de adaptação da válvula, o desenvolvimento eletrônico do circuito posicionador, a identificação da função de transferência, a sintonia do controlador e os resultados obtidos são apresentados.

Palavras chave: Nitretação, Plasma, Controle de Pressão.

ABSTRACT

BRAGA, Alan Danilo M.. **Pressure Control in a Plasma Nitriding system**: 2014. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This work presents a solution to pressure control in a plasma nitriding system. The control is made by a valve between the chamber and a vacuum pump, the original valve was improved to become automatic, in addition, an electronic circuit was designed, the transfer function was identified and the PID controller was tuned by the CHR method. The mechanical adaptation, the electronic design of the circuit to control the position of the valve and the PID tuning is presented.

Keywords: Plasma, Nitriding, Pressure Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Planta de um reator de nitretação por plasma,.....	12
Figura 2: (A) Sistema de controle em malha aberta; (B) Sistema de controle em malha fechada,	18
Figura 3: Esquemático de controle de um vaso de pressão,	19
Figura 4: Teste para obter a modelagem dinâmica do sistema,	20
Figura 5: Diagrama em Blocos de uma Malha de controle realimentada,.....	21
Figura 6: Ação de controle proporcional.	23
Figura 7: Ação proporcional,.....	23
Figura 8: Ação proporcional e integral,	25
Figura 9: Ação proporcional e derivativa,	26
Figura 10: (A) - Estrutura do PID paralelo clássico; (B) - Estrutura do PID paralelo alternativo,	27
Figura 11: Sistema de nitretação a gás,	30
Figura 12: (A) Malha aberta, (B) Malha fechada.	32
Figura 13: Válvula manual.	33
Figura 14: Válvula com posicionamento elétrico.	34
Figura 15: Projeto da válvula com posicionamento elétrico.	34
Figura 16: Esquema de posicionamento da válvula.	35
Figura 17: Posicionador.	36
Figura 18: Diagrama em blocos do posicionador.	36
Figura 19: Circuito do condicionador do sinal de entrada.	37
Figura 20: Circuito de entrada analógica.	38
Figura 21: Circuito condicionador de saídas digitais.	39
Figura 22: Fluxograma de posicionamento da válvula.....	39
Figura 23: Diagrama elétrico da integração da válvula com o controle.	40

Figura 24: Esquema elétrico do controlador Novus,	41
Figura 25: Conectores da placa posicionador.....	41
Figura 26: Comando do acionamento do motor de passo,	42
Figura 27: Acionamento do motor de passo,	42
Figura 28: Esquema dos fios do motor de passo,	43
Figura 29: Cabo de alimentação do posicionador.....	43
Figura 30: Cabo de controle do posicionador.	44
Figura 31: Cabo de comando.....	45
Figura 32: Cabo de referência.....	46
Figura 33 Potenciômetro: (A) modelo físico; (B) esquema elétrico.....	46
Figura 34: Cabo de leitura.....	47
Figura 35: Transmissor de pressão.	47
Figura 36: Relação entre a PV e a MV.....	49
Figura 37: Relação entre a PV e MV para a faixa de interesse.....	49
Figura 38: Curva de resposta ao degrau positivo (A) e ao degrau negativo (B).....	50
Figura 39: Blocos de simulação das FTs, A - degrau positivo, B – degrau negativo.....	53
Figura 40: Simulação da resposta ao degrau, (A) - degrau positivo, (B)- degrau negativo. ...	53
Figura 41: Simulação do controle P com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.....	55
Figura 42: Controle P com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); degrau negativo.....	56
Figura 43: Simulação do controle PI com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.....	56
Figura 44: Simulação do controle PI com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.....	57
Figura 45: Simulação do controle PID com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); degrau negativo.....	58
Figura 46: Simulação do controlador PID com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.....	58
Figura 47: Simulação do controle PID: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.	59

Figura 48: Controle PI: parâmetros baseados na FT1.	60
Figura 49: Controle PI parâmetros baseados na FT2.	60
Figura 50: Controle PID baseado na FT1.	61
Figura 51: Controle PID Baseado na FT2.	61
Figura 52: PID Ajustado, degrau de 5%.....	62
Figura 53: PID ajustado, degrau de 1%.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegler e Nichols baseada na resposta ao degrau.....	29
Tabela 2: Regra de sintonia CHR, a resposta mais rápida sem sobre valor (problema servo).29	
Tabela 3: Dados de resposta ao degrau positivo.....	51
Tabela 4: Dados de resposta ao degrau negativo.	51
Tabela 5: Dados da função de transferência.	52
Tabela 6: Parâmetros do controlador calculados para a FT1.....	53
Tabela 7: Parâmetros do controlador calculados para a FT2.....	54
Tabela 8: Parâmetros do controlado Novus Calculados com base na FT1.....	54
Tabela 9: Parâmetros do controlador Novus calculados com base na FT2.....	54
Tabela 10: Parâmetros PID.....	59
Tabela 11: Parâmetros PID para o controlador Novus.	59

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CHR	Chien, Hrones e Reswick
FT	Função de Transferência
K	Ganho
<i>K_d</i>	Ganho derivativo
<i>K_i</i>	Ganho integral
<i>K_p</i>	Ganho proporcional
MV	Variável manipulada
P	Proporcional
PD	Proporcional e Derivativo
PI	Proporcional e Integral
PIC	Controlador indicador de pressão
PID	Proporcional Integral Derivativo
PV	Variável Controlada
SP	Ponto de ajuste (“ <i>setpoint</i> ”)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA	12
1.2	DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	13
1.3	PROBLEMA	13
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivo geral	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	JUSTIFICATIVA.....	15
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	16
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1	CONTROLE DE PROCESSOS	17
2.1.1	Controle de pressão	18
2.2	MODELO DO SISTEMA DE CONTROLE	19
2.3	O CONTROLADOR PID	22
2.3.1	A ação proporcional	22
2.3.2	A ação integral.....	24
2.3.3	A ação derivativa	25
2.3.4	Estruturas do controlador PID.....	26
2.4	MÉTODO DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID	28
2.4.1	Método de Ziegler e Nichols	28
2.4.2	Método de Chien, Hornes e Reswick (CHR)	29
2.5	NITRETAÇÃO.....	29
2.5.1	Métodos de nitretação.....	30
2.5.2	Nitretação por plasma	31
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	SISTEMA DE CONTROLE DA PRESSÃO	32
3.2	ADAPTAÇÃO MECÂNICA DA VÁLVULA	33
3.3	SISTEMA DE POSICIONAMENTO DA VÁLVULA.....	35
3.4	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO.....	40
3.4.1	Cabo de alimentação.....	43
3.4.2	Cabo de controle	44
3.4.3	Cabo de comando.....	45
3.4.4	Cabo de referência.....	45

3.4.5	Cabo de leitura.....	46
3.5	SINTONIA DO CONTROLADOR.....	47
3.5.1	Considerações para a sintonia do controlador	48
3.5.2	Comportamento do sistema	48
3.5.3	Curvas de carga.....	50
3.5.4	Função de transferência	51
3.5.5	Simulação da função de transferência	52
3.5.6	Determinação dos parâmetros do controlador	53
3.5.1	Parâmetros para o controlador Novus	54
3.5.2	Simulação do sistema em malha fechada.....	55
3.5.2.1	Simulação do controle P.....	55
3.5.2.2	Simulação do controle PI.....	56
3.5.2.3	Simulação do controle PID	57
3.5.3	Validação da sintonia.....	59
3.5.3.1	Controle PI	60
3.5.3.2	Controlador PID	61
4	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Essa seção apresenta o tema que descreve sucintamente o processo de nitretação por plasma e a importância do controle da pressão; apresenta a delimitação do estudo; o problema, os objetivos a justificativa e a estrutura deste trabalho

1.1 TEMA

Nitretação é o processo que promove a difusão do nitrogênio no aço com o objetivo de obterem-se melhores propriedades superficiais (PYE, 2003).

A nitretação por plasma é uma forma de nitretação em quem o aço é imerso em uma câmara com atmosfera nitretante e uma descarga elétrica é aplicada entre o material que será nitretado e as paredes da câmara. A figura 1 apresenta um sistema de nitretação por plasma.

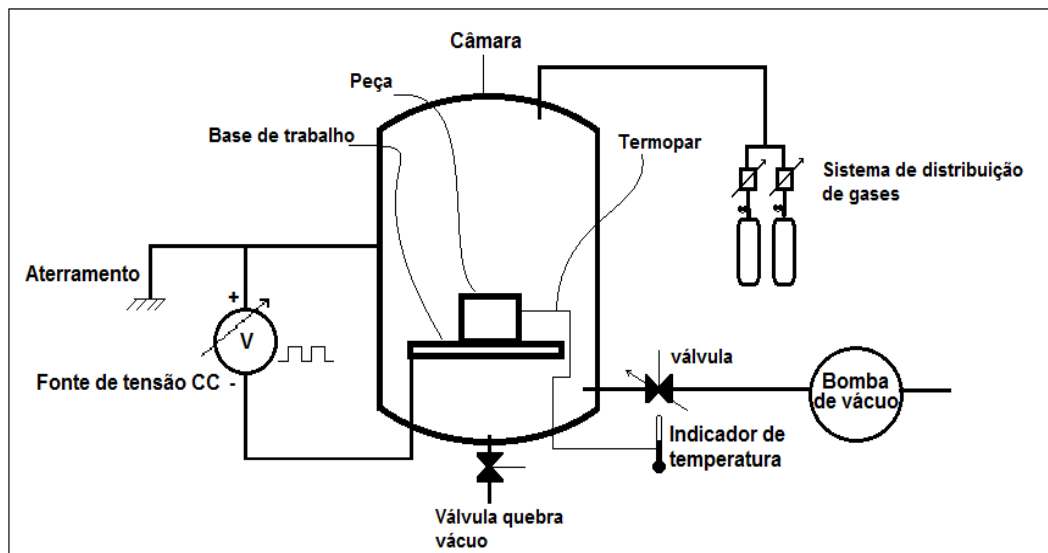


Figura 1: Planta de um reator de nitretação por plasma, Fonte: Adaptado de PYE (2003, p. 89).

O termo “plasma”, também conhecido como descarga luminescente, refere-se a um gás ionizado que contém íons, espécies neutras, elétrons, átomos e moléculas (ALVES JR, 2001).

A eficiência do processo de nitretação por plasma se deve além da taxa teórica de difusão, à interação do plasma com a superfície do aço (CORDEIRO, 2010).

Para gerar o plasma, é necessário o emprego de um potencial elétrico e uma redução da pressão, pois, ao reduzir a pressão, o espaçamento molecular aumenta permitindo maior movimentação entre as espécies (átomos, íons e moléculas) (PYE, 2003).

A pressão é um dos parâmetros de controle mais importantes em um processo de nitretação por plasma. Processos conduzidos com valores de pressão diferentes, resultam em diferenças no perfil da camada nitretada (TECHCOMMENTARY, 1994).

O controle da pressão pode ser realizado através do controle da abertura de uma válvula conectada entre a câmara e a bomba geradora de vácuo (PYE, 2003).

1.2 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este trabalho apresenta uma solução para controlar a pressão de um dos reatores de nitretação por plasma que pertence a uma empresa localizada na região metropolitana de Curitiba - PR.

1.3 PROBLEMA

No equipamento em questão o ajuste da pressão é feito de forma manual, de tempos em tempos o operador verifica se a pressão encontra-se no valor desejado e quando necessário, ele modifica a abertura da válvula conectada entre a câmara e a bomba geradora de vácuo.

Decorridos alguns minutos após o operador ter ajustado a pressão, ela apresenta dificuldade de permanecer no valor desejado, isso ocorre devido a

variações na temperatura do processo e, também, por pequenas oscilações na vazão da bomba geradora de vácuo.

Se o operador não mantiver a pressão dentro dos limites, em torno do valor especificado, a qualidade do processo pode ser afetada.

1.4 OBJETIVOS

Nesta seção apresentam-se os objetivos deste trabalho.

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver o controle da pressão para um reator de nitretação por plasma, eficiente para controlar a pressão na faixa em que ele opera

1.4.2 Objetivos Específicos

- Adaptar uma válvula manual para que possa ser controlada de forma automática utilizando-se de um motor de passo para movimentá-la;
- Desenvolver um circuito eletrônico que tenha a função de posicionar a válvula conforme o sinal recebido do controlador;
- Levantar a função de transferência da malha de pressão do sistema de nitretação por plasma;
- Sintonizar o controlador;
- Simular o sistema de controle;
- Comparar o controle aplicado com o controle simulado.

1.5 JUSTIFICATIVA

A pressão é uma variável importante nos processos de nitretação por plasma. A cargo do operador, as variações na pressão não são corrigidas imediatamente e podem interferir na qualidade do processo.

Automatizando o controle da pressão, pretende-se privar o operador desse papel, tornando-o disponível a outras tarefas.

Uma válvula proporcional para aplicações em vácuo tem um custo elevado, por isso, optou-se por adaptar a válvula manual já existente na máquina.

Foi utilizado um motor de passo para acionar a válvula, pois, esse tipo de motor é encontrado facilmente no mercado, em vários tamanhos e o custo é relativamente baixo.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho visa gerar conhecimento para uma aplicação prática, portanto sua natureza é aplicada (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Para realizar o controle da pressão foi utilizado um controlador (PID) universal.

A válvula manual existente na máquina foi transformada em uma válvula controlada, para isso, foram feitas uma adaptação mecânica e um circuito eletrônico de posicionamento.

A função de transferência da malha de pressão foi identificada utilizando o método de análise da resposta ao degrau, o controlador foi sintonizado utilizando o método CHR.

O controle em malha fechada foi simulado e depois testado na prática. Os resultados foram comparados.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

O objetivo central da revisão de literatura foi dar suporte à identificação da função de transferência e sintonia do controlador PID, tendo como principal fonte o livro Controles típicos dos autores Campos e Teixeira (2006).

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos. A introdução foi feita no capítulo um, no capítulo dois apresenta-se o resumo da revisão literária, no capítulo três é exposto o desenvolvimento que descreve a adaptação mecânica da válvula, o circuito eletrônico de posicionamento, a integração com o controlador, a sintonia do controlador, simulações e validação prática, por fim, as conclusões são dadas no capítulo quatro.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesse capítulo apresenta-se uma pesquisa bibliográfica sobre controle, obtenção da função de transferência por resposta ao degrau, controlador PID, métodos de sintonia de controladores e nitretação por plasma.

2.1 CONTROLE DE PROCESSOS

Controle de processo é o nome dado a sistemas responsáveis por manter as variáveis de um processo industrial dentro dos limites operacionais (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

O controle pode ser em malha aberta ou em malha fechada. O controle em malha aberta é baseado em uma curva de calibração relacional, por exemplo, a relação entre a abertura de uma válvula e a vazão em uma tubulação. (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A desvantagem do controle em malha aberta é que as perturbações que ocorrem no sistema influenciam a curva de calibração e conseqüentemente; a variável do processo. Para manter a variável no ponto de operação desejado, é necessária a intervenção periódica de um operador (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

No controle em malha fechada o operador apenas informa ao sistema o valor desejado e o sistema de controle atua sozinho para manter a variável dentro do ponto de operação desejado (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

O controle em malha fechada necessita que a saída seja monitorada, ou seja, o valor da variável do processo deve ser medido por um sensor e comparado com o valor desejado, a partir da diferença entre esses dois valores o controlador deverá atuar para que essa diferença, ou erro, diminua (OGATA, 2010).

A figura 2 apresenta respectivamente sistemas de controle em malha aberta (A) e em malha fechada (B).

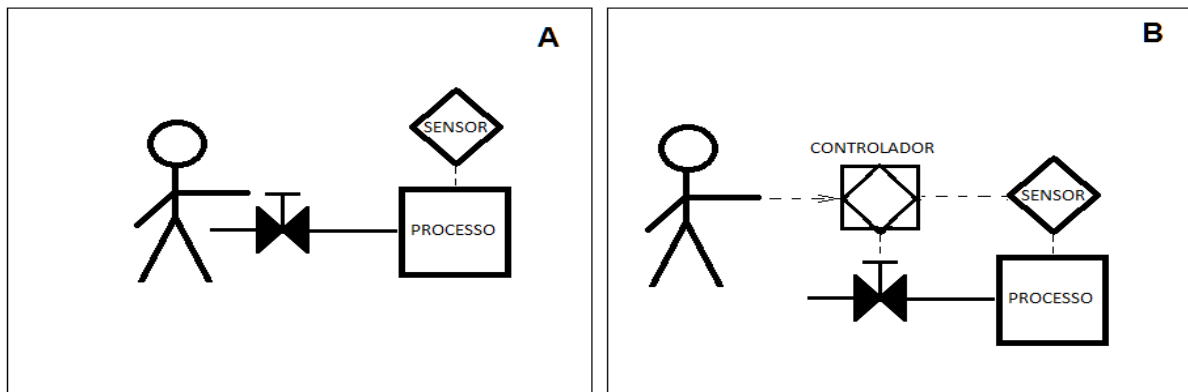


Figura 2: (A) Sistema de controle em malha aberta; (B) Sistema de controle em malha fechada, Fonte: Adaptado de CAMPOS e TEIXEIRA (2006, p. 4, P.6).

Os problemas de controle em malha fechada são classificados normalmente em controle do tipo servo ou regulatório (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

Controle do tipo servo é aplicado a processos cujo ponto de ajuste costuma ser alterado frequentemente, portanto, a ação de controle deve ser eficiente para levar a variável do processo ao novo valor toda vez que o ponto de ajuste for alterado (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

Controle do tipo regulatório é aplicado a processos cujo valor desejado não costuma ser alterado frequentemente, portanto, a ação de controle deve ser eficiente para manter a variável dentro do ponto de ajuste em regime estacionário (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

Ambos os tipos de controle, servo e regulatório, devem ser eficazes para manter a variável dentro dos limites operacionais (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

2.1.1 Controle de pressão

O controle da pressão é responsável pelo balanço de massa, geralmente aplicado a gases. Manter a pressão em um recipiente significa igualar o fluxo de entrada com o fluxo de saída. Controlar a pressão é importante para controlar a quantidade de material estocado e também, porque em muitos processos, a pressão é um parâmetro que influencia na qualidade do produto final (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

A figura 3 apresenta uma malha de controle de pressão, o sistema apresentado baseia-se no princípio do balanço de massas (CAMPOS, TEIXEIRA, 2006).

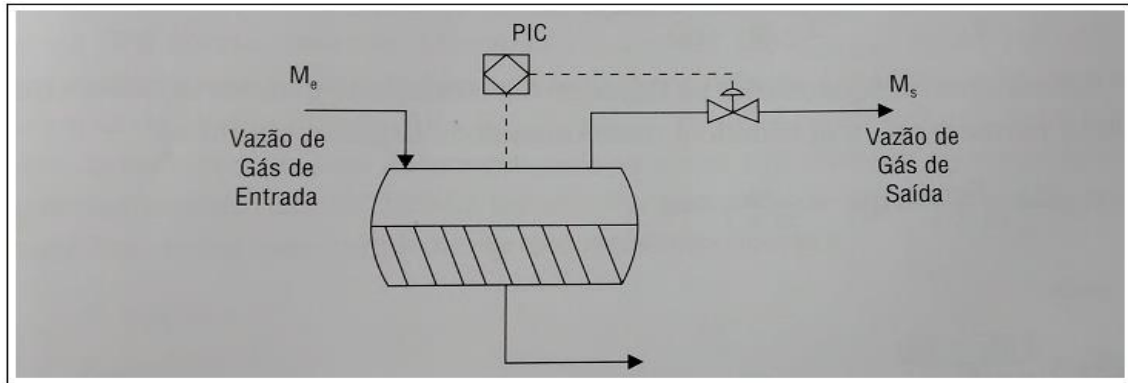


Figura 3: Esquemático de controle de um vaso de pressão,
Fonte: CAMPOS e TEIXEIRA (2006, p. 135).

Nota-se ao analisar a figura 3 que há uma vazão de gás na entrada e uma vazão na saída e que na tubulação de saída há uma válvula que está sendo controlada pelo PIC portanto o controle da pressão neste recipiente é feito através da vazão de saída.

2.2 MODELO DO SISTEMA DE CONTROLE

Segundo Ogata (2010 p.145) “O primeiro passo para a análise de um sistema de controle é a obtenção de um modelo matemático do sistema”.

De acordo com Campos e Teixeira (2006, p. 12) “o passo mais importante para o projeto de um sistema de controle é a obtenção da dinâmica do processo”.

A função que caracteriza as relações entre a entrada e a saída do sistema é chamada de função de transferência (OGATA, 2010). A função de transferência pode ser obtida aplicando-se a transformada de Laplace à equação diferencial que caracteriza o sistema, ou pode ser obtida a partir de dados experimentais utilizando alguns métodos, dentre eles a curva de resposta em malha aberta (STEBEL, 2013).

Para obter a curva de resposta em malha aberta, provoca-se uma variação conhecida na entrada do sistema e acompanha a evolução da variável de saída, o modelo do sistema é obtido a partir de análise desta evolução (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A figura 4 mostra um exemplo da curva de resposta a uma variação em degrau na entrada de um sistema, onde, $T(t)$ é a variação da saída em relação ao tempo e $U(t)$ é o degrau dado na entrada (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

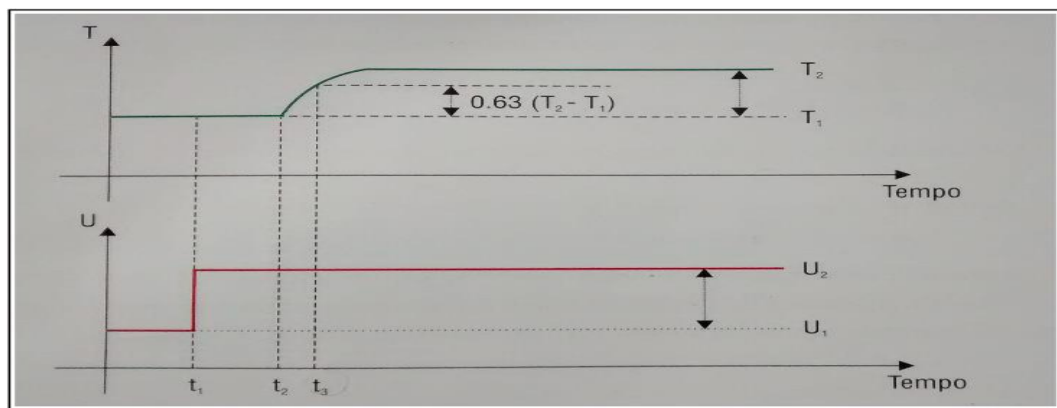


Figura 4: Teste para obter a modelagem dinâmica do sistema,
Fonte: CAMPOS e TEIXEIRA (2006, p. 19).

A partir da análise gráfica é possível levantar a função de transferência do sistema.

O Ganho (K) é a relação entre a variação da variável controlada (PV) e a variação da variável manipulada (MV). A constante de tempo é o tempo decorrido entre o momento em que a PV começa a variar até que ela alcance 63% da variação total. O tempo morto é o tempo entre o momento que foi provocado o degrau na MV até o momento em que a PV começa a variar (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

Um dos métodos para identificar a constante de tempo (T) e o tempo morto (L) é identificar os tempos em que a PV leva para alcançar 28,3% e 63,2% da variação final, depois de ocorrido o degrau e então resolver o sistema de equações composto pelas equações (1) e (2) (STEBEL, 2013).

A função de transferência que caracterizará a planta, ou processo, será expressa pela equação (3), essa equação é utilizada para caracterizar sistemas de primeira ordem (STEBEL, 2013).

$$T(28,3\%) = L + \frac{T}{3} \quad (1)$$

$$T(63,2\%) = L + T \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{TS + 1} \quad (3)$$

Os sistemas de controle costumam ser representados em diagrama de blocos, conforme apresentado na figura 5, onde $G_p(s)$ é a função de transferência da planta e $G_c(s)$ é a função que caracteriza o controlador (SANTOS et al., 2011).

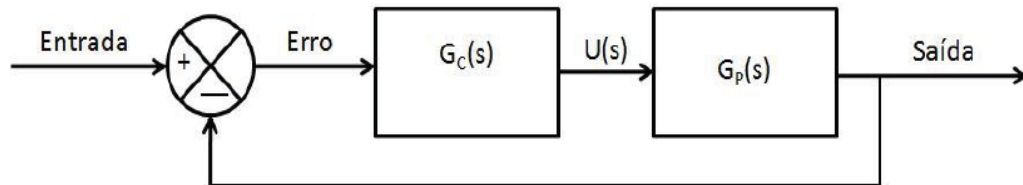


Figura 5: Diagrama em Blocos de uma Malha de controle realimentada, Fonte: Santos et al. (2011).

A figura 5 apresentou um sistema de controle em malha fechada, a leitura destes blocos pode ser escrita da seguinte maneira: A diferença entre a entrada e a saída gera um sinal de erro que é multiplicado pela função do controlador, o resultado implica em um sinal de controle que é multiplicado pela função da planta que gera um resultado ou saída que continuamente é comparada com a entrada e o processo se repete com a tendência de que o erro se aproxime de zero.

2.3 O CONTROLADOR PID

O controlador mais utilizado nas indústrias é o controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo, denominado pela sigla PID (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A equação (4) relaciona a saída do controlador $u(t)$ com o erro $e(t)$ ela apresenta a equação mais usual encontrada nos controladores PID (NOVUS, 2014).

$$u(t) = K_p \cdot [e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \frac{De}{Dt}] \quad (4)$$

Como o nome sugere o controlador PID pode ser entendido como a união de três tipos de ações de controle: A ação proporcional que gera na saída do controlador um sinal proporcional ao erro, a ação integral, que gera na saída do controlador um sinal proporcional à integral do erro e a ação derivativa que gera na saída do controlador um sinal proporcional a derivada do erro (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

2.3.1 A ação proporcional

A equação (5) representa um controlador puramente proporcional, a relação entre a saída do controlador e o erro é mostrada na figura 6 onde o ganho proporcional é dado pela inclinação da reta (FACCIN, 2004).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + u \quad (5)$$

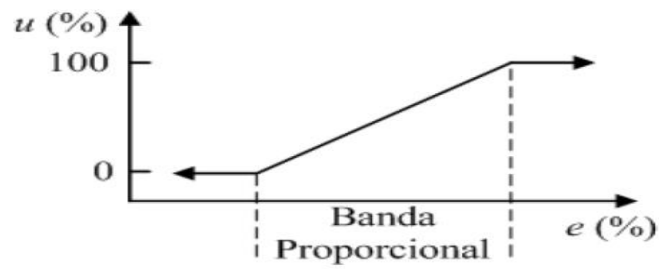


Figura 6: Ação de controle proporcional.
Fonte: Faccin, 2004.

A figura 7 apresenta a ação do controlador proporcional em resposta a um degrau (CAMPOS; TEXERA, 2006).

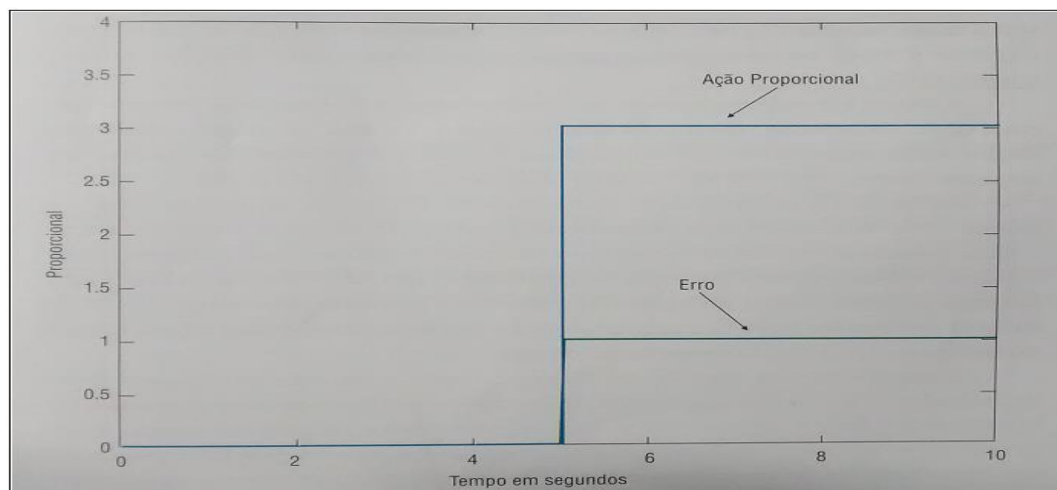


Figura 7: Ação proporcional,
Fonte: Campos e Teixeira, p. 25, 2006.

A desvantagem de um controlador puramente proporcional é que ele apresenta erro em regime permanente, o erro pode ser minimizado com o aumento do ganho, contudo, o processo torna-se mais instável (FACCIN, 2004).

Em alguns controladores, em vez do ganho, costuma-se utilizar a banda proporcional como parâmetro, a relação entre ambos é dada pela equação (6) (FACCIN, 2004).

$$B_p = \frac{100}{K_p} \quad (6)$$

2.3.2 A ação integral

A ação integral sempre será utilizada em conjunto com a ação proporcional (NOVUS, 2014).

O objetivo da ação integral é eliminar o erro em regime permanente, além disso, ao aumentar o ganho integral o sistema fica mais rápido, contudo tende a ficar mais oscilante e apresentar sobre sinal (NOVUS, 2014).

A saída do controlador PI é proporcional ao erro e proporcional a integral do erro. A equação (7) representa um controlador PI paralelo clássico (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \cdot u \quad (7)$$

O termo $1/T_i$ é conhecido como ganho integral do controlador dado em repetições por segundo (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

Dependendo do fabricante do controlador, o parâmetro de ajuste referente à ação integral pode ser o tempo integral (em minutos por repetição), ou o inverso ($1/T_i$) (dado em repetições por minutos) (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A figura 8 apresenta a ação do controlado PI em resposta a um erro em degrau, como no exemplo o erro é constante a parcela referente ao termo integral causa na saída do controlador uma rampa crescente (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

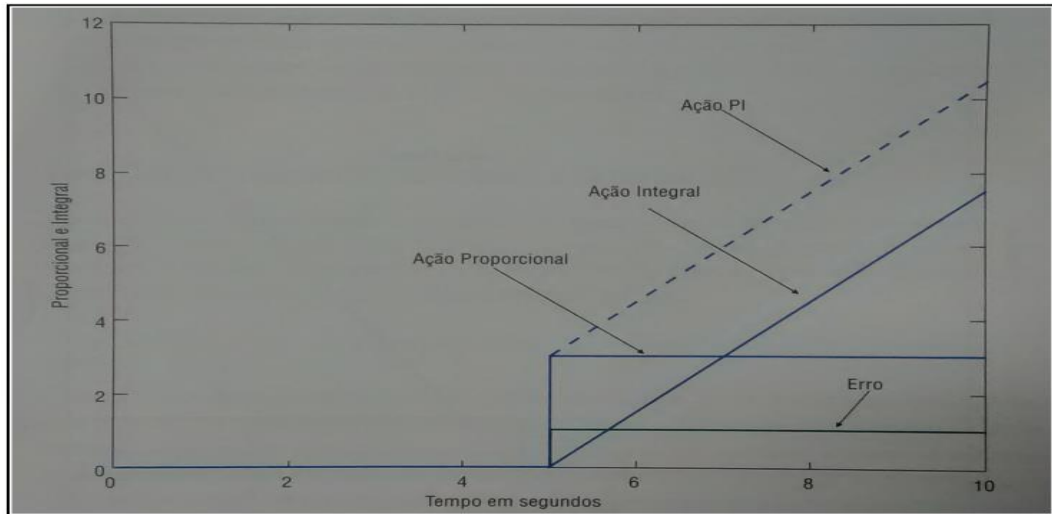


Figura 8: Ação proporcional e integral,
Fonte: Campos e Teixeira, p. 25, 2006.

Nota-se observando o gráfico da figura 8 que a ação proporcional é somada à ação integral para compor o controlador PI.

2.3.3 A ação derivativa

Segundo Campos e Teixeira (2006, p. 26) “O fator multiplicativo (T_d) é conhecido como o tempo derivativo do controlador”.

A figura 9 apresenta a ação do controlador PD em resposta a um erro em rampa. Nota-se que a ação derivativa é uma constante equivalente a tangente da reta descrita pela variação do erro. No controlador PD a ação derivativa é somada à ação proporcional (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

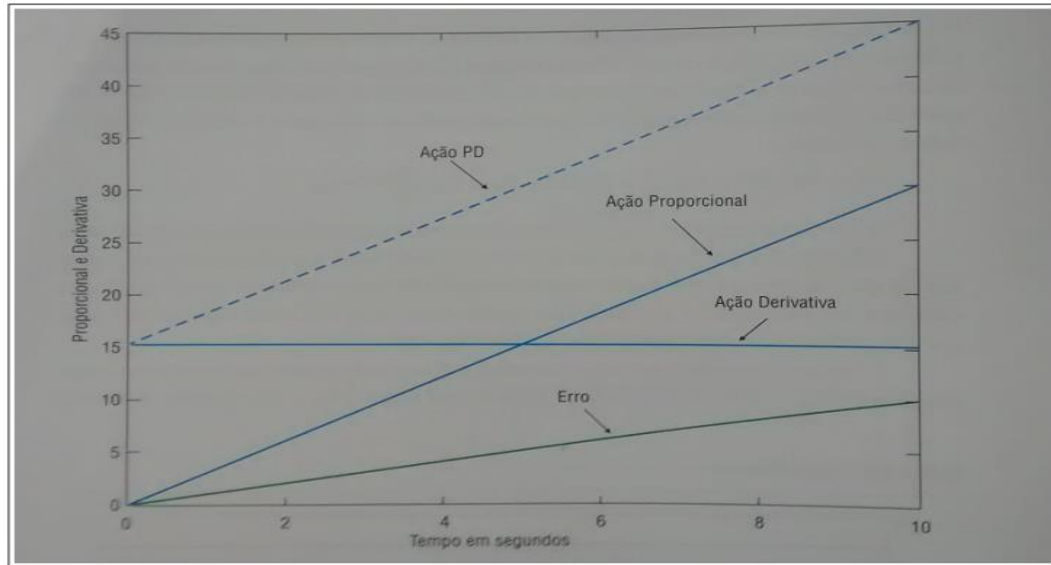


Figura 9: Ação proporcional e derivativa,
Fonte: Campos e Teixeira, p. 28, 2006.

2.3.4 Estruturas do controlador PID

Os controladores PID podem ser estruturados de diferentes maneiras, o arranjo do controlador de um fabricante pode diferir-se de outro fabricante, com isso, ao replicar os parâmetros de um controlador para outro, pode-se obter uma dinâmica de resposta diferente da esperada. As equações dos diferentes arranjos do PID são bastante similares o que muda normalmente é a forma com que os ganhos são multiplicados pelos termos proporcional, integral, e derivativo e como esses três termos interagem para compor a saída do controlador em resposta ao erro (IWASSE, 2009).

Alguns arranjos comuns do PID são; PID paralelo clássico, paralelo alternativo, PID série ou interativo (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A equação (4) mostrou a estrutura de um PID paralelo clássico, nesse tipo de arranjo o ganho proporcional K_p afeta o termo integral e o termo derivativo. A equação (8) descreve a estrutura de um PID paralelo alternativo, nesse tipo arranjo o ganho proporcional não afeta os demais termos (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t)dt + T_d \cdot \frac{De}{Dt} \quad (8)$$

A figura 10 apresenta respectivamente a estrutura de um PID paralelo clássico (A) e um PID paralelo alternativo (B).

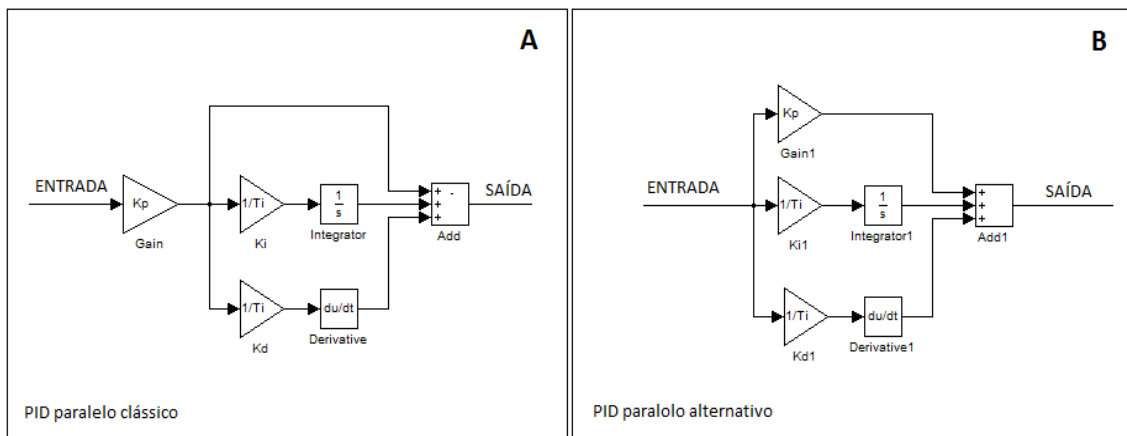


Figura 10: (A) - Estrutura do PID paralelo clássico; (B) - Estrutura do PID paralelo alternativo, Fonte: Autoria própria.

2.4 MÉTODO DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID

Existem diferentes métodos para sintonizar um controlador PID, dentre eles, destacam-se o método do lugar das raízes, o método da resposta em frequência, e os métodos práticos baseados na curva de resposta ao degrau como o método de Ziegler e Nichols, de Chien, Hrones e Reswick (OGATA, 2010)

2.4.1 Método de Ziegler e Nichols

O primeiro trabalho a propor um método relativamente simples para sintonizar um controlador PID foi realizado por Ziegler e Nichols (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

Eles propuseram duas regras de sintonia, uma delas baseada nas características do sistema em malha fechada que consiste em aumentar o ganho proporcional do controlador até que a resposta oscile com amplitude constante e então determinar o ganho último (K_u) e o período de oscilação (P_u). Em posse destes dados, calculam-se os parâmetros do controlador conforme as equações propostas por eles (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

O problema em fazer com que um processo industrial oscile, podendo oferecer riscos à segurança, não faz do método em malha fechada muito popular (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A outra regra baseia-se na resposta ao degrau em malha aberta, consiste em identificar o tempo morto e a constante de tempo do sistema, os parâmetros do controlador são calculados com as equações apresentadas na tabela 1 (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegler e Nichols baseada na resposta ao degrau.

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0,9T/L	L/0,3	0
PID	1,2T/L	2L	0,5L

Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

2.4.2 Método de Chien, Hornes e Reswick (CHR)

No método CHR são propostos dois critérios de desempenho: A resposta mais rápida possível sem sobrevalor e a resposta mais rápida possível com 20% de sobrevalor, baseado nestes critérios são propostas sintonias tanto para problema do tipo servo quanto para problema regulatório (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

A tabela 2 apresenta os cálculos dos parâmetros do controlador propostos para o critério de desempenho “a resposta mais rápida sem sobrevalor” para problema servo.

Tabela 2: Regra de sintonia CHR, a resposta mais rápida sem sobre valor (problema servo).

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0,9T/L	L/0,3	0
PID	1,2T/L	2L	0,5L

Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

2.5 NITRETAÇÃO

A nitretação é um processo termoquímico utilizado, amplamente em aços e ferros fundidos, para difundir nitrogênio nos materiais a partir de suas superfícies, tendo como principal objetivo a obtenção de dureza superficial (PYE, 2003).

Esse processo começou a ser investigado no início do século XX por Adolph Machlet em Elizabeth, NJ. Através de experimentos, Machlet descobriu que o nitrogênio é solúvel no ferro e que a difusão deste produziu um aumento na dureza superficial em aços de baixa liga, além de uma melhoria significativa na resistência a corrosão (PYE, 2003).

Apesar de Machlet ter sido o pioneiro na nitretação, esse processo ficou mais conhecido com o posterior trabalho realizado na Alemanha por Adolph Fry. (PYE, 2003).

2.5.1 Métodos de nitretação

O primeiro método de nitretação, patenteado por Machlet em 1913, chamado de nitretação a gás, foi realizado em uma fornalha como a mostrada esquematicamente na figura 11. O nitrogênio era obtido pela dissociação da amônia com o aumento da temperatura (PYE, 2003).

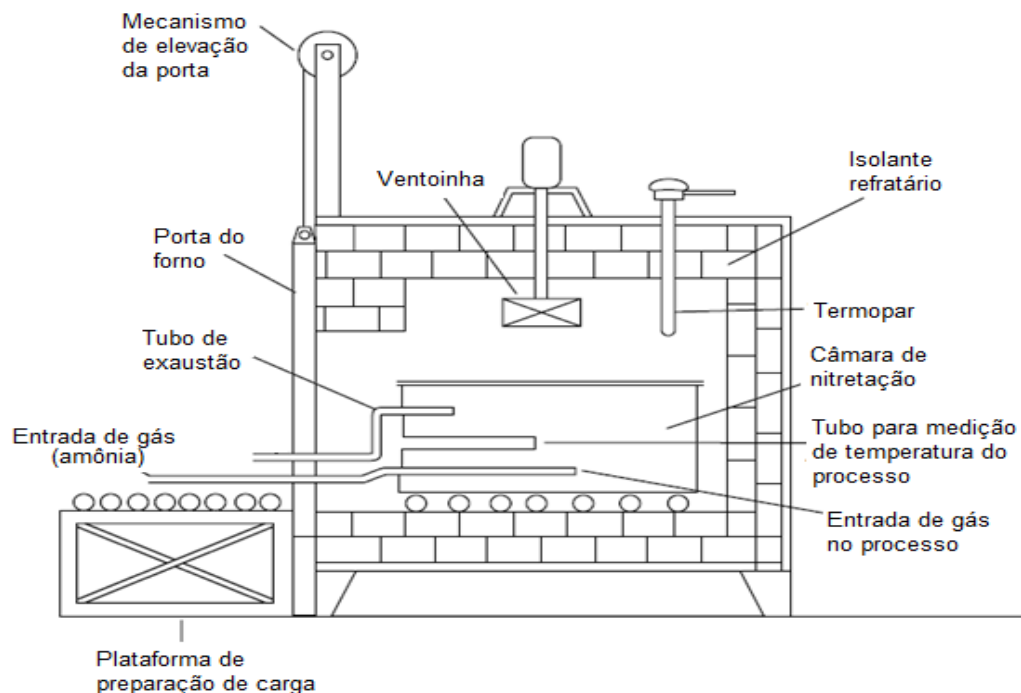


Figura 11: Sistema de nitretação a gás,
Fonte: Adaptado de Pye, 2003.

Após o desenvolvimento da nitretação gasosa, surgiram outros métodos de nitretação, a nitretação em banhos de sais, e posteriormente a nitretação por plasma.

A nitretação em banhos de sais é feita submergindo o aço em um tanque contendo sal fundido à aproximadamente 570° C. Esse método de nitretação é mais eficiente que a nitretação por gás em alguns casos, porém, é um processo altamente poluente que utiliza cianetos como fonte de nitrogênio (EKINCI et al, 2011).

2.5.2 Nitretação por plasma

Os primeiros estudos sobre nitretação por plasma foram realizados na década de 1920, na Alemanha por Bernad Berghaus. O processo ficou mais popular após a segunda guerra devido aos avanços na eletrônica que permitiram o desenvolvimento do sistema de ativação do plasma (KOVACS et al, 1995).

O esquemático do sistema de nitretação por plasma foi mostrada na figura 1, no processo é empregada uma câmara de vácuo, uma fonte de tensão de corrente contínua, um sistema de distribuição de gases, um sistema de controle de temperatura e um sistema de controle de pressão (KOVACS et al,1995.).

Ao aplicar tensão no sistema, sob condições adequadas de pressão e temperatura, o gás no interior da câmara é ionizado, e passa a conduzir corrente elétrica (TECHCOMMENTARY, 1994).

A pressão, nos processos de nitretação por plasma, influencia na uniformidade da camada nitretada (TECHCOMMENTARY, 1994).

Em relação aos processos convencionais, a nitretação por plasma é um processo seguro, pouco poluente, a variação dos parâmetros é realizada sem dificuldade, o processo pode ser conduzido a temperaturas mais baixas, conseguem-se camadas mais homogêneas, em menor tempo, consumindo menos energia, por outro lado, exige um equipamento mais sofisticado (TECHCOMMENTARY, 1994).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentada a adaptação da válvula, o sistema a ser controlado e o desenvolvimento do controle que inclui a identificação do sistema, o método de sintonia, simulações e validação.

3.1 SISTEMA DE CONTROLE DA PRESSÃO

A figura 12 representa respectivamente as malhas de controle de pressão, do sistema de nitretação a plasma, instaladas antes (A) e após a realização deste trabalho (B).

Sabendo-se que a vazão dos gases na entrada câmara é constante, a pressão é controlada pela vazão na saída, essa vazão proporcionada pela bomba geradora de vácuo é modificada pela válvula de controle.

Se a vazão na saída for menor que na entrada a pressão aumenta, por outro lado, se a vazão na saída for maior que na entrada a pressão diminui, portanto, para subir a pressão fecha-se a válvula e para baixar a pressão abre-se a válvula.

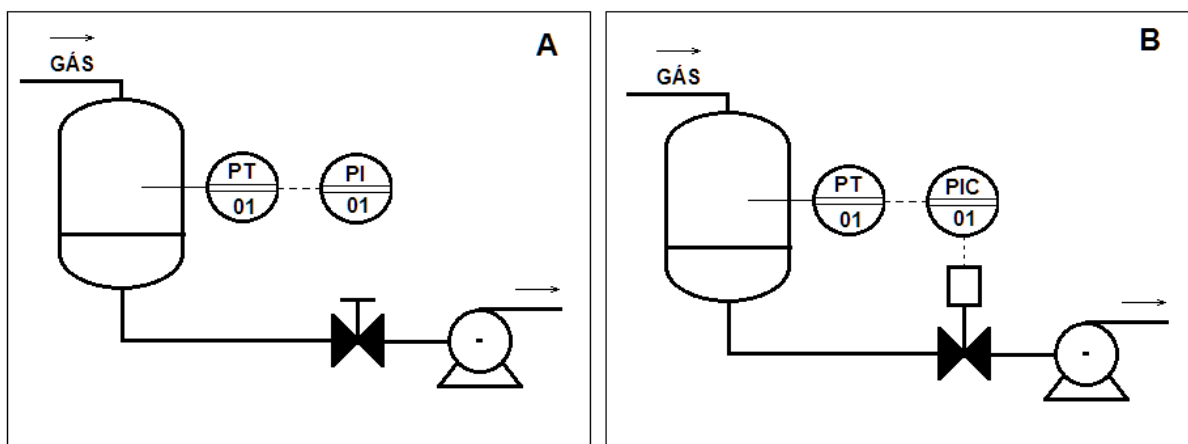


Figura 12: (A) Malha aberta, (B) Malha fechada.

Para converter a malha de controle de pressão de manual para automática, a válvula manual que existia no sistema foi convertida em uma válvula com posicionamento elétrico, o indicador de pressão foi substituído por um controlador e indicador de pressão (PIC) e os parâmetros do controlador foram sintonizados.

3.2 ADAPTAÇÃO MECÂNICA DA VÁLVULA

A figura 13 apresenta a válvula manual instalada no sistema antes da realização deste trabalho e na figura 14 é mostrada a válvula depois de adaptada para servir como elemento final de controle.



Figura 13: Válvula manual.

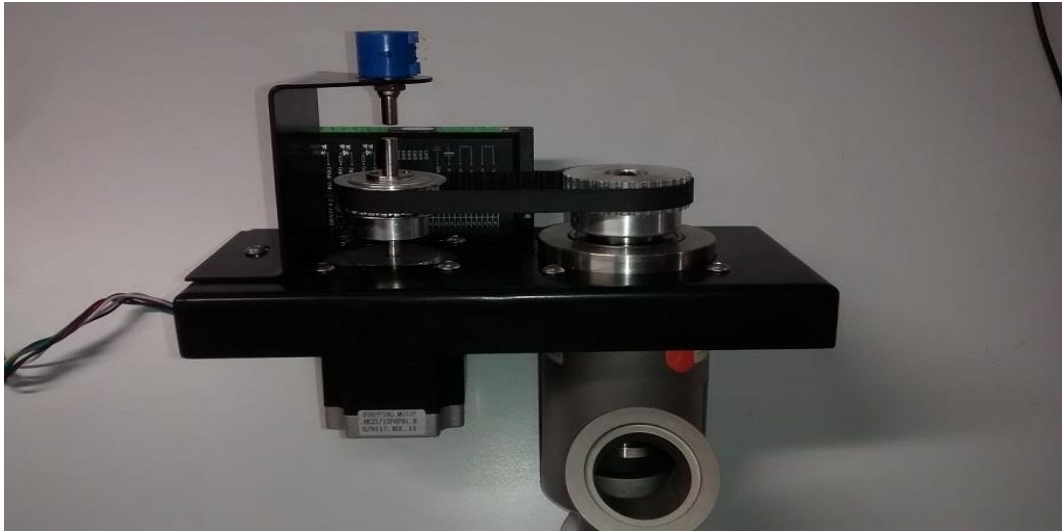


Figura 14: Válvula com posicionamento elétrico.

Na adaptação o manípulo foi substituído por uma polia, o motor de passo foi unido à válvula por um suporte feito em chapa metálica, o acoplamento entre o motor e válvula foi feito por uma correia dentada. Para monitorar a posição da válvula, foi acoplado um potenciômetro ao eixo do motor, na figura 15 é possível identificar os componentes utilizados na adaptação.

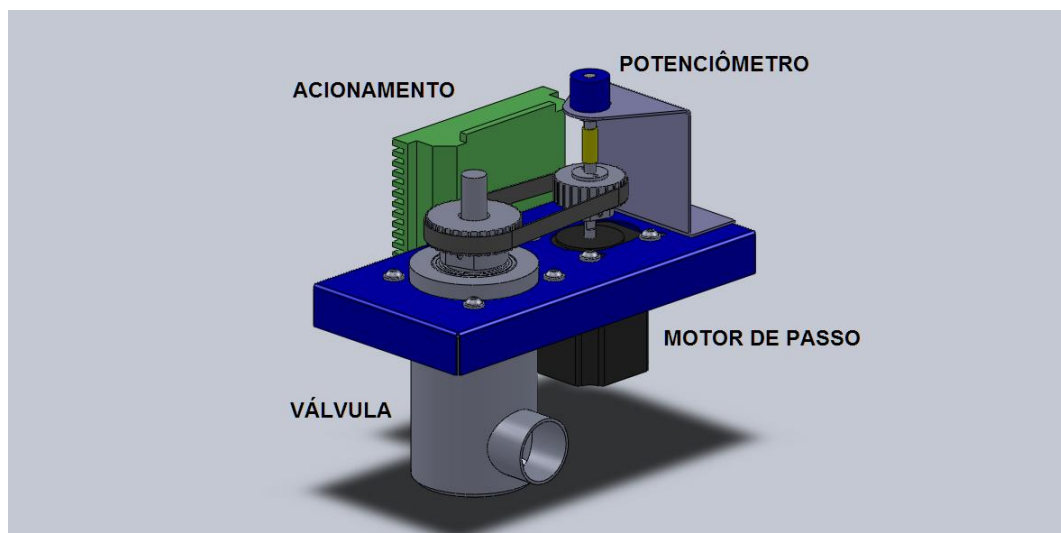


Figura 15: Projeto da válvula com posicionamento elétrico.

O projeto de adaptação mecânica, que inclui desenhos técnicos, detalhes construtivos e outras explicações mais detalhadas a respeito da válvula não foram abordados neste trabalho.

3.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO DA VÁLVULA

O sistema de posicionamento apresentado em diagrama de blocos na figura 16 é composto pelo motor de passo, o acionamento, e o potenciômetro que foram vistos na figura 15 e por uma placa eletrônica chamada neste trabalho de posicionador.

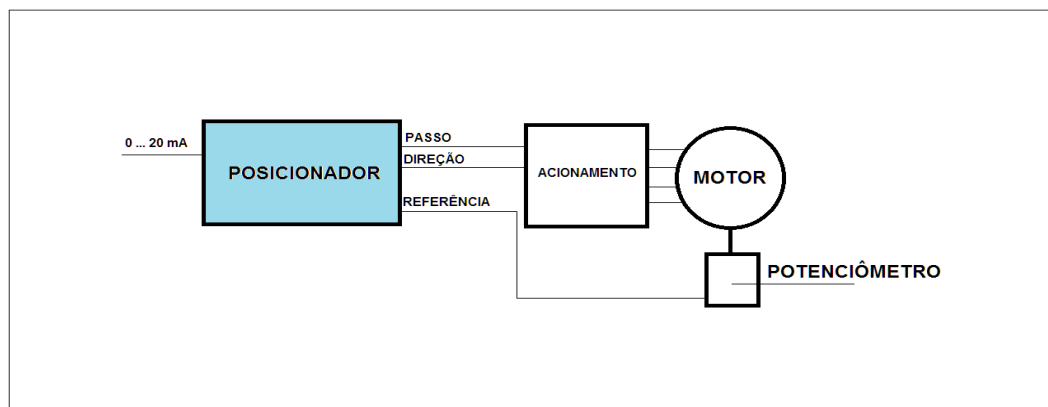


Figura 16: Esquema de posicionamento da válvula.

O posicionador recebe o sinal de entrada, compara com o sinal de referência e de acordo com o resultado da comparação aciona o motor, abrindo ou fechando a válvula.

A figura 17 apresenta uma foto do posicionador, a placa foi projetada para realizar diversas funções, ela utiliza um micro controlador PIC18F452 responsável pelo processamento dos sinais elétricos, ela possui três entradas e duas saídas analógicas, oito entradas e três saídas digitais e interfaces de comunicação serial, I2C e RS485.

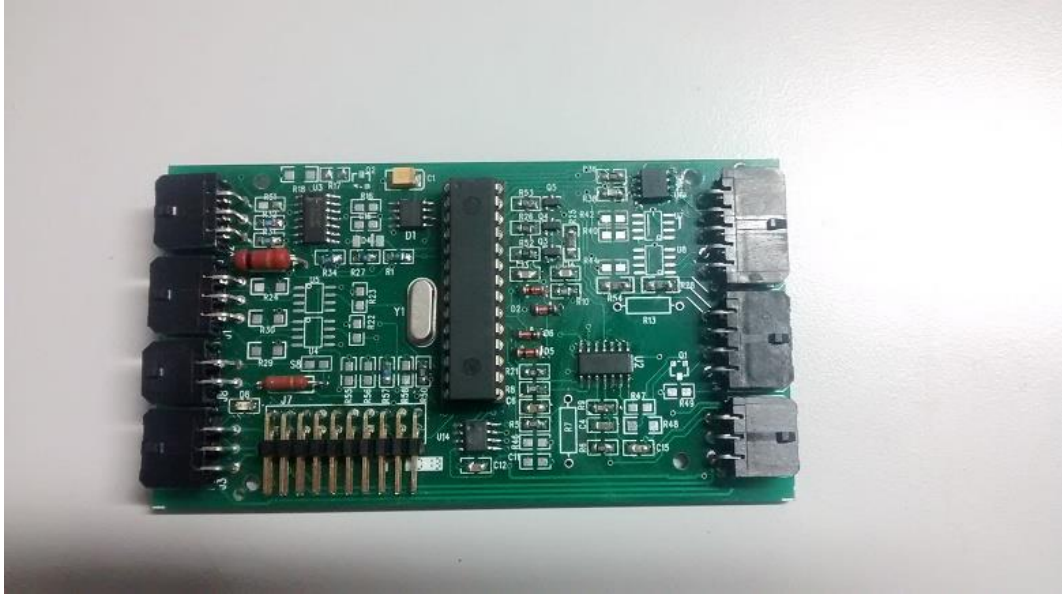


Figura 17: Posicionador.

Em que se pese a versatilidade da placa, neste relatório, somente a parte referente à função de posicionar a válvula é abordada, a figura 18 mostra o diagrama elétrico em blocos referente a esta parte.

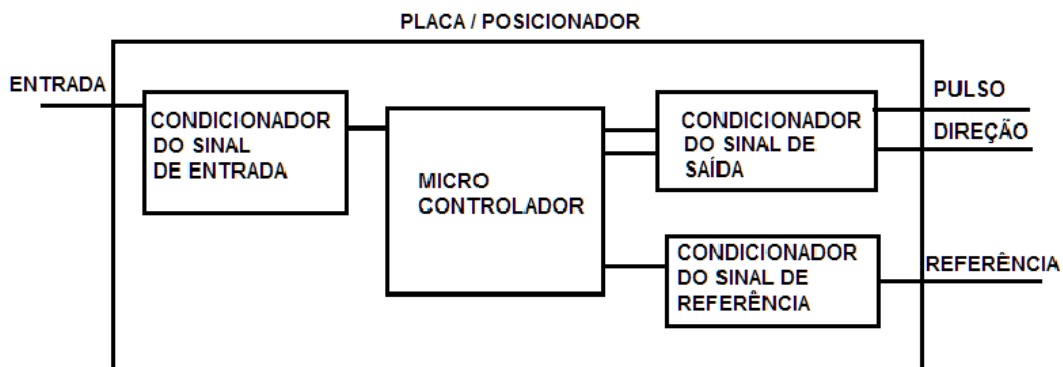


Figura 18: Diagrama em blocos do posicionador.

Observa-se que para cada sinal elétrico conectado à placa, há um circuito que o condiciona fazendo a interface com o micro controlador.

Na figura 19 é apresentado o circuito condicionador do sinal de entrada, a função deste circuito é transformar o sinal analógico de 0 a 20 mA, que entra na placa, em um sinal de 0 a 5V, pois, o micro controlador opera com valores de 0 a 5V.

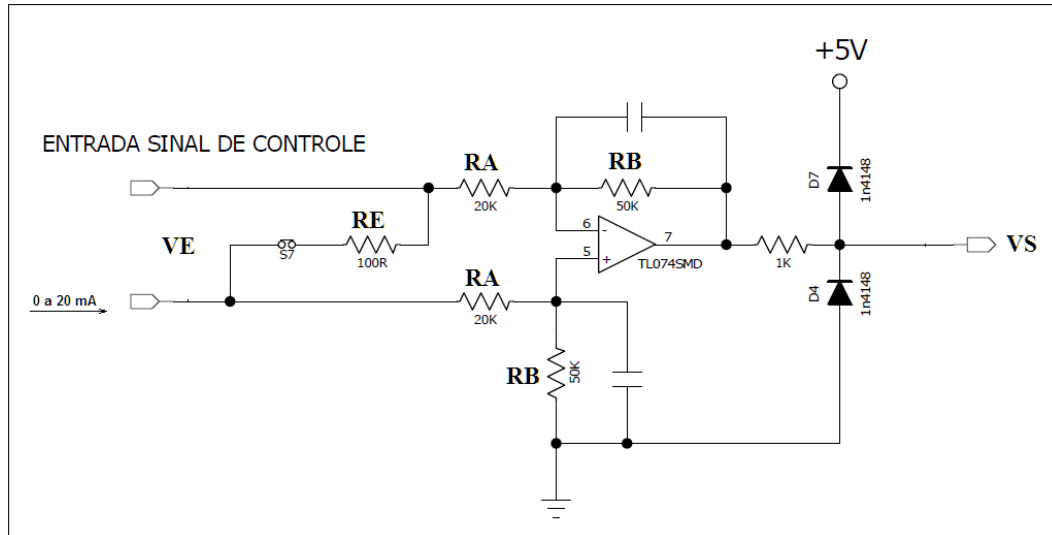


Figura 19: Circuito do condicionador do sinal de entrada.

No circuito apresentado na figura 19, a tensão de entrada VE, obedecendo a lei de Ohm, é dada pela equação (9).

$$VE = I \cdot RE \quad (9)$$

A tensão de saída VS é expressa pela equação (10), RA e RB são os resistores de ganho do sistema.

$$VS = VE \cdot \frac{RB}{RA} \quad (10)$$

Sendo RA igual a 20kΩ, RB, 50kΩ, e RE, 100Ω, aplicando as equações (9) e (10), confirma-se que para a faixa de corrente de 0 a 20 mA imposta à entrada do circuito, a saída VS, variará proporcionalmente na escala de 0 a 5 V.

Na figura 20 é apresentado o circuito de condicionamento do sinal de referência, ou seja, do sinal que retorna do potenciômetro indicando a posição atual da válvula.

A diferença do circuito apresentado na figura 20 para o circuito apresentado anteriormente na figura 19 está no resistor RE, necessário para converter o sinal elétrico de corrente em tensão. Como o sinal que retorna do potenciômetro já é um sinal em tensão, no circuito da figura 20 o resistor RE não é necessário.

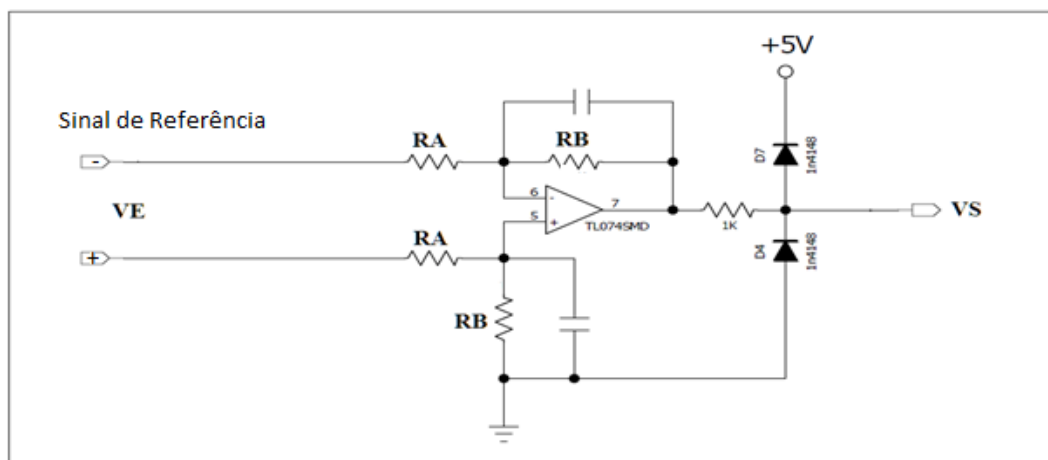


Figura 20: Circuito de entrada analógica.

A interface com o acionamento do motor de passo também passa por um circuito condicionador, este circuito é mostrado na figura 21.

A cada acionamento do sinal PULSO o motor gira $0,9^\circ$, para dar uma volta completa no eixo do motor são necessários 400 acionamentos do sinal PULSO. O sinal SENTIDO é responsável pelo sentido de giro e o sinal LIVRE, desabilita o acionamento deixando o eixo do motor livre.

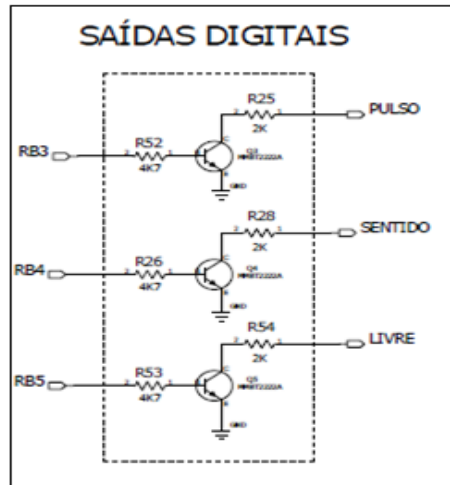


Figura 21: Circuito condicionador de saídas digitais.

O posicionamento é realizado a cargo do micro controlador. Quando a entrada for maior que a referência, a válvula deve abrir, quando a entrada for menor, a válvula deve fechar.

O fluxograma apresentado na figura 22 representa o programa inserido no micro controlador.

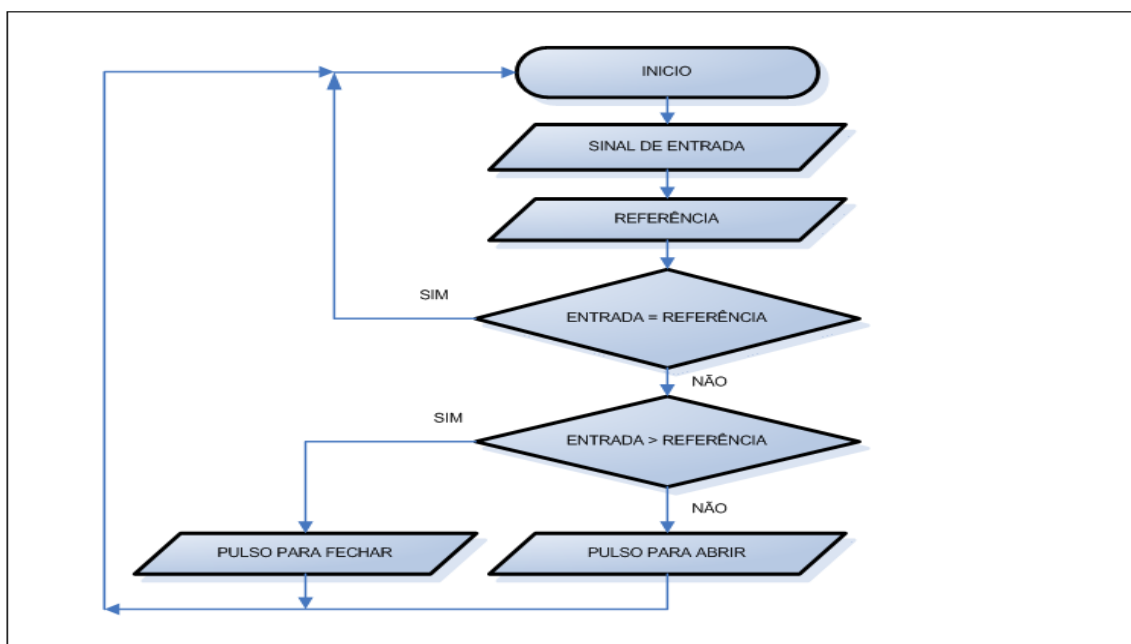


Figura 22: Fluxograma de posicionamento da válvula

Nesta seção, foi apresentado o desenvolvimento da parte eletrônica referente à adaptação da válvula, o programa do micro controlador, escrito em linguagem C, assim como, o esquema elétrico completo da placa e lista de componentes não foram apresentados.

3.4 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO

O diagrama de blocos apresentado na figura 23 mostra a integração do controlador com o posicionador da válvula, fazem parte do sistema eletrônico: Um controlador da marca Novus, modelo N1100, uma fonte de alimentação que gera tensões de +15, -15 +5 e 24V e o sistema de posicionamento apresentado na seção 3.3.

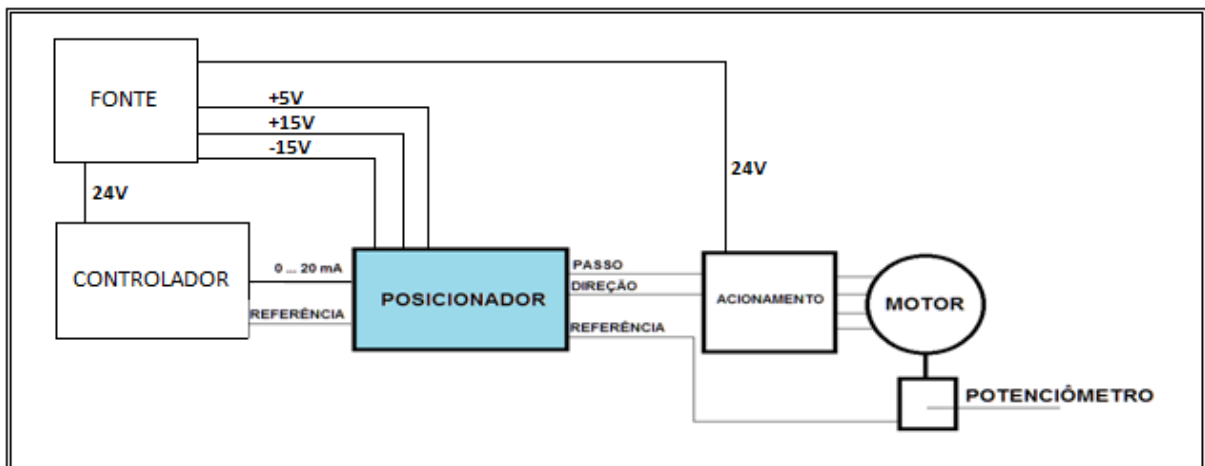


Figura 23: Diagrama elétrico da integração da válvula com o controle.

O esquema das conexões elétricas do controlador NOVUS é apresentado na figura 24.

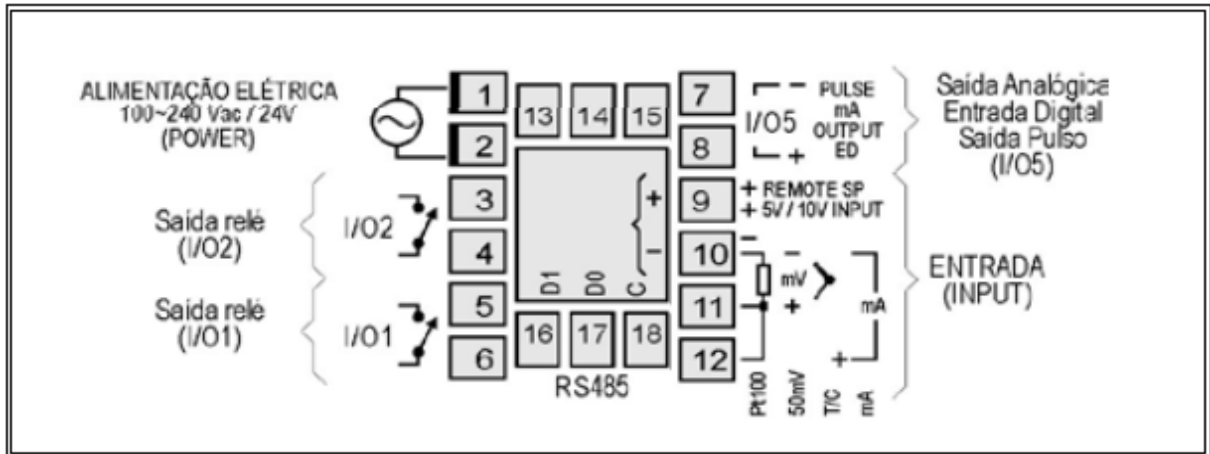


Figura 24: Esquema elétrico do controlador Novus, Fonte: Novus (2014).

O esquema das conexões elétricas da placa do posicionador é apresentado na figura 25.

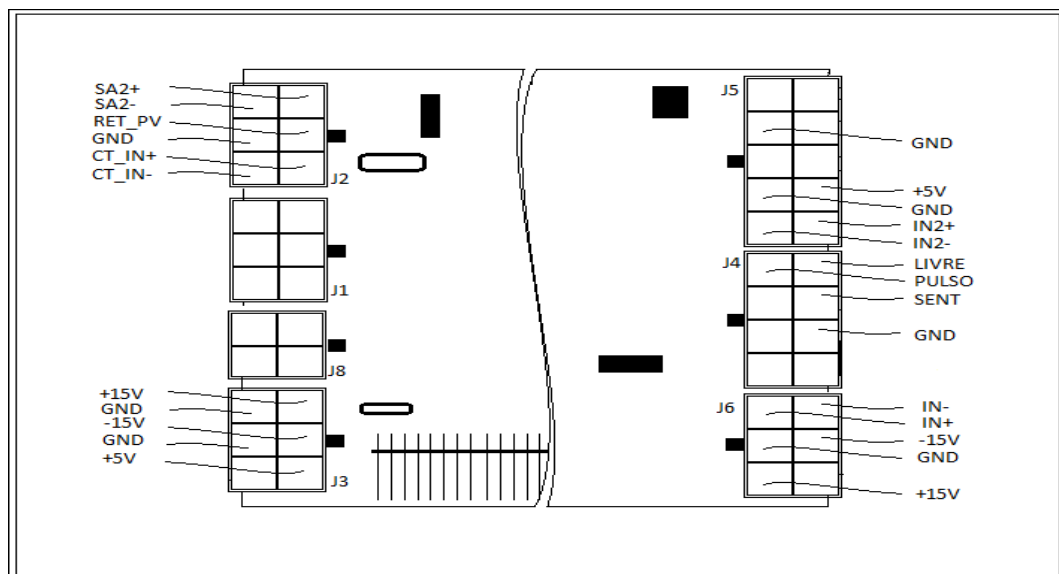


Figura 25: Conectores da placa posicionador.

O esquema elétrico das conexões do acionamento do motor de passo é apresentado na figura 26.

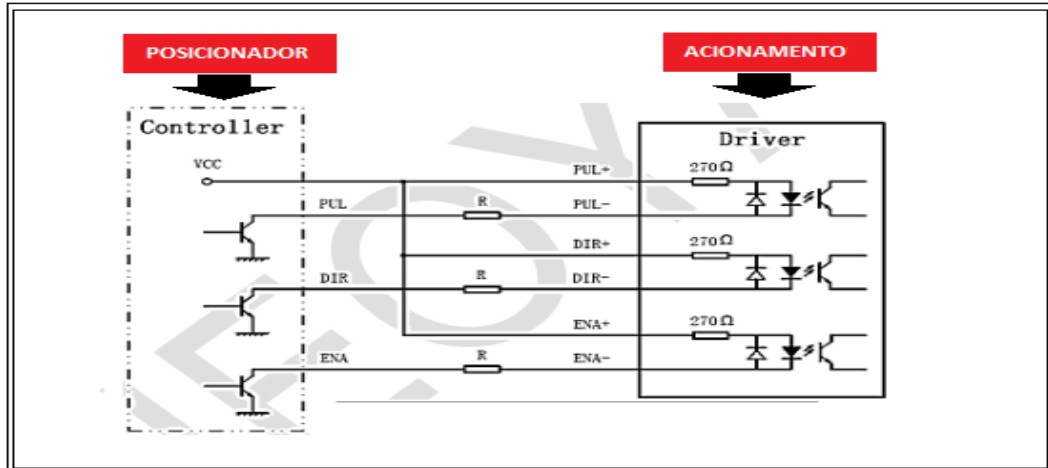


Figura 26: Comando do acionamento do motor de passo, Fonte: Adaptado de Neoyama, 2014.

Foi utilizado um acionamento da marca Akiyama, modelo AKDMP16-4.2A (figura 27).

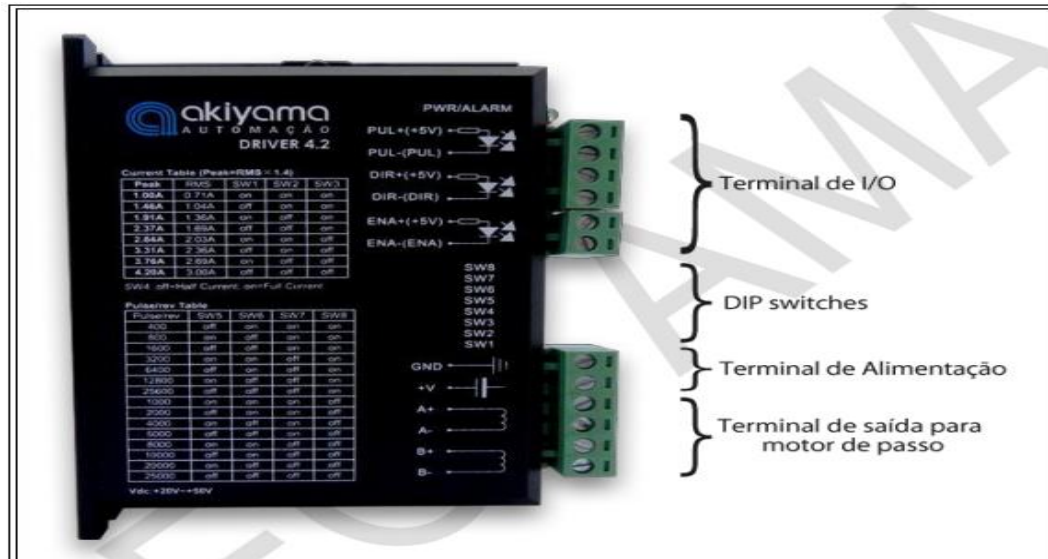


Figura 27: Acionamento do motor de passo, Fonte: Neoyama, 2014.

Foi utilizado um motor de passo de seis fios da marca Akiyama modelo AK23/15F6FN1.8, o esquema dos fios do motor é apresentado na figura 28.

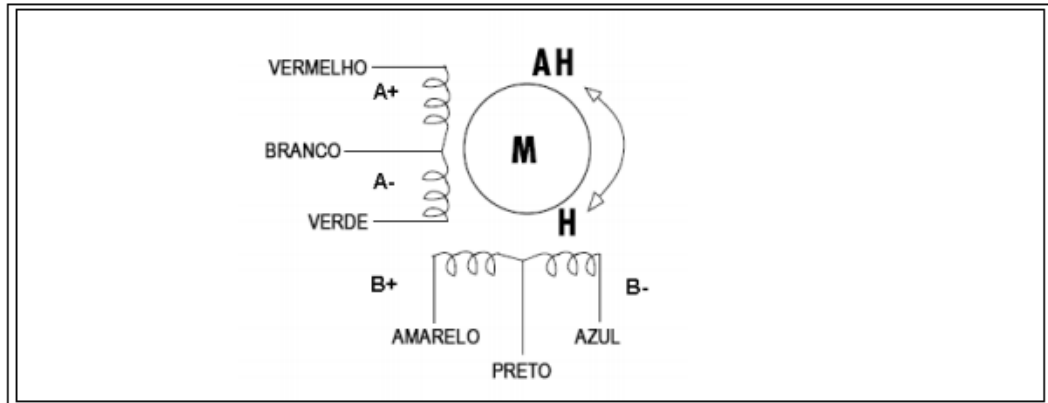


Figura 28: Esquema dos fios do motor de passo,
Fonte: Neoyama, 2014.

3.4.1 Cabo de alimentação

O esquema elétrico do cabo de alimentação do posicionador é apresentado na figura 29, ele utiliza um conector de seis vias da marca Metaltex, modelo MCFPL.

No posicionador, o conector que recebe a alimentação é o conector J3, que pode ser identificado na figura 25.

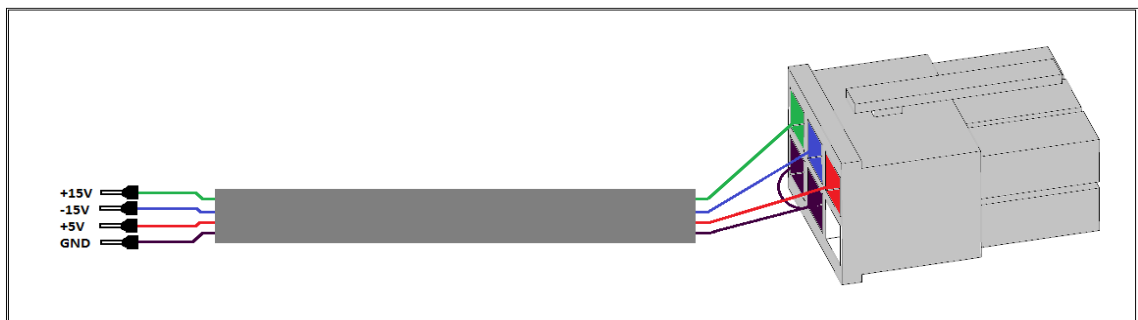


Figura 29: Cabo de alimentação do posicionador.

3.4.2 Cabo de controle

O esquema elétrico do cabo de controle é apresentado na figura 30, este cabo liga o controlador ao posicionador, o cabo conecta-se ao posicionador no conector J2 que pode ser identificado na figura 25, no controlador N1100 o cabo deve ser conectado aos pinos sete (CT_IN-), oito (CT_IN+), nove (RET_PV) e dez (GND).

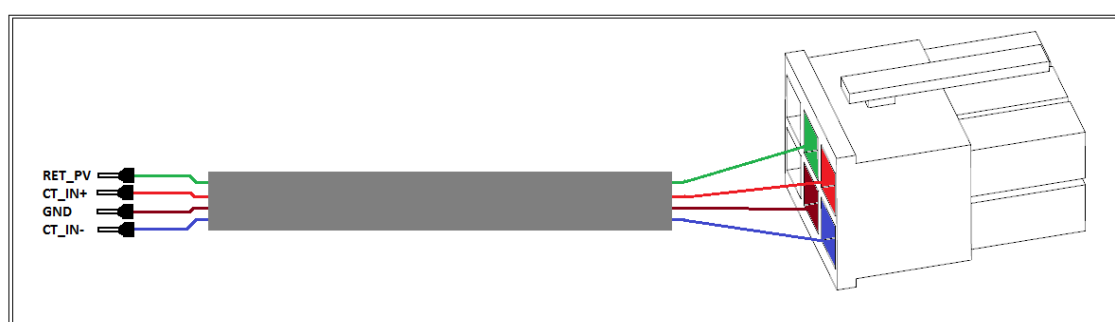


Figura 30: Cabo de controle do posicionador.

A descrição dos sinais que trafegam pelo cabo de controle é apresentada no quadro 1.

SINAL	DESCRIÇÃO
CT_IN-	Negativo do sinal de controle de 0 a 20 mA
CT_IN+	Positivo do sinal de controle de 0 a 20mA
RET_PV	Retransmissão do valor da pressão
GND	Zero volts

Quadro 1: Descrição dos sinais de controle.

3.4.3 Cabo de comando

O cabo de comando que conecta o posicionador ao acionamento do motor de passo é apresentado na figura 31, este cabo deve ser ligado ao posicionador no conector J4, e no acionamento conforme a análise das figuras 26 e 27, na dúvida o manual do acionamento deverá ser consultado.

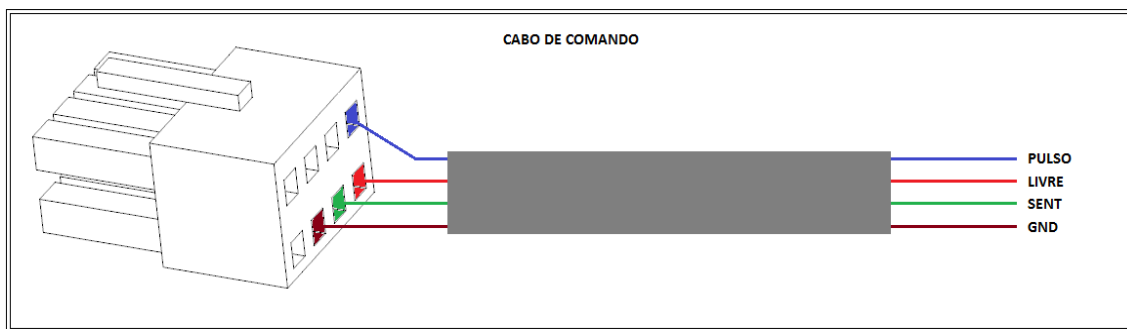


Figura 31: Cabo de comando.

O quadro 2 descreve os sinais que trafegam no cabo de comando.

SINAL	DESCRIÇÃO
PULSO	Cada pulso neste sinal ocasionará um passo no motor.
LIVRE	Este sinal habilita o acionamento
SENT	O nível deste sinal comandará o sentido de rotação do motor

Quadro 2: Descrição dos sinais de comando.

3.4.4 Cabo de referência

O cabo de referência que conecta o posicionador ao potenciômetro que referencia a posição da válvula é apresentado na figura 32, este cabo deve ser ligado ao posicionador através do conector J5.

Na figura 33 é apresentado respectivamente, o potenciômetro (A) utilizado para a referência e o esquema de ligação (B) do mesmo.

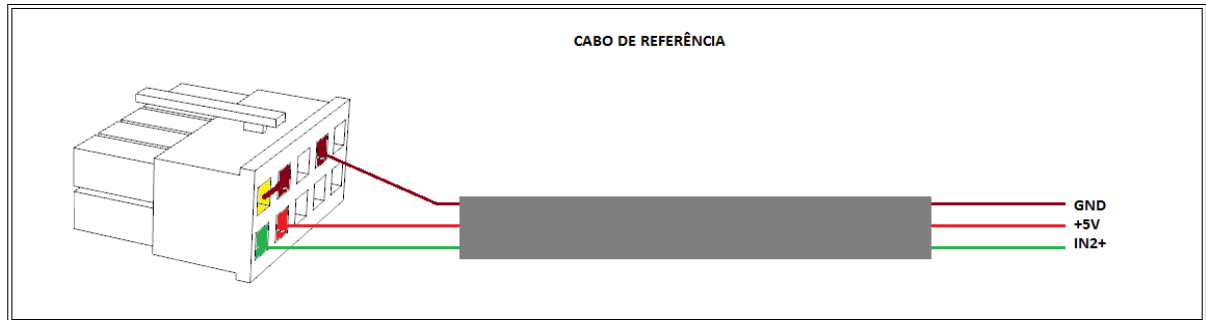


Figura 32: Cabo de referência.

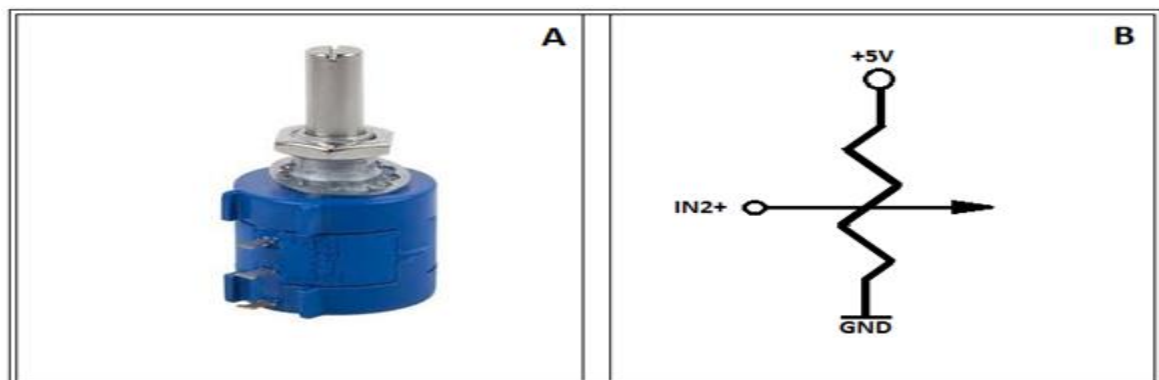


Figura 33 Potenciômetro: (A) modelo físico; (B) esquema elétrico.

3.4.5 Cabo de leitura

O cabo de Leitura que conecta o posicionador ao transmissor de pressão é apresentado na figura 34.

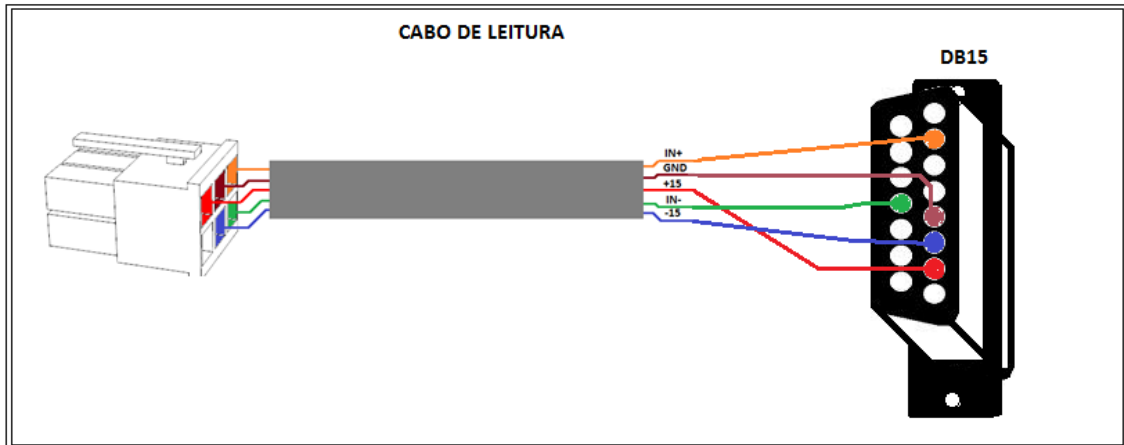


Figura 34: Cabo de leitura.

O transmissor de pressão utilizado é um Baratron da marca MKS (figura 35), a faixa de operação deste transmissor é de 10 Torr.



Figura 35: Transmissor de pressão.

3.5 SINTONIA DO CONTROLADOR

Nesta seção apresenta-se a sintonia do controlador PID descrevendo os procedimentos para alcançá-la; as considerações, verificação da linearidade do sistema, identificação da função de transferência, simulações e testes práticos

3.5.1 Considerações para a sintonia do controlador

Na nitretação por plasma as pressões selecionadas de acordo com cada processo vão de 1 a 2,5 Torr (10% a 25% da PV). A vazão dos gases na entrada vai de 300 a 1000 cm³ por minuto. A temperatura é conduzida entre 470° a 560° C.

A vazão de entrada influencia na dinâmica do processo, quanto maior a vazão, maior deverá ser a abertura da válvula para manter o valor desejado, a temperatura também influencia na dinâmica do processo.

Para levantar a função de transferência, foi utilizada uma vazão de 750 cm³ por minuto, pois, a máquina estava em operação com esta vazão quando a função foi levantada, a temperatura estava em 510°C

Para facilitar os cálculos as unidades das variáveis envolvidas na malha de pressão foram expressas em percentual da faixa de variação.

3.5.2 Comportamento do sistema

A figura 36 apresenta o gráfico que relaciona a PV e a MV. Foram causados degraus de um em um por cento na MV partindo de zero (válvula totalmente fechada), o valor da PV foi registrado com o processo estabilizado.

Verificou-se que a relação entre a abertura da válvula e a pressão não é linear, e que há duas “bandas morta”.

A pressão só começa a baixar a partir de 8% de abertura, isso ocorre possivelmente devido a deformação do anel de vedação de borracha que permanece encostado no acento da válvula até esse ponto.

A partir de aproximadamente 20% de abertura a pressão não consegue mais baixar, provavelmente porque a eficiência da bomba geradora de vácuo fica saturada.

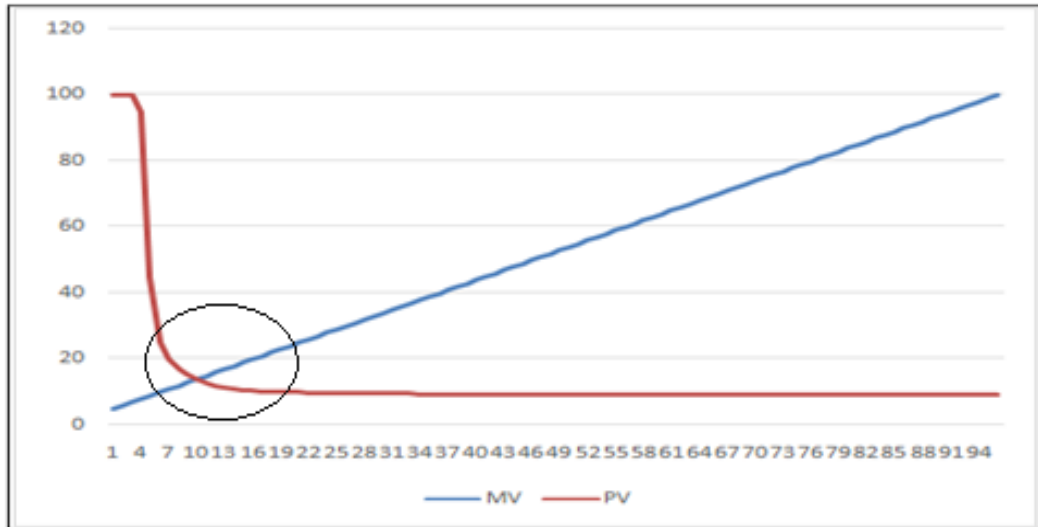


Figura 36: Relação entre a PV e a MV.

A figura 37 mostra a relação entre a PV e a MV somente para a faixa de interesse que vai de 10% a 21% da PV, nessa faixa o processo também apresenta uma não linearidade, contudo, menor do que a observada para a faixa toda.

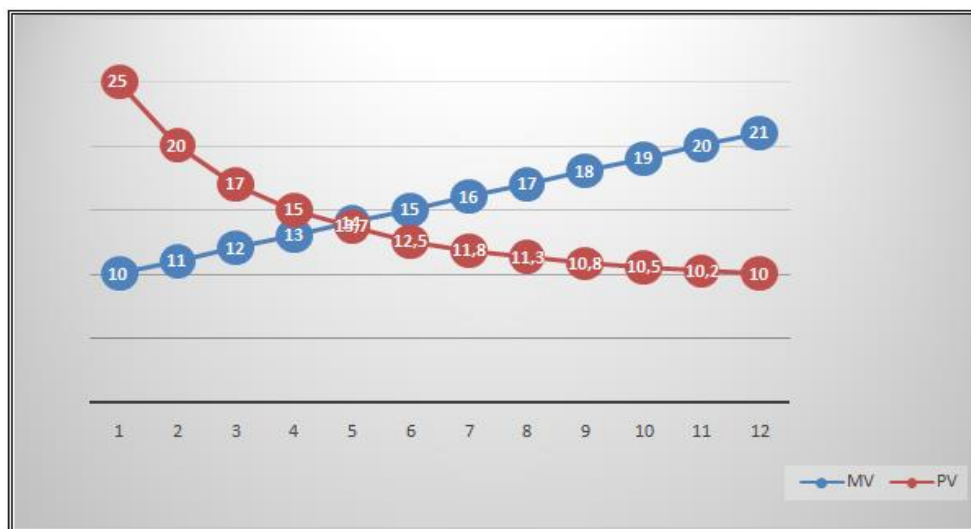


Figura 37: Relação entre a PV e MV para a faixa de interesse.

3.5.3 Curvas de carga

As curvas em malha aberta que auxiliaram na identificação da função de transferência foram obtidas executando degraus entre 15% a 20% na MV. Nesta faixa observou-se com o auxílio da figura 38 que a não-linearidade do sistema é pequena, o que é bom, contudo, o principal motivo da escolha desta faixa foi porque a máquina estava em operação quando as curvas foram levantadas e tomou-se o cuidado para não alterar significativamente a pressão a ponto que pudesse interferir na qualidade do processo.

A figura 38 apresenta a curva de resposta ao degrau positivo (A) e a curva de resposta ao degrau negativo (B). As curvas foram obtidas com um osciloscópio, captadas a partir do sinal elétrico proporcional à pressão gerado pelo PIC.

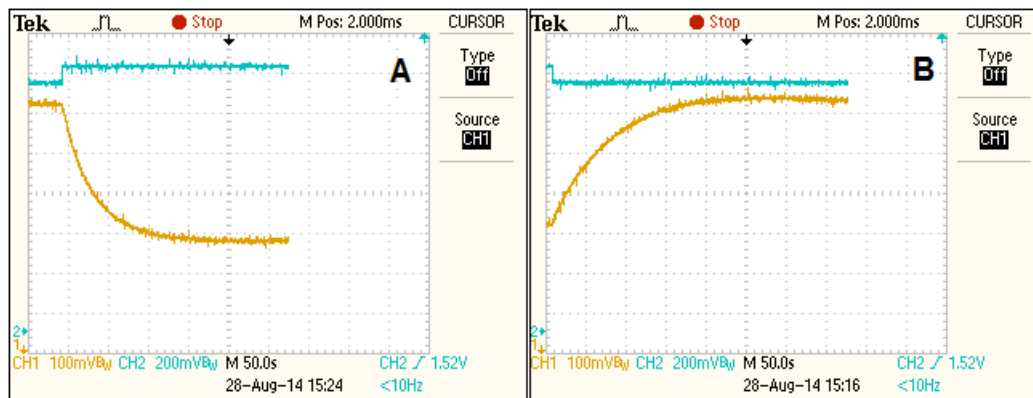


Figura 38: Curva de resposta ao degrau positivo (A) e ao degrau negativo (B).

A partir da análise das duas curvas de resposta ao degrau apresentadas na figura 38 foram extraídos os dados utilizados para calcular a função de transferência do sistema, estes dados são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Dados de resposta ao degrau positivo.

Degrau positivo na MV	
Tempo de 28,3%	14s
Tempo de 63,2%	38s
MV inicial	15%
MV final	20%
Δ MV	5%
PV inicial	16,3%
PV final	9,7%
Δ PV	-6,6%

Tabela 4: Dados de resposta ao degrau negativo.

Degrau negativo na MV	
Tempo de 28,3%	24s
Tempo de 63,2%	68s
MV inicial	20%
MV final	15%
Δ MV	-5%
PV inicial	10,4%
PV final	16,6%
Δ PV	6,2%

3.5.4 Função de transferência

Utilizando os dados apresentados nas tabelas 3 e 4, e as equações (1) e (2) foram identificados o tempo morto e a constante de tempo. O ganho do sistema foi identificado a partir da análise das curvas de carga. A tabela 5 apresenta os valores calculados para a resposta ao degrau positivo e negativo.

Tabela 5: Dados da função de transferência.

Degrau positivo	Tempo morto	L	2
	Constante de tempo	T	36
	Ganho	K	-1,32
Degrau negativo	Tempo morto	L	2
	Constante de tempo	T	66
	Ganho	K	-1,24

Observou-se que há uma diferença na dinâmica do processo quando é dado um degrau positivo na MV de quando um degrau negativo. A equação (11) expressa a função de transferência FT1, que caracteriza a dinâmica do processo para o degrau positivo, e a equação (12) expressa a função de transferência FT2 que caracteriza a dinâmica de resposta ao degrau negativo.

$$FT1 = \frac{-1,3 \cdot e^{-2S}}{36S + 1} \quad (11)$$

$$FT2 = \frac{-1,25 \cdot e^{-2S}}{66S + 1} \quad (12)$$

3.5.5 Simulação da função de transferência

As funções de transferência FT1 e FT2 foram simuladas em malha aberta no Simulink do Matlab utilizando os respectivos diagramas de bloco apresentados na figura 39.

As curvas reais (figura 38) e simuladas (figura 40) foram comparadas, com isso, confirmou-se a coerência das funções identificadas.

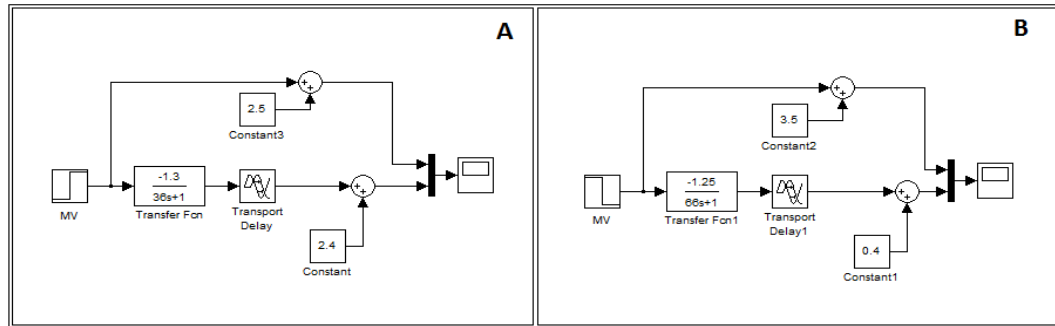


Figura 39: Blocos de simulação das FTs, A - degrau positivo, B – degrau negativo.

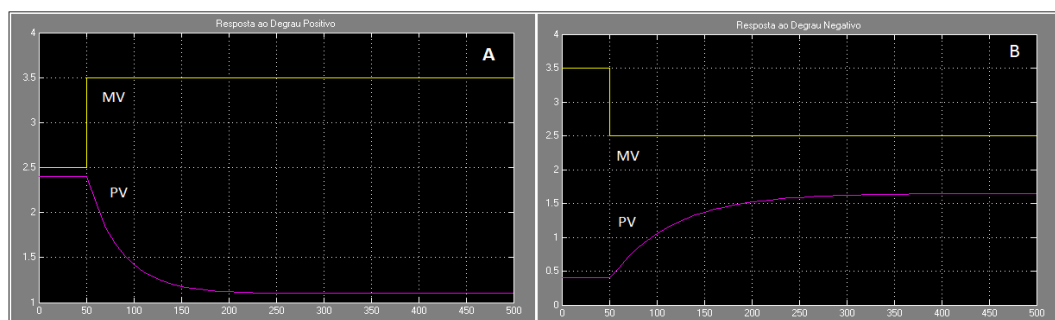


Figura 40: Simulação da resposta ao degrau, (A) - degrau positivo, (B)- degrau negativo.

3.5.6 Determinação dos parâmetros do controlador

Os parâmetros do controlador foram definidos com base no método CHR. O critério escolhido foi o de a resposta mais rápida sem sobressinal para problema do tipo servo.

As tabelas 6 e 7 apresentam respectivamente os parâmetros do controlador calculados com base nas funções FT1 e FT2.

Tabela 6: Parâmetros do controlador calculados para a FT1.

	Kp	Ti	Td
P	4,15	∞	0
PI	4,85	41,76	0
PID	8,31	36	1

Tabela 7: Parâmetros do controlador calculados para a FT2.

	Kp	Ti	Td
P	7,92	∞	0
PI	9,24	76,56	0
PID	15,84	66	1

3.5.1 Parâmetros para o controlador Novus

Os valores apresentados nas tabelas 8 e 9 estão adequados aos parâmetros do controlador NOVUS que utiliza BP, em vez de KP e Ir, em vez de Ti, a relação entre BP e KP foi apresentada na equação (6) a relação entre Ir e Ti é apresentada na equação (13).

$$Ir = \frac{60}{Ti} \quad (13)$$

Tabela 8: Parâmetros do controlado Novus Calculados com base na FT1.

	Bp	Ir	Td
P	24,07	0	0
PI	20,63	1,44	0
PID	12,02	1,67	1

Tabela 9: Parâmetros do controlador Novus calculados com base na FT2.

	Bp	Ir	Td
P	12,63	0	0
PI	10,82	0,78	0
PID	6,31	0,91	1

3.5.2 Simulação do sistema em malha fechada

O sistema foi simulado em malha fechada no modo P, PI e PID, com base nos parâmetros calculados para a FT1 e FT2.

Como não é possível parametrizar o controlador com base em duas FTs, cada grupo de parâmetros foi testado no controle de ambas às respostas.

Cabe ressaltar que na obtenção das curvas de carga em malha aberta, o degrau é dado na saída do controlador, a variável do processo apresenta uma resposta contrária ao degrau dado na MV, pois, o sistema tem o ganho negativo.

Em malha fechada o degrau é dado na entrada do controlador, a PV, obviamente deve apresentar uma resposta no mesmo sentido do degrau, pois, o objetivo do controle é que a PV se iguale ao SP.

3.5.2.1 Simulação do controle P

As figuras 41 (A) e (B) apresentam a simulação da resposta do sistema em malha fechada com o controlador em proporcional (P) cujos parâmetros foram calculados com base na FT1. Observa-se que neste modo a resposta apresenta erro em regime permanente.

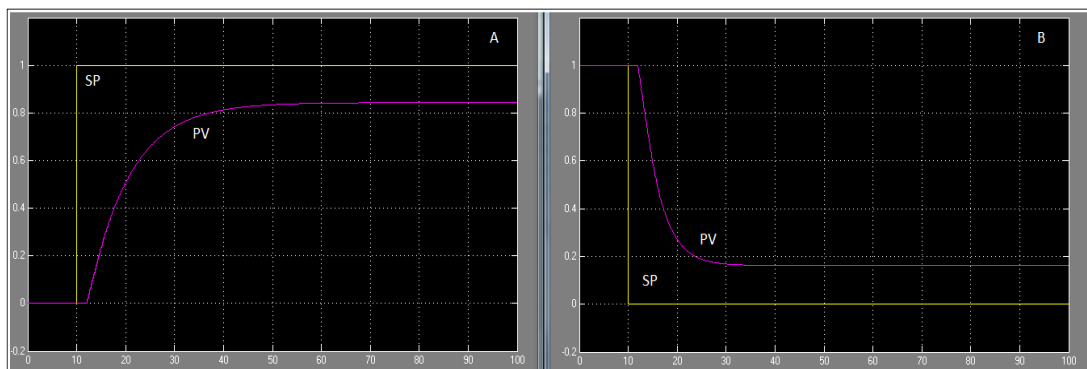


Figura 41: Simulação do controle P com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.

As figuras 42 (A) e (B) apresentam a simulação com o controlador em modo proporcional (P) cujos parâmetros foram calculados com base na FT2. Como o ganho é maior, o erro em regime permanente é menor em relação ao controle baseado na FT1, porém, observou-se que a resposta ao degrau de descida apresentou uma pequena oscilação.

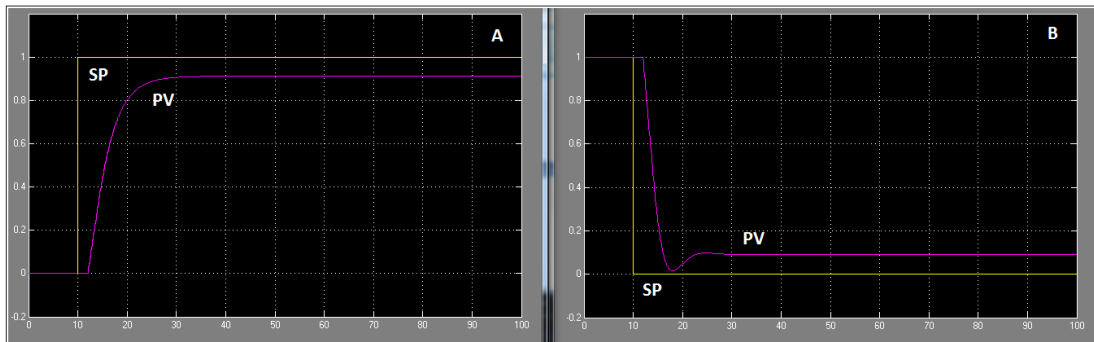


Figura 42: Controle P com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); degrau negativo.

3.5.2.2 Simulação do controle PI

As figuras 43 (A) (B) apresentam a resposta simulada com o controlador em modo PI baseado na FT1. Observa-se que o erro em regime permanente foi eliminado devido à ação integral e que no pior caso o ponto de ajuste foi alcançado em aproximadamente vinte cinco segundos e a resposta estabilizou-se em aproximadamente 90s.

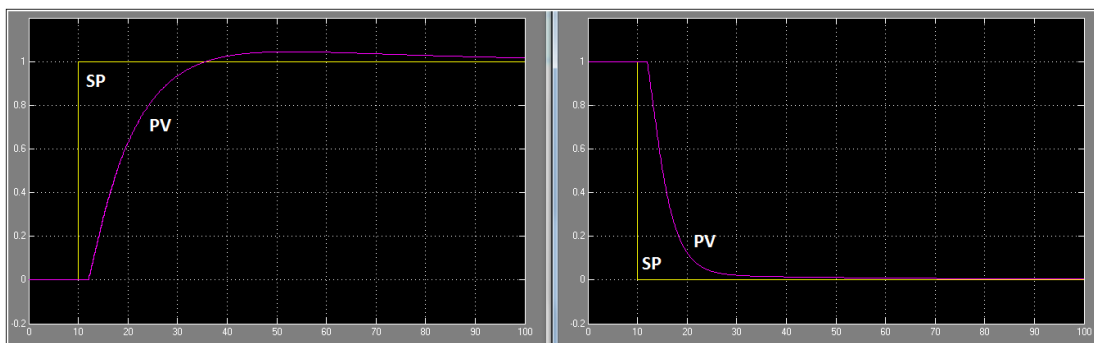


Figura 43: Simulação do controle PI com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.

As figuras 44 (A) e (B) apresentam a resposta simulada com o controlador em modo PI baseado na FT2. Observa-se que no pior caso o ponto de ajuste foi alcançado em aproximadamente vinte segundos e a resposta estabilizou-se em aproximadamente 90s. e que houve um pequeno sobressinal na resposta ao degrau negativo.

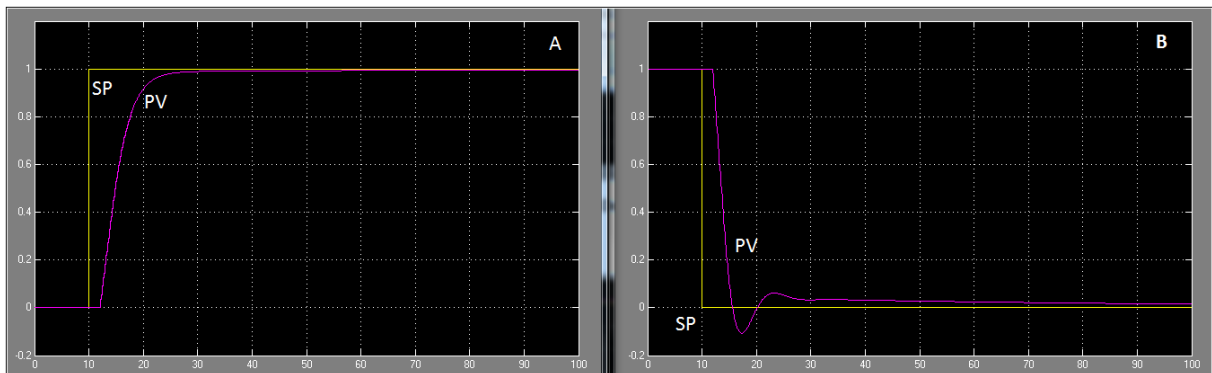


Figura 44: Simulação do controle PI com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.

3.5.2.3 Simulação do controle PID

As figuras 45 (A) e (B) apresentam a resposta simulada com o controlador em modo PID baseado na FT1. Observou-se que a resposta ficou ligeiramente mais rápida, e estabilizou-se em menor tempo do que a resposta com o controlador em modo PI.

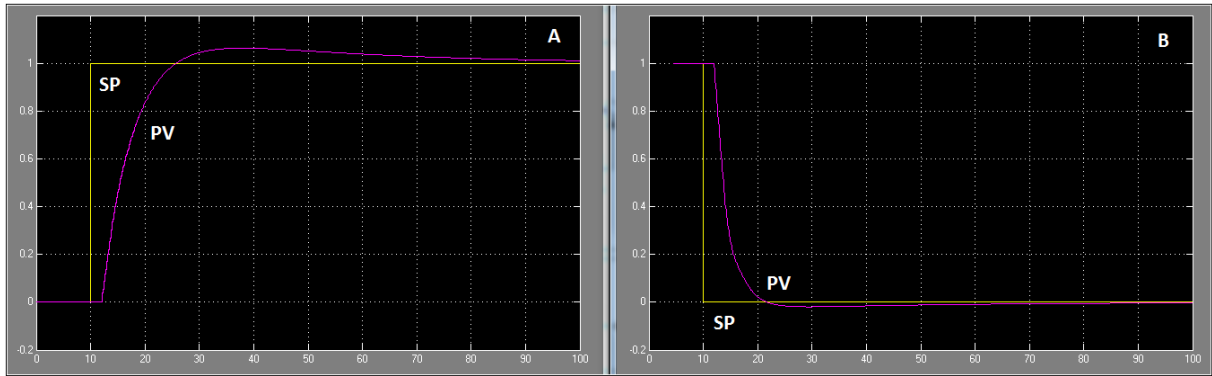


Figura 45: Simulação do controle PID com base na FT1: (A); Degrau positivo, (B); degrau negativo.

As figuras 46 (A) e (B) apresentam a resposta simulada com o controlador em modo PID baseado na FT2. Observou-se que a resposta ficou ligeiramente mais rápida, do que com os parâmetros calculados com base na FT1, porém, como degrau de descida a resposta apresenta oscilação antes de alcançar a estabilidade.

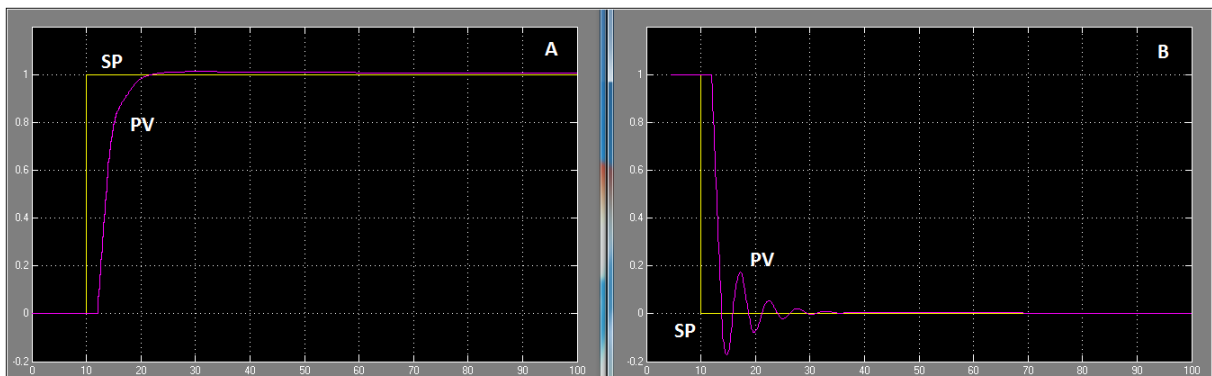


Figura 46: Simulação do controlador PID com base na FT2: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.

A partir dos parâmetros encontrados com base na FT1 foram selecionados um terceiro grupo de parâmetros apresentados na tabela 10 e na tabela 11 apresenta-se os parâmetros para a configuração do controlador Novus.

Tabela 10: Parâmetros PID.

	K_p	T_i	T_d
PID	10	40	1

Tabela 11: Parâmetros PID para o controlador Novus.

	B_p	I_r	T_d
PID	10	1.5	1

As figuras 45 (A) e (B) apresentam a resposta simulada com o controlador em modo PID com os parâmetros da tabela 11.

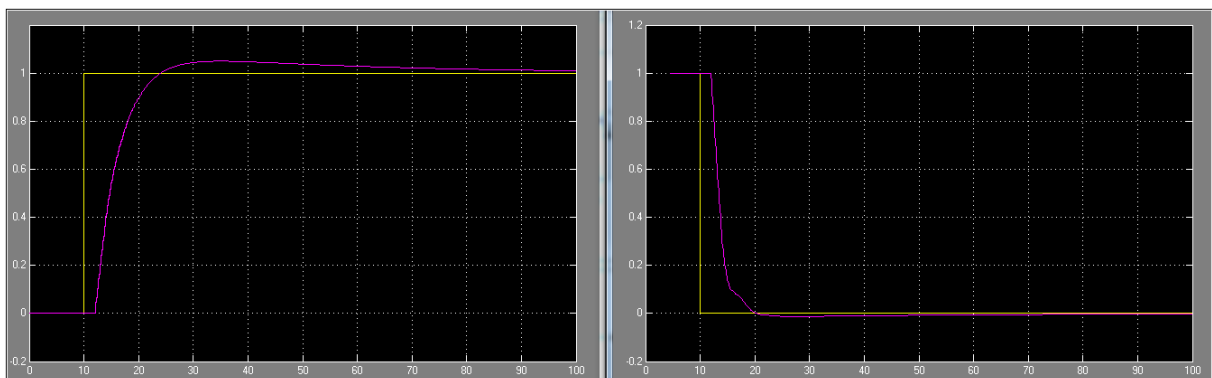


Figura 47: Simulação do controle PID: (A); Degrau positivo, (B); Degrau negativo.

3.5.3 Validação da sintonia

As respostas reais do sistema são apresentadas para o controlador em modo PI e PID, com base na FT1, na FT2 e no terceiro grupo de parâmetros. As curvas foram obtidas com um osciloscópio que amostrou os valores da PV e do SP.

3.5.3.1 Controle PI

As figuras 46 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 10% a 15% e de 15% a 10% com o controlador em modo PI sintonizado com base na FT1.

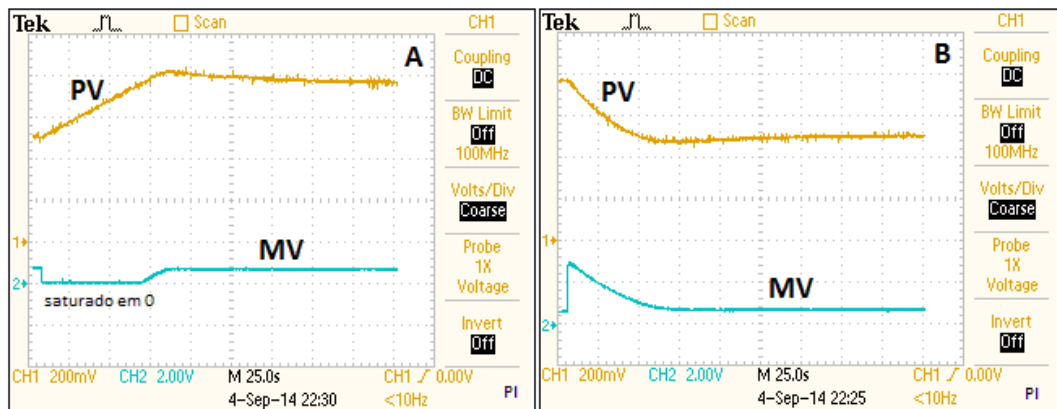


Figura 48: Controle PI: parâmetros baseados na FT1.

As figuras 47 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 10% a 15% e de 15% a 10% com o controlador em modo PI sintonizado com base na FT2.

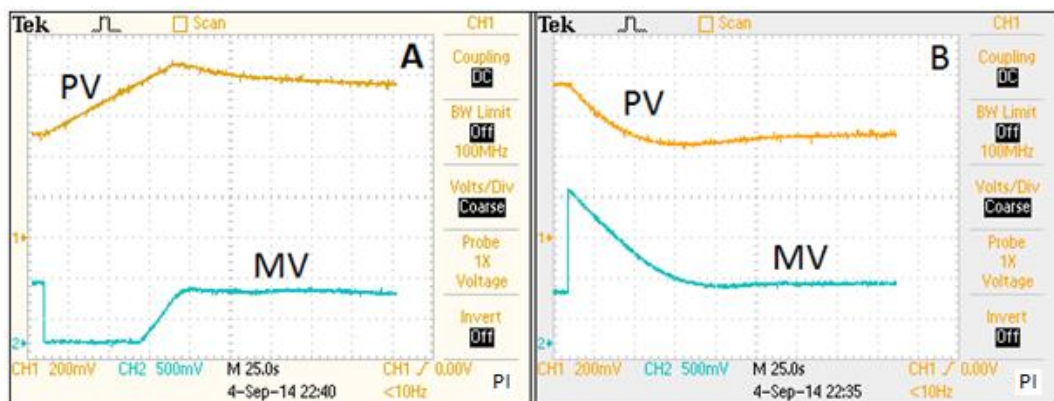


Figura 49: Controle PI parâmetros baseados na FT2.

3.5.3.2 Controlador PID

As figuras 48 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 10% a 15% e de 15% a 10% com o controlador em modo PID sintonizado com base na FT1.

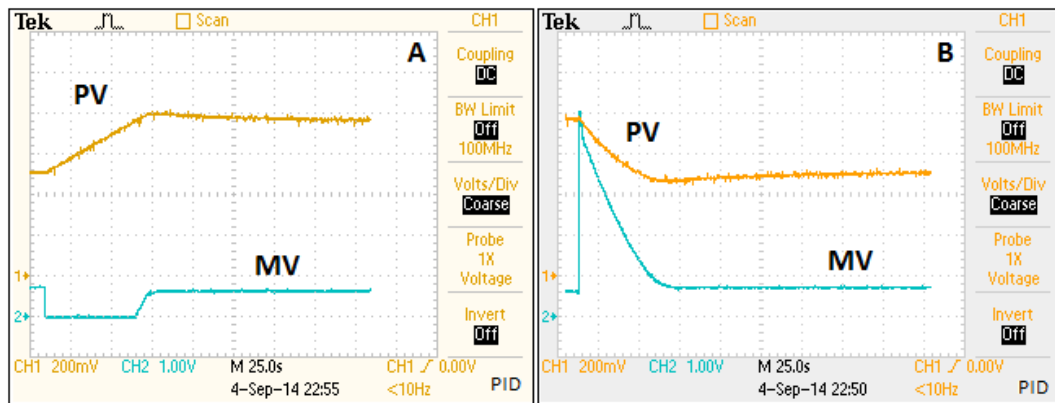


Figura 50: Controle PID baseado na FT1.

As figuras 49 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 10% a 15% e de 15% a 10% com o controlador em modo PID sintonizado com base na FT2.

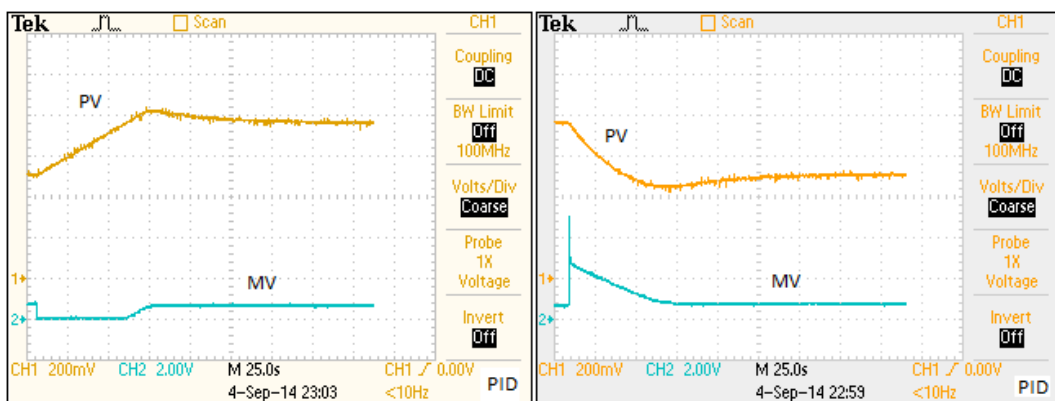


Figura 51: Controle PID Baseado na FT2.

As figuras 508 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 10% a 15% e de 15% a 10% com o controlador em modo PID com os parâmetros do ajuste fino.

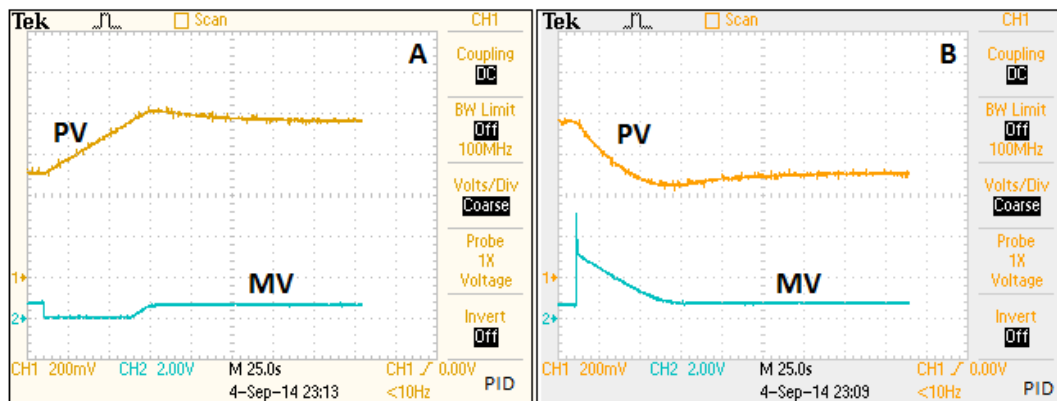


Figura 52: PID Ajustado, degrau de 5%.

As figuras 51 (A) e (B) apresentam as respostas aos degraus de 11% a 12% e de 12% a 11% com o controlador em modo PID com os parâmetros do ajuste fino.

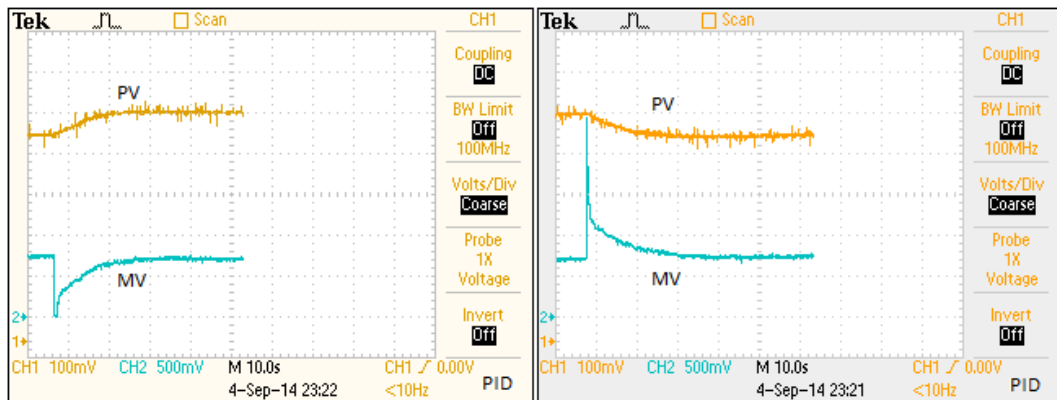


Figura 53: PID ajustado, degrau de 1%.

Os resultados reais obtidos foram ligeiramente diferentes dos resultados simulados, isso pode ser justificado pela não linearidade do sistema, pela saturação da MV e pela separação da FT1 e FT2.

Quando PV quando está subindo a dinâmica é diferente de quando está descendo. Nas simulações as dinâmicas foram testadas isoladamente, na prática, quando por exemplo há alguma oscilação na resposta, as dinâmicas estão mescladas.

4 CONCLUSÕES

A pressão nos sistemas de nitretação por plasma pode ser controlada utilizando como elemento final de controle uma válvula entre a câmara e a bomba geradora de vácuo.

Com um circuito eletrônico adequado, motores de passo podem efetuar o posicionamento de válvulas em malhas de controle PID.

Tanto o controlador em modo PI como em modo PID podem ser utilizados no controle da pressão em sistemas de nitretação por plasma, no entanto, com o controlador em modo PID a correção da variável do processo é mais rápida.

A função de transferência pode ser identificada com uma boa representatividade a partir da análise da resposta ao degrau em malha aberta.

A sintonia do controlador, com base nos critérios CHR apresentaram um resultado satisfatório no controle da pressão.

Os resultados práticos obtidos foram muito similares aos resultados simulados no Matlab as pequenas diferenças não foram relevantes a ponto de prejudicar o desempenho do projeto.

Foi verificado que um sistema real pode não ser linear na relação entre a PV e MV e que pode haver dinâmicas diferentes entre as respostas aos degraus positivo e negativo, ainda assim, é possível sintonizar o controlador para que atenda aos requisitos do processo de forma satisfatória, sendo as vezes necessário realizar um ajuste fino que pode ser feito sem dificuldades.

Quando há diferenças nas dinâmicas de respostas aos degraus positivo e negativo, se o controle for realizado com base na dinâmica mais lenta (FT2), pode haver alguma instabilidade, ou sobre sinal.

Se o controle for realizado com base na dinâmica mais rápida (FT1) o sobressinal será nulo, ou menor.

A solução de controle da pressão implantada satisfaz os objetivos iniciais deste trabalho: A variável do processo atinge o ponto de ajuste rapidamente e mantém o processo estável.

REFERÊNCIAS

ALVES JUNIOR, C. - **Nitretação a plasma - Fundamentos e Aplicações**. 1 ed. Natal: EDUFRRN, 2001

CAMPOS, Mario César M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. Controles típicos de equipamentos e processos industriais. São Paulo: Editora Blucher, 2006. 396p

CORDEIRO, Rafael Cavalcante. **Nitretação Iônica por Plasma Pulsado de Aços Inoxidáveis Duplex** – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

EKINCI, Ş. AKDEMIR, A. DEMIRCI, M. T. **Effect of surface Roughness off salt Bath Nitrided AISI 4140 to the Wear Rate**. 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey 16-18 May 2011.

FACCIN, Flávio, **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID** .2004. 124f.Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2004

IWASSE, Felipe. **Análise dos Arranjos Estruturais de Controladores Comerciais**. 2009. 50 f. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Automação industrial, UTFPR, Curitiba.

KOVACS, Willian; RUSSELL, Willian. **An introduction to ion nitriding: what is it? Why is it used? Where is it used?** Massachusetts, USA, 1995

NOVUS, **Controle PID Básico**, 2014. Disponível em:
<http://www.das.ufsc.br/~aarc/ensino/posgraduacao/DAS6613/PID_Novus.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2014.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 4.ed. São Paulo: Editora Pearson Education do Brasil, 2010.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PYE, D. **Practical Nitriding and ferritic Nitrocarburizing**. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2003.

SANTOS, Fábio, G. Dos; MAZZINI, Humberto M.; SOLZA, Bruno B. e; MELLOTTI, Gledson. **Métodos de sintonia de controladores PI/PID aplicados a um sistema de nível**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, X SBAI, São João Del Rei – MG, 2011.

STEBEL, Sergio Leandro. **Notas de aula de sintonia de controladores e estratégias de controle**. Especialização em Automação Industrial, Universidade Tecnológica do Paraná, 2013. Curitiba: 2013.

TECHCOMENTARY. **Ion nitriding Improve metallurgical properties and increase productivity using ion nitriding.** EPRI center for materials fabrication, Columbus Ohio, 1994.