



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

MYLLENA SYNGRED RAIMUNDO SANTANA

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE
NÍVEL BASEADAS EM ARDUINO, CONTROLE
PID E LABVIEW, SOB A ÓTICA DA PREVENÇÃO
DE ACIDENTES AMBIENTAIS**

Recife, 18 de Agosto de 2021

MYLLENA SYNGRED RAIMUNDO SANTANA

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE
NÍVEL BASEADAS EM ARDUINO, CONTROLE
PID E LABVIEW, SOB A ÓTICA DA PREVENÇÃO
DE ACIDENTES AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem Computacional

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima

Co-orientador: Prof. Dr. Hilário Jorge Bezerra de Lima Filho

Recife, 18 de Agosto de 2021

Ficha Catalográfica

Santana, M.S.R.

Análise de estratégias de controle de nível baseadas em Arduino, controle PID e LabVIEW, sob a ótica da prevenção de acidentes ambientais, 2021, 111 páginas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2021.

1. Controle de Processos.
2. Sintonia de controladores.
3. Controle PID.
4. Controle contínuo.
5. Controle Discreto.

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.
Centro de Ciências e Tecnologia.

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL BASEADAS EM ARDUINO, CONTROLE PID E LABVIEW, SOB A ÓTICA DA PREVENÇÃO DE ACIDENTES AMBIENTAIS

MYLLENA SYNGRED RAIMUNDO SANTANA

Examinadores:



Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP



Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Titular Interno)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP



Prof. Dr. Julierme Gomes Correia de Oliveira (Titular Externo)
Centro Universitário Boa Viagem - UniFBVWyden

Defendida em: 18/08/2021.

Coordenador (a): Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki

DEDICATÓRIA

A minha mãe, com todo carinho, afeto,
amor e toneladas de gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao universo, por toda a sua vasta imensidão e infinitas possibilidades, que me permitiram em umas dessas distintas possibilidades estar aqui hoje, conquistando mais um sonho com muito esforço e dedicação.

À minha mãe, que sempre acreditou em mim e incentivou-me a alçar voos cada vez mais altos. Eu te amo, mainha.

À minha irmã, por ser sempre minha maior apoiadora e um suporte incondicional em momentos difíceis.

À minha tia Valdenice, por sempre lembrar de mim, ser uma grande inspiração e me incentivar a ir além, apresentando esta incrível oportunidade de mestrado.

À minha vó Teresa, por seu amor incondicional e orgulho, e ao meu vô, que onde quer que esteja neste momento, espero estar fazendo-o se sentir orgulhoso da neta que ajudou a criar. Sinto sua falta, meu velho!

A todos aqueles familiares e amigos, que vibraram com todos os meus acertos e conquistas e me suportaram nos momentos difíceis.

A todos os meus professores e colegas, que dedicaram algum do seu tempo para emprestar-me um pouco de seu conhecimento e ajuda. Em especial, a Professora Clarissa Daisy que esteve comigo por boa parte do caminho. Aos queridos professores Marcos e Hilário pela orientação. E à Ricardo, por toda a paciência e auxílio nas práticas experimentais.

À Universidade Católica de Pernambuco e a coordenação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, por compartilhar comigo suas instalações, ferramentas e equipamentos de modo que eu pudesse conduzir com êxito minha pesquisa. Em especial, à coordenadora Galba Takaki por toda a sua fibra e suporte.

Por último e não menos importante, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e demais órgãos de fomento envolvidos, pela concessão da bolsa que permitiu-me chegar até este momento de entrega desta dissertação.

Por fim, a todos que sonham, deixo registrado em palavras que vale sim à pena acreditar no sonho que se tem.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 Monitoramento e controle de processos.....	18
3.1.1 Sistemas de controle.....	20
3.1.1.1 Tipos de Controle de Processo.....	21
3.1.1.1.1 Controle Discreto.....	21
3.1.1.1.2 Controle Contínuo.....	22
3.1.2 Estratégias de Controle de Processos: Convencionais e Modernas.....	24
3.1.2.1 Controle PID.....	25
3.1.2.1.1 Controle Proporcional (P).....	26
3.1.2.1.2 Controle Proporcional Integral (PI).....	28
3.1.2.1.3 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID).....	30
3.1.3 Sintonia de Controlador.....	32
3.1.3.1 Métodos de Sintonia de controlador.....	33
3.1.3.1.1 Sintonia em Malha Fechada pelo Método do Ganho Limite.....	33
3.1.3.1.2 Sintonia em Malha Aberta pelo Método da Curva de Reação.....	35
3.2 LabVIEW.....	38
3.3 Arduino.....	39
3.3.1 Arduino aplicado ao controle de processos.....	41
3.4 Monitoramento e Controle de Nível.....	42
3.4.1 Sensores de Nível.....	42

3.5 Controle de Nível Aplicado à Acidentes Ambientais.....	47
REFERÊNCIAS.....	50
CAPÍTULO II	53
Resumo.....	55
Introdução.....	56
Material e Métodos.....	57
Resultados e Discussão.....	63
Conclusão.....	69
Referências.....	69
CAPÍTULO III.....	72
Resumo.....	73
Introdução.....	73
Material e Métodos.....	74
Resultados e Discussão.....	82
Conclusão.....	95
Referências.....	96
CAPÍTULO IV.....	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
ANEXOS.....	101

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Esquema básico de uma indústria de processo.....	19
Figura 2 - Diagrama de Blocos de sistema por realimentação.....	20
Figura 3 - Circuito LCR e sua representação por Equação Diferencial: (a) Circuito LCR e (b) Equação Diferencial de Circuito LCR.....	21
Figura 4 - Sistema em malha aberta.....	22
Figura 5 - Sistema em malha fechada.....	23
Figura 6 - Modelo 40: Primeiro controlador PI.....	25
Figura 7 - Fulscope 100: Primeiro controlador PID.....	26
Figura 8 - Diagrama de blocos genérico da ação proporcional do controle PID.....	27
Figura 9 - Tendência de comportamento do controlador P ao aumento de K_p	28
Figura 10 - Diagrama de blocos genérico da ação proporcional-integral do controle PID.....	29
Figura 11 - Tendência de comportamento do controlador PI com K_p constante e variação de T_i	30
Figura 12 - Figura 12 – Diagrama de blocos genérico da ação proporcional-integral-derivativo do controle PID.....	31
Figura 13 – Curvas de resposta para controle P, PI e PID.....	32
Figura 14 – Aplicação de tentativa e erro para determinação do ganho crítico.....	34
Figura 15 – Curva de oscilação mantida para obtenção do período crítico.....	35
Figura 16 – Curva de Reação.....	36
Figura 17 - Método da aproximação para determinação de parâmetros através da curva de reação.....	37
Figura 18 - Diagrama de Blocos desenvolvido em LabVIEW.....	39
Figura 19 – Componentes da Placa Arduino UNO.....	39
Figura 20 – Pinagem da Placa Arduino UNO.....	40
Figura 21 - Cadeia de medição e atuação em nível de controle.....	43
Figura 22 - Atividades causadoras de acidentes ambientais atendidas pela CETESB entre os anos de 1978 e 2004.....	47
Figura 23 - Atividades causadoras de acidentes ambientais atendidas pela CETESB entre os anos de 1978 e 2004.....	48

CAPÍTULO II

Fig. 1. Planta Didática para controle de nível.....	58
Fig. 2. Representação lógica do sistema de controle de nível em Tela Block Diagram do LabVIEW.....	59
Fig. 3. Curva de oscilação mantida para obtenção do período crítico.....	60
Fig. 4. Curva de Reação.....	61
Fig. 5 – Método da aproximação para determinação de parâmetros através da curva de reação.....	62
Fig. 6. Gráfico de resposta do processo em oscilação mantida.....	63
Fig. 7. Gráfico de processo sob ação de controle PI sintonizado pelo método ganho limite.....	65
Fig. 8. Gráfico de processo sob ação de controle PID sintonizado pelo método ganho limite.....	65
Fig. 9. Curva de Reação do Sistema.....	66

Fig. 10. Gráfico de processo sob ação de controle PI sintonizado pelo método curva de reação.....	67
Fig. 11. Gráfico de processo sob ação de controle PID sintonizado pelo método curva de reação.....	68

CAPÍTULO III

Figura 1. Desenho técnico de planta didática de controle de nível: (a) Vista Frontal da planta e (b) Vista lateral direita da planta.....	74
Figura 2. Esquema de pinagem do Arduino Nano.....	77
Figura 3. Representação lógica do sistema de controle de nível em Tela Block Diagram do LabVIEW.....	77
Figura 4. Representação de fluxo de um sistema.....	78
Figura 5. Método de aproximação para determinação de parâmetros da curva de reação.....	79
Figura 6. Curva de Reação do sistema.....	83
Figura 7. Diagrama de Blocos da Planta didática de Controle de Nível.....	83
Figura 8. Curva Resposta do sistema: (a) Sintonizado pela Curva de Reação: Cohen e Coon; (b) Sintonizado pela Curva de Reação: Ziegler e Nichols e (c) Sintonizado pelo Ganho Limite: Ziegler e Nichols	84
Figura 9. Controle PI de nível sintonizado pela Curva de Reação de Cohen e Coon: (a) Sistema em estabilidade (Sintonia CC); (b) Perturbação superior de 25% (Sintonia CC); (c) Resposta à perturbação 25% (Sintonia CC); (d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial (Sintonia CC) e (e) Resposta do retorno ao SP inicial (Sintonia CC).....	86
Figura 10. Controle PI de nível sintonizado pela Curva de Reação de Ziegler e Nichols: (a) Sistema em estabilidade (Sintonia ZN); (b) Perturbação superior de 25% (Sintonia ZN); (c) Resposta à perturbação 25% (Sintonia ZN); (d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial (Sintonia ZN) e (e) Resposta do retorno ao SP inicial (Sintonia ZN).....	88
Figura 11. Controle PI de nível sintonizado pelo Ganho Limite de Ziegler e Nichols: (a) Sistema em estabilidade; (b) Perturbação superior de 25%; (c) Resposta à perturbação 25%; (d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial e (e) Resposta do retorno ao SP inicial.....	90
Figura 12. Controle PID sintonizado pelo método Ganho Limite: (a) Controle PID sem ajuste fino e (b) Controle PID com ajuste fino.....	93

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Classificação das estratégias de controle de processo de acordo com seu grau de aplicação na indústria.....	24
Tabela 2 - Método Ziegler e Nichols para Ganho Limite.....	35
Tabela 3 – Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação.....	37
Tabela 4 – Método Cohen e Coon para Curva de Reação.....	38

CAPÍTULO II

Tab. 1. Método Ziegler e Nichols do Ganho Limite.....	61
Tab. 2. Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação.....	63
Tab. 3. Parâmetros de ajuste experimental obtidos pelo método do ganho Limite.....	64
Tab. 4. Parâmetros de sintonia do controlador em malha fechada.....	64
Tab. 5. Parâmetros de sintonia obtidos pela curva de reação.....	67

CAPÍTULO III

Tabela 1. Método Ziegler e Nichols para Ganho Limite	80
Tabela 2. Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação.....	81
Tabela 3. Método Cohen e Coon para Curva de Reação.....	81
Tabela 4. Parâmetros de ajuste para sintonia do controlador.....	84
Tabela 5. Parâmetros de sintonia obtidos pelo Ganho Limite para controle PID.....	92

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO I

Quadro 1 - Noções básicas de Controle de Processos.....	18
Quadro 2 - Classificação de sensores quanto à estímulos e saídas.....	43
Quadro 3 - Tipos e aplicações de sensores de nível de líquido.....	45

...

RESUMO

O controle de processos é uma ação primordial para garantir a maior eficiência dos sistemas e a qualidade do produto final. Estima-se que mais de 90% dos sistemas de controle utilizados na indústria atualmente sejam do tipo PID, sendo a sua maior parcela, controladores do tipo PI. Conhecendo a importância e necessidade do controle de nível nos processos, uma vez, que este tipo de variável interfere diretamente na qualidade do processo e produto, e até na segurança da fabricação, este trabalho buscou analisar estratégias de controle de nível baseadas em controle PI, utilizando LabVIEW e Arduino, em uma planta didática de controle de nível. Para tal, foi determinada experimentalmente a função de transferência da planta didática, simulado seu comportamento em diferentes parâmetros de ajuste PID através do software Scilab, aplicando-se experimentalmente diferentes métodos de sintonia do controlador e determinado qual método oferecia melhor eficiência ao sistema de controle e por fim, identificado a quais tipos de processos a estratégia proposta poderia ser aplicada. A aplicação dos diferentes métodos de sintonia se mostraram promissoras, uma vez que todas demonstraram potencial de aplicação real. A determinação da função de transferência da planta didática utilizada foi feita considerando-a de maneira linear, retornando uma função de transferência de primeira ordem com um tempo de retardo. Foi possível elaborar o diagrama de blocos e simular o comportamento do sistema através do software Scilab que demonstrou prever, de forma satisfatória o comportamento do sistema. O sistema de controle PI sintonizado pelo método do Ganho Limite demonstrou ligeira superioridade em relação aos demais métodos de sintonia, tendo sua aplicação indicada para processos de reposição/alimentação de matéria-prima, manutenção de condições pré-determinadas de fabricação, entre outras. Foi identificado a importância do controle de nível na prevenção de acidentes ambientais.

Palavras-chave: Controle de processos. Sistemas de controle. Sintonia do controlador. Controle PID.

ABSTRACT

Process control is a key action to ensure greater system efficiency and the quality of the final product. It is estimated that more than 90% of the control systems used in the industry today are of the PID type, with the largest portion being PI type controllers. Knowing the importance and need for level control in processes, since this type of variable directly interferes in the quality of the process and product, and even in manufacturing safety, this work sought to analyze level control strategies based on PI control, using LabVIEW and Arduino, in a didactic level control plan. To this end, the transfer function of the didactic plant was experimentally determined, its behavior was simulated in different PID adjustment parameters through the Scilab software, experimentally applying different controller tuning methods and determined which method offered the best efficiency to the control system and finally, identifying which types of processes the proposed strategy could be applied to. The application of different tuning methods proved to be promising, since all of them showed real application potential. The determination of the transfer function of the didactic plan used was made considering it linearly, returning a first order transfer function with a delay time. It was possible to prepare the block diagram and simulate the behavior of the system through the Scilab software, which proved to satisfactorily predict the behavior of the system. The PI control system tuned by the Gain Limit method showed a slight superiority in relation to other tuning methods, having its application indicated for replacement/feeding processes of raw material, maintenance of predetermined manufacturing conditions, among others. The importance of level control in preventing environmental accidents was identified.

Keywords: Process control. Control system. Tuning of the controller. PID Control.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O homem desde os seus primórdios desenvolve mecanismos que facilitem ou melhorem suas tarefas, desde as tarefas mais simples do lar até as mais complexas de produção e subsistência. O homem aprendeu a utilizar o fogo, criou armas para caça, inventou a roda, uniu elementos que gerassem força motriz, entendeu os processos fermentativos e assim seguiu uma história de evolução passando por revoluções industriais e chegando a grande última Revolução já na era digital, onde a grande premissa parte da necessidade de integração de todos os mecanismos de uma cadeia (LAMB, 2015; SILVA et al., 2020).

Em 2011 o mundo deparou-se com o que seria os primeiros passos da identificação da Revolução Digital, comumente conhecida como Indústria 4.0. Em Hannover, o governo alemão anuncia a *Industrie 4.0* como parte da estratégia de transformar a indústria do país em uma indústria movida por tecnologia de ponta, sendo o intuito principal criar redes globais onde; máquinas, equipamentos, dispositivos, sistemas de armazenamento, plantas fabris como um todo, entre outros, estejam conectadas formando sistemas físicos-cibernéticos (PERKEL, 2017; DOMINGUES, 2020)

Sistemas físico-cibernéticos são tidos como a base da revolução digital por permitir tomada de decisão autônoma, sistemas auto geridos, aprendizado contínuo, compartilhamento de dados úteis entre sistemas de forma quase que instantânea e tomada de decisões de forma independente. Uma parte imprescindível da Indústria 4.0 é o monitoramento e controle dos processos, uma vez que decisões autônomas são baseadas em uma análise de dados contínua, que permita o reconhecimento de padrões para que a ação tomada seja inteligente (GARCIA, 2019; DOMINGUES, 2020).

O monitoramento e controle de processos não são atividades recentes em processos produtivos, em seus primórdios eram realizados pelo próprio homem, que era encarregado de averiguar cada variável do processo que necessitasse de algum tipo de controle para garantir que o produto final atenderia as expectativas da fabricação (SILVA et al., 2020). Foi em 1940, com o surgimento de instrumentos pneumáticos, que esse tipo de atividade pode ser realizada de forma automatizada, continuando com a evolução através de instrumentos eletrônicos, e nos dias de hoje podendo ser realizadas através de instrumentos computadorizados (GARCIA JUNIOR, 2019).

Garantir que um produto final tenha as especificações necessárias do projeto, que o processo mantenha as condições especificadas, reduzir o tempo de produção, reduzir o custo de produção, aumentar a eficiência dos processos, aumentar a produtividade e até mesmo a qualidade dos produtos, são alguns dos benefícios provenientes do monitoramento e controle de

processos (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013; GARCIA, 2019). Estima-se que hoje, mais de 90% do controle de processos industriais é feito por estratégias convencionais de controle, denotando à uma frequente necessidade de se buscar maneiras de aumentar a efetividade dessas estratégias (PANDA, 2012; GARCIA, 2019).

Os benefícios relacionados ao monitoramento e controle de processos vão além dos ganhos produtivos e se aplicam também à segurança. Acidentes industriais relacionados à falha de processos, controle, erro humano, e outros fatores, podem gerar não só grandes perdas de vida humana, como consequências devastadoras para o meio ambiente afetado, uma vez que a indústria, de uma forma geral, detém processos que aplicam matéria-prima e seus derivados em diferentes estados e sob diferentes condições com alta possibilidade contaminante e de geração de perigo à vida humana e ao meio ambiente como um todo (DEMUNER et al., 2015; FREITAS, 2021).

O nível de fluido é uma das variáveis mais comum em processos, podendo ser encontrado em processos desde escala de bancada até industrial. Na indústria, o controle de nível é aplicado à substâncias inofensivas, como a água, como também, à substâncias com alto risco de contaminação, como: Petróleo, óleos, gás, etc. É o tipo de variável que se não for controlada, pode tanto imputar ao sistema grandes perdas, impossibilitando o processo (transbordamento, falta de abastecimento/reabastecimento); como causar graves acidentes, por isso, apesar de muitas das suas aplicações serem simples, faz-se extremamente necessária estratégias de controle de nível que possam ser utilizadas nos mais diferentes processos e de maneira eficiente e confiável (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016; BATISTA; MENEGHETTI, 2018; FREITAS, 2021).

Entendendo a importância do monitoramento e controle de processos, sobretudo, a necessidade de controles de níveis confiáveis e que se adaptem a necessidade dos processos oferecendo segurança na prevenção de acidentes com alta possibilidade de riscos ambientais, este trabalho se propõe a desenvolver e avaliar estratégias de controle de nível aplicáveis à processos, utilizando controle PID baseado em Arduino e LabVIEW.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar estratégias de controle de nível aplicáveis à processos industriais utilizando controle PID baseado em Arduino e LabVIEW.

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar método de sintonia por malha aberta de Ziegler e Nichols, método da Curva de Reação à planta didática de controle de nível;
- Aplicar método de sintonia por malha aberta de Cohen e Coon, método da Curva de Reação à planta didática de controle de nível;
- Aplicar método de sintonia por malha fechada de Ziegler e Nichols, método do Ganho Limite à planta didática de controle de nível;
- Determinar a função de transferência da planta didática de controle de nível através do método da Curva de Reação;
- Identificar o Diagrama de Blocos do sistema de controle de nível;
- Simular o comportamento da Planta de controle de nível, através do Software Scilab, sob a ação de diferentes ajustes de sintonia do controlador;
- Discutir qual o método de sintonia do controlador demonstrou maior adequação para o controle da planta didática de controle de nível;
- Justificar as estratégias propostas como solução para problemas reais da indústria.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Monitoramento e Controle de Processos

O monitoramento de processos é fator inerente ao controle de processos. Só é possível agir sob um sistema de forma ágil com intuito de controlá-lo se houver, de forma contínua, um acompanhamento das variáveis de interesse. O monitoramento visa verificar a todo momento e de forma continuada, se as variáveis de um processo estão de acordo com os parâmetros pré-definidos para tal. Os parâmetros definidos para o controle devem corresponder ao produto final que se espera extrair do processo (GEROMEL; KOROGUI, 2019).

A aplicação do controle de processos tem como intuito principal a manutenção dos valores das variáveis do processo em níveis ideais – ou o mais próximo do ideal –, dessa forma, fazendo com que as variáveis interajam seguindo a ordenação necessária para esta finalidade, sendo assim, a adoção da estratégia de controle para cada tipo de processo, deve levar em consideração, quando, como e quanto cada variável deve se comportar para permitir ou manter o melhor rendimento do sistema (GARCIA, 2018). No Quadro 1 é possível encontrar noções básicas à cerca do controle de processos.

Quadro 1 – Noções básicas de Controle de Processos

NOÇÃO BÁSICA	DEFINIÇÃO
Variável controlada	Entende-se como a condição que se deseja manter de determinada variável dentro do processo.
Set point (SP)	Entende-se como o parâmetro que será utilizado como referência para cada variável
Variável manipulada	Entende-se como variáveis que são manipuladas com a finalidade de influenciar diretamente a variável controlada. Em sistemas complexos, podem haver mais variáveis controladas que manipuladas.
Sistema	Entende-se como um conjunto de elementos (máquinas, instrumentos, equipamentos) que atuam de forma interdependente e organizada para uma finalidade em comum.
Processo	Entende-se como processo uma ação, ou sequência de ações que acontecem de forma ordenada com um objetivo em comum.

Continua...

Quadro 1 – Noções básicas de Controle de Processos (continuação)

Planta	Entende-se como um conjunto de máquinas e equipamentos que trabalham de forma conjunta a fim de permitir uma operação.
Ruído	Entende-se qualquer estímulo interno ou externo ao processo/sistema que possa afetar, de maneira adversam a variável controlada
Desvio	Entende-se como a diferença entre o Set Point e a variável controlada
Ganho	Entende-se como o resultado do quociente entre a taxa de mudança da saída e a taxa de mudança da entrada, sendo a taxa de mudança da entrada que causou a mudança em si.

Fonte: Autoria Própria (2021)

O controle de processos acontece de forma corriqueira em processos industriais nos mais diversos segmentos de indústrias, como: Papel e celulose, petróleo e gás, naval (propulsão), alimentícia, farmacêutica, metalúrgica, têxtil, mineração e cimento, siderúrgica, química e petroquímica, nuclear e até de tratamento de água e efluentes (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). Na Figura 1, é possível encontrar um esquema básico do funcionamento de indústrias.

Figura 1 – Esquema básico de uma indústria de processo



Fonte: Garcia (2018)

Nesses inúmeros segmentos de indústrias, é bem quisto o controle de diferentes variáveis, tais quais, como: pressão, temperatura, nível, pH, densidade, peso, vazão, condutividade, composição de matéria, entre outros (GRANELL, 2015; AHMED, 2016). As variáveis controladas dependerão diretamente do que se espera como produto final. Porém, o controle de processos rompe a barreira industrial e também é aplicado na manufatura, sistemas

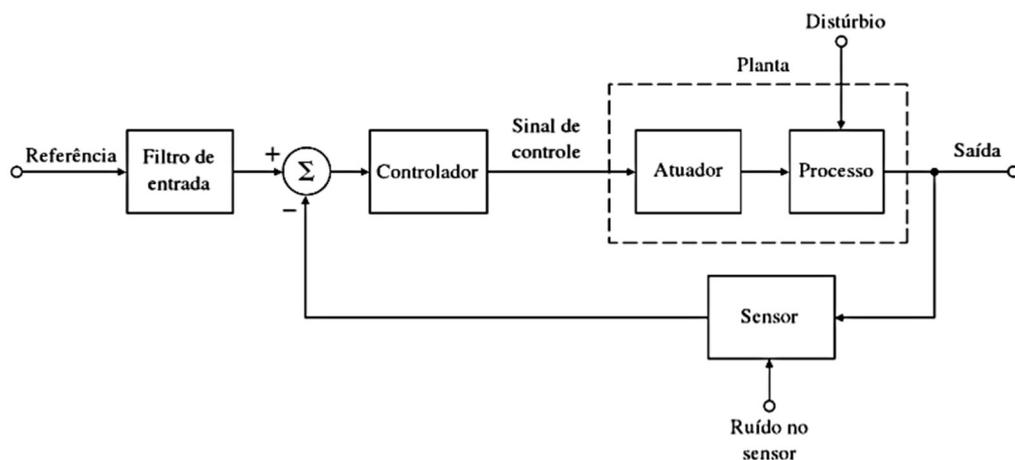
elétricos, sistemas de transportes, controle embarcado e até na automação de serviços (GARCIA JUNIOR, 2019).

A adoção do controle de processos se baseia na necessidade das indústrias de manter um certo padrão no produto. Confiar apenas na ação humana para este fim faz com que não haja um grau de confiabilidade desejável no processo, uma vez que o ser humano é passível de erro. Com o controle, além de manter as variáveis o mais próximo possível do ideal pelo maior tempo determinado, é possível também, minimizar ruídos internos e externos. O retorno, são processos mais confiáveis, maior qualidade do produto, padronização, diminuição de erros, economia, e muitos outros (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013; GARCIA, 2019).

3.1.1 Sistemas de controle

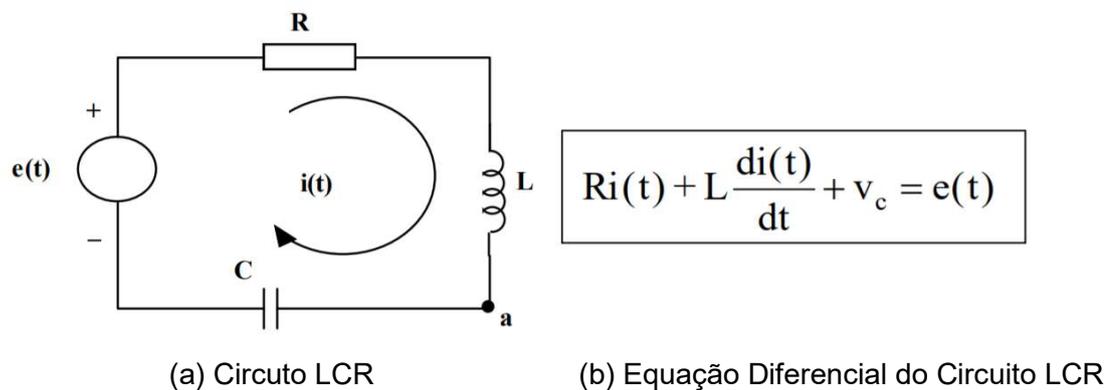
Pode-se considerar que um sistema de controle é um conjunto de componentes que trabalham de forma ordenada e interdependente com a finalidade de manter o processo de acordo com os parâmetros desejados. Há diversas maneiras de representar os sistemas de controle, sendo os principais: Diagramas de blocos e Equações diferenciais (GEORGINI, 2018; GEROMEL; KOROGUI, 2019). Na Figura 2, é possível encontrar um diagrama de blocos que representa os componentes de um certo sistema realimentado, já na Figura 3, a equação diferencial (b) que representa o sistema RLC (a):

Figura 2 – Diagrama de Blocos de sistema por realimentação



Fonte: Franklin; Powell; Emami-Naeini (2013)

Figura 3 – Circuito LCR e sua representação por Equação Diferencial



Fonte: Ogata (2015)

É importante salientar que cada componente é expresso de forma matemática, sendo assim, a análise e determinação do desempenho de um sistema, irá depender diretamente da facilidade de compreender matematicamente cada um dos seus componentes. Para que o sistema seja representado no domínio da frequência, é preciso utilizar a Transformada de LaPlace, dessa forma, permitindo a obtenção da Função de Transferência do sistema (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013; PENEDO, 2014; GEROMEL; KOROGUI, 2019).

3.1.1.1 Tipos de Controle de Processo

Uma das formas mais comuns de classificar os sistemas de controle é, como: Controle discreto e Controle contínuo. A diferença entre esses sistemas está na possibilidade de assumir valores variados de controle durante a ação em si. Enquanto o controle contínuo assume diversos valores ao longo do tempo, o controle discreto poderá assumir apenas um valor entre um número finito de valores (BEGA, 2011; GARCIA, 2018).

3.1.1.1.1 Controle Discreto

A característica principal do controle discreto é o pequeno universo de valores que as variáveis podem assumir. Sendo, no geral, apenas dois valores (ligado, desligado; aberto, fechado), o que caracteriza o controle discreto como binário. Há a possibilidade de existir um universo maior de valores que podem ser assumidos no controle discreto, como uma sequência de valores, porém, é inerente ao controle assumir um valor inteiro por vez. Sendo assim, é correto afirmar que a variável controlada oscila dentro do processo, seguindo frequência e amplitude desejadas (OSCAR, 2016; GARCIA, 2018).

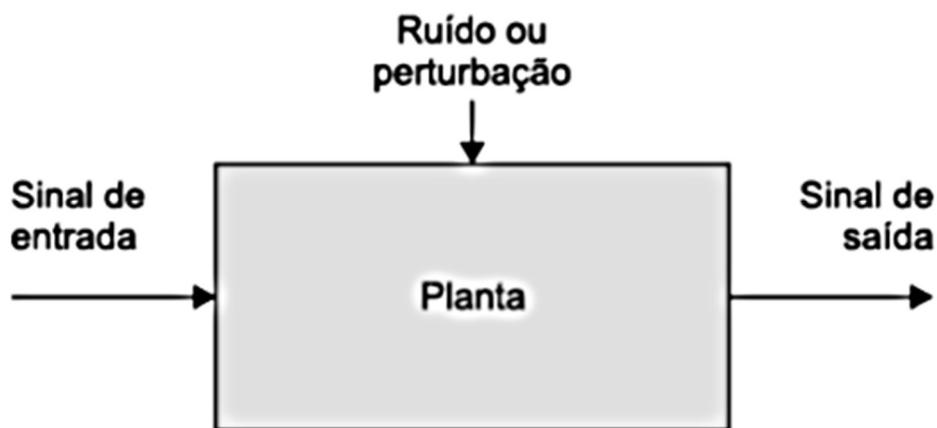
3.1.1.1.2 Controle Contínuo

Enquanto comumente as variáveis dos controles discretos podem assumir um entre dois valores, no controle contínuo é possível assumir qualquer valor que esteja entre um valor mínimo e máximo do sistema. Esta dinâmica permite com que a variável controlada não oscile, mas sim, permaneça o mais próximo possível do set point definido, como resultado do controle sob a variável manipulada. Podemos classificar dois tipos de controles contínuos mais conhecidos: Controle em malha aberta e Controle em malha fechada (BEGA, 2011).

- Controle em Malha Aberta

A característica principal do controle de malha aberta é o fato da saída não influenciar na ação do controle. Os parâmetros de entradas são fixos e imputados ao sistema sob qualquer condição. Sendo assim, uma vez que o valor de saída não influencia no controle, as perturbações no processo não são levadas em consideração uma vez que não são percebidas, fazendo com que haja a possibilidade de alterações bruscas no sistema em casos de ruídos. É indicado a utilização do controle em malha aberta apenas para sistemas com processos bem conhecidos e que não possuam altos riscos de perturbações (BEGA, 2011; PENEDO, 2014; GARCIA, 2018). Na Figura 4 é possível ver uma representação genérica do funcionamento de um controle de malha aberta.

Figura 4 – Sistema em malha aberta

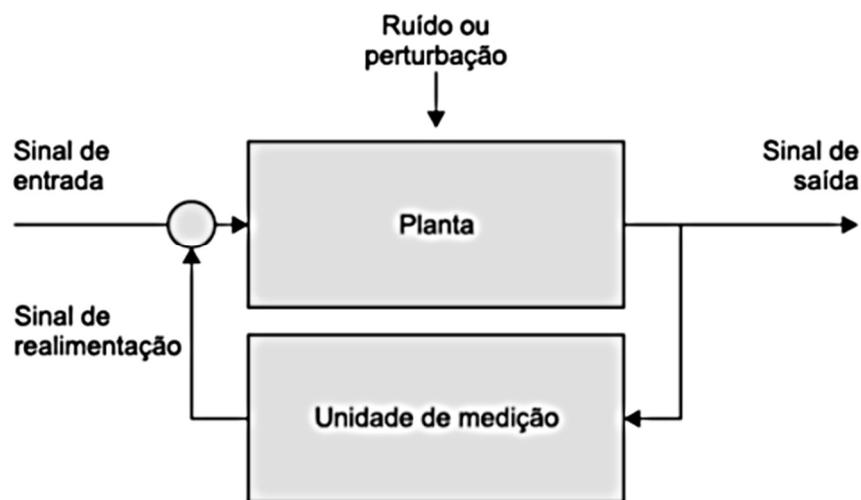


Fonte: Penedo (2014)

- Controle em Malha Fechada

Ao contrário do que se vê no controle de malha aberta, no controle de malha fechada a saída tem ação direta no controle. O sinal de saída (ou uma fração do sinal de saída) é comparado ao valor de referência, a diferença entre ambos é chamada de erro, e é esse valor de diferença (erro) que é lido pelo controlador, que por sua vez o utiliza para ajustar a saída (encontrar o valor equivalente ao valor necessário da saída entre os valores mínimos e máximos do sistema) e manter a variável controlada o mais próximo do valor de referência (GEROMEL; KOROGUI, 2019). Na Figura 5 está a representação genérica de um sistema em malha fechada.

Figura 5 – Sistema em malha fechada



Fonte: Penedo (2014)

Podemos considerar dois tipos de controle em malha fechada: Realimentação (*feedback*) e Pré-alimentação (*feedforward*).

- Realimentação (*feedback*): Nesse controle, o ajuste do controlador é feito apenas após o erro ser concretizado, ou seja, o controlador recebe o valor do erro e atua sobre ele corrigindo-o (GARCIA, 2018).
- Pré-alimentação (*feedforward*): Nesse controle, o ajuste do erro antecipa a própria saída, dessa forma, minimizando o erro em si. Isso implica dizer que antes da constatação do erro, o controlador já age de modo a minimizá-lo. Este tipo de controle só é possível quando o processo é conhecido através de um modelo previamente identificado (OGATA, 2015).

3.1.2 Estratégias de Controle de Processos: Convencionais e Modernas

Estratégias de controle nada mais são do que os métodos empregados no sistema em questão com a finalidade de monitorá-lo e controlá-lo. Na Tabela 1, encontramos a classificação das estratégias de controle de acordo com a sua aplicação na indústria, segundo Garcia (2019):

Tabela 1 – Classificação das estratégias de controle de processo de acordo com seu grau de aplicação na indústria

Estratégias de controle de processos	Classificação
Controle manual Controle on-off Controle PID Controle de razão ou relação Controle em cascata Controle por pré-alimentação	Categoria I Controles convencionais
Escalonamento de ganho Compensação de tempo morto Controle seletivo/ <i>override</i> Controle multivariável por desacoplamento	Categoria II Controle avançado: técnicas clássicas
Controle preditivo baseado em modelo Controle estatístico de qualidade Controle por modelo interno Controle adaptativo	Categoria III Controle avançado: técnicas amplamente utilizadas
Controle ótimo (<i>LGQ – Linear quadratic Gaussian</i>) Sistemas especialistas Controle não linear Controles baseados em redes neurais Controle nebuloso (<i>Fuzzy</i>)	Categoria IV Controle avançado: Técnicas mais novas, com algumas aplicações na indústria
Técnicas de controle robusto H_ _∞ Síntese M	Categoria V Controle avançado: Estratégias propostas com pouquíssimas aplicações industriais

Fonte: Adaptado de Garcia (2019)

Cada processo demanda uma ou mais estratégias de controle e para definir qual estratégia ideal é preciso entender a complexidade do controle necessário para esse processo. Observando a Tabela 1, percebe-se que 4 (quatro) das 5 (cinco) categorias de controle são controles avançados, porém, apesar do número de estratégias modernas (avançadas) serem maiores do que o de estratégias convencionais, ainda hoje, mais de 90% das malhas de controle são compostas por estratégias convencionais. Isso se dá devido a necessidade da Indústria,

uma vez que a maioria dos processos que demandam controle são simples e resolvidos com este tipo de estratégia (OGATA, 2015; GARCIA, 2019).

O uso de estratégias avançadas se justifica em processos com problemas difíceis que vão além do know-how das estratégias convencionais, logo, estas não desempenhariam o controle com a eficiência necessária, ou apenas não desempenhariam o controle. Atualmente, a maior parte dos problemas de controle podem ser resolvido com a estratégia convencional de controle PI (Proporcional-Integral) ou PID (Proporcional-Integral-Derivativo) (GARCIA, 2019).

3.1.2.1 Controle PID

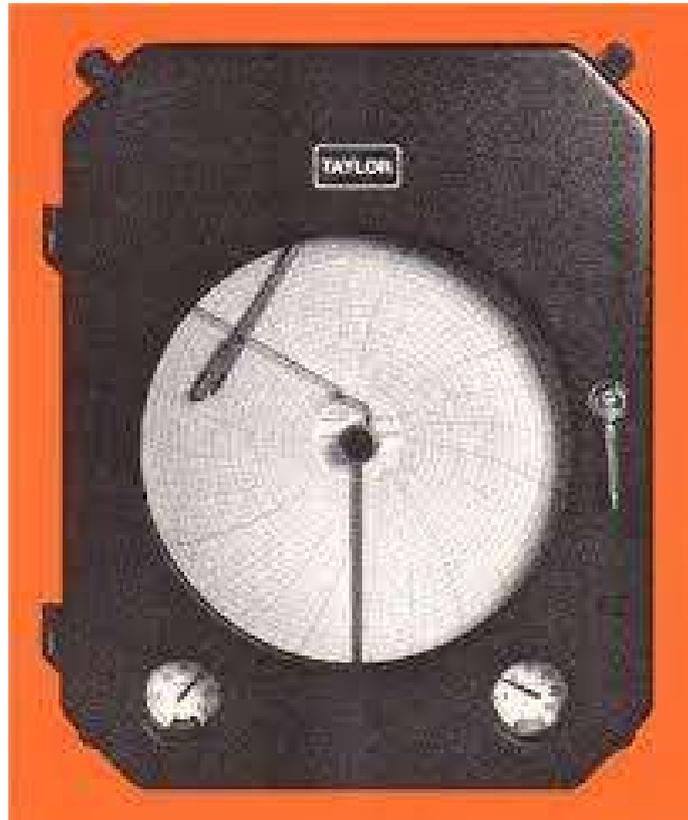
Entre 1933 e 1935 os primeiros controladores proporcional e proporcional-integral foram apresentados ao mundo, respectivamente, através dos modelos Fulscope 56R da empresa Taylor Instrument Company e do modelo 40 da Foxboro Company. E foi com o modelo Fulscope 100, da Taylor Instrument Company, que o primeiro controlador proporcional-integral-derivativo foi desenvolvido (PANDA, 2012; FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). Nas Figuras 6 e 7, é possível encontrar registros destes primeiros controladores.

Figura 6 – Modelo 40: Primeiro controlador PI



Fonte: Bennett (1993)

Figura 7 – Fulscope 100: Primeiro controlador PID



Fonte: ABB Kent-Taylor (1945)

A sigla PID significa Proporcional, Integral e Derivativo. Controladores PID são largamente utilizados em processos industriais, uma vez que resolvem a grande maioria dos problemas simples da Indústria. A ação proporcional no controle é a chave, a ação básica, que busca associar e aferir ao sistema correção proporcional ao erro, a função integral é de diminuir/erradicar desvios e a função derivativa, busca diminuir as oscilações no processo (PANDA, 2012; GARCIA, 2018).

3.1.2.1.1 Controle Proporcional (P)

Ao falar de controle proporcional, entende-se que a correção a ser feita pelo controlador no processo será proporcional ao erro. Logo, quanto mais o valor real do processo se afasta do set-point, maior será a proporção da ação de correção do controle no sistema, e quanto mais próximo o valor real do processo for, em relação ao set-point, menor será a correção (PENEDO, 2014; OGATA, 2015). Essa relação entre o sinal de saída do sistema e o erro, é definida pela Equação 1 (função proporcional):

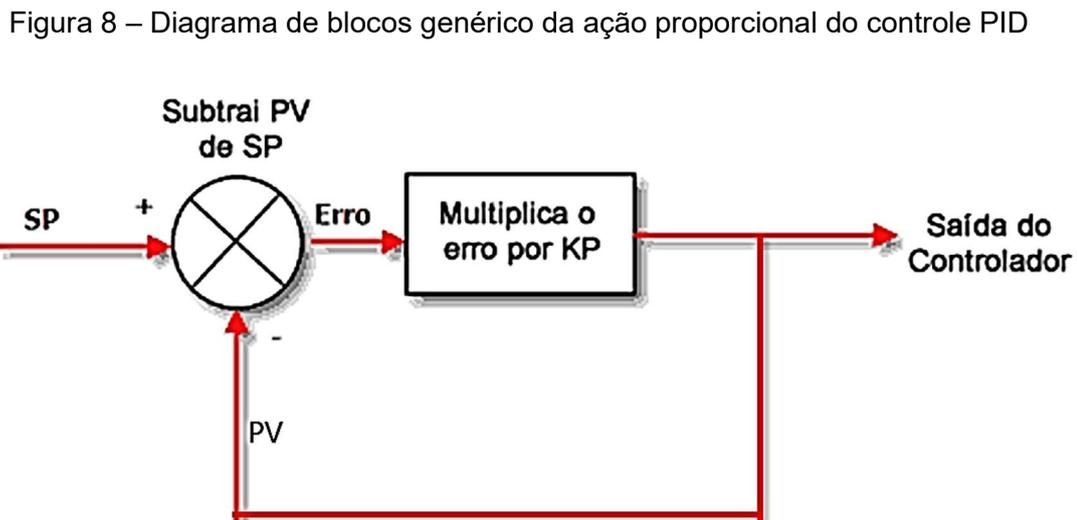
$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

Onde $u(t)$ é tido como a saída do controlador; K_p , o ganho proporcional que tem como função definir a proporção da variação em relação ao erro; e $e(t)$, que trata-se do erro, ou seja, o quanto a variável manipulada está em desacordo com o set-point, dessa forma, $e(t)$ também pode ser encontrado pela Equação 2:

$$e(t) = y_{sp} - y_t \quad (2)$$

Onde, y_{sp} é o set point e y_t a saída do sistema.

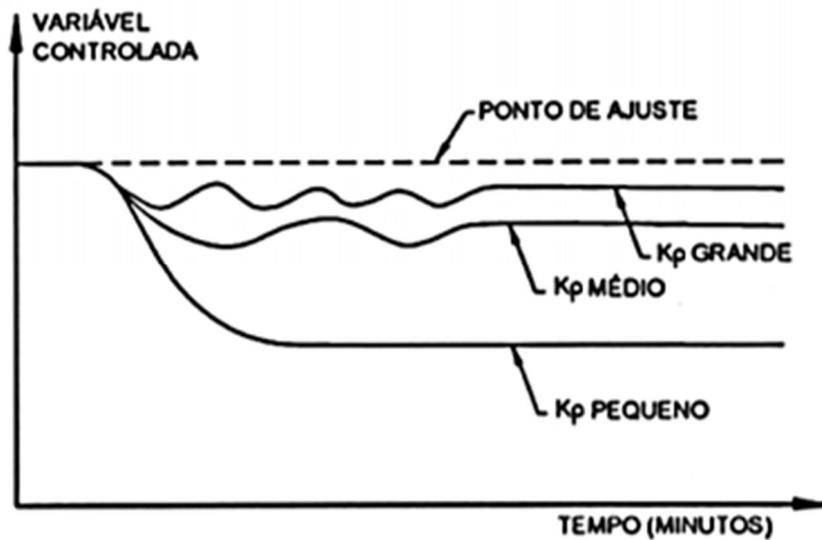
Na Figura 8 é possível encontrar o diagrama de blocos simplificado para o controle proporcional de um sistema genérico.



Fonte: Modificado de Silveira (2016)

No controle proporcional é comum a ocorrência do erro estacionário, este erro pode estar atribuído a uma perturbação constante na saída ou até a não recuperação do sistema na mudança do set point. Este erro pode ser eliminado com uso da ação integral (PI), porém, em alguns sistemas puramente proporcionais, o aumento de K_p pode ser suficiente para diminuir o erro. É preciso abalizar, uma vez que valores altos de K_p , podem impor ao sistema grandes oscilações (BEGA, 2011; OGATA, 2015). Na Figura 9, esta tendência de comportamento do sistema de controle proporcional com o aumento do ganho, pode ser vista.

Figura 9 – Tendência de comportamento do controlador P ao aumento de K_p



Fonte: Bega (2011)

Mesmo com o erro estacionário sendo uma característica do controlador proporcional, ele ainda pode ser utilizado em processos industriais, sobretudo aqueles que não necessitam que o sistema permaneça em um set point exato mas trabalhe bem (sem grandes perdas) com valores aproximados. Vale salientar, que o controle proporcional é o único que pode resolver isoladamente problemas reais, enquanto o integral e o derivativo precisam estar associados para que possam ser empregados, podendo ser encontrados na forma de controles: PI, PD e PID (GARCIA, 2018).

3.1.2.1.2 Controle Proporcional Integral (PI)

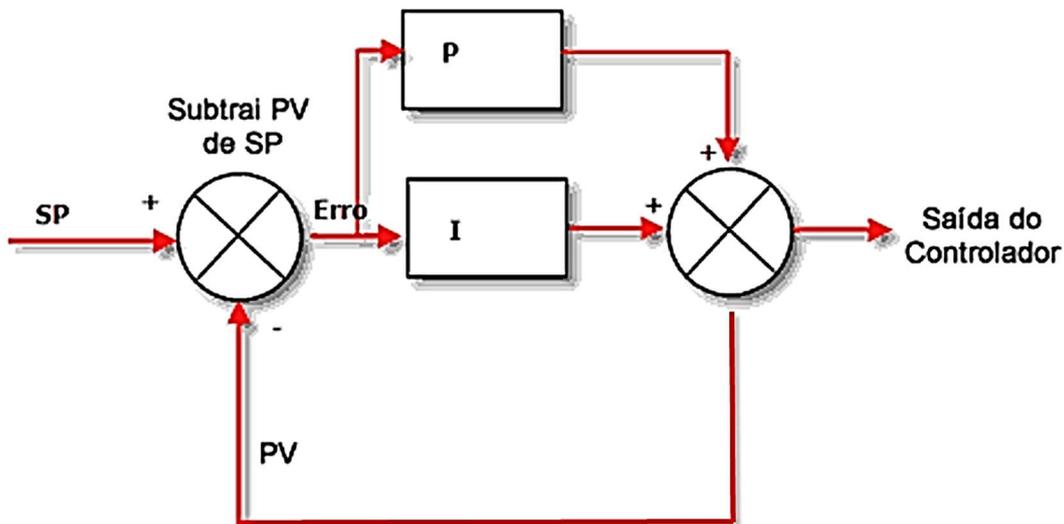
A ação integral traz para o sistema a variável tempo, onde a partir da sua implementação a correção do erro passa a ser proporcional à taxa de ocorrência do erro, e não mais proporcional ao erro puramente. De forma prática, a ação integral não é utilizada de forma isolada (apenas em combinação com a ação proporcional ou proporcional derivativa) uma vez que a mesma, isoladamente, não teria condição de responder satisfatoriamente ao sistema. O Controle proporcional integral, como o próprio nome já evidencia, é a combinação da ação proporcional do controle com a ação integral. O atributo principal da ação integral é a eliminação do erro no controle (OGATA, 2015). Considerando o sinal de saída como integral do erro e em função do erro, têm-se a Equação 3:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3)$$

Onde T_i é o tempo integral. A ação integral é dada pelo ganho integral, enquanto o tempo integral é tido pelo inverso do ganho integral, podendo entender, dessa forma, que a ação integral objetiva corrigir a variável manipulada em um intervalo regular, logo, o tempo integral corresponde ao tempo deste intervalo.

Em um controle proporcional, se o sistema é mantido exatamente igual ao set point, o erro (e) será considerado nulo, logo, a saída (u) também seria nula, uma vez que está em função proporcional do erro (e). Considerando um sistema que atingiu o set point e se faz necessário que o mesmo permaneça neste valor, não há aplicação possível para o controle proporcional, sendo necessário a ação integral, uma vez que a saída (u) passa a variar em função do tempo enquanto o erro (e) for diferente de 0, logo, a saída (u) se tornará constante quando o $e=0$ (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). Na Figura 10, está representado o diagrama de blocos para um sistema genérico atuando em controle PI em malha fechada.

Figura 10 – Diagrama de blocos genérico da ação proporcional-integral do controle PID

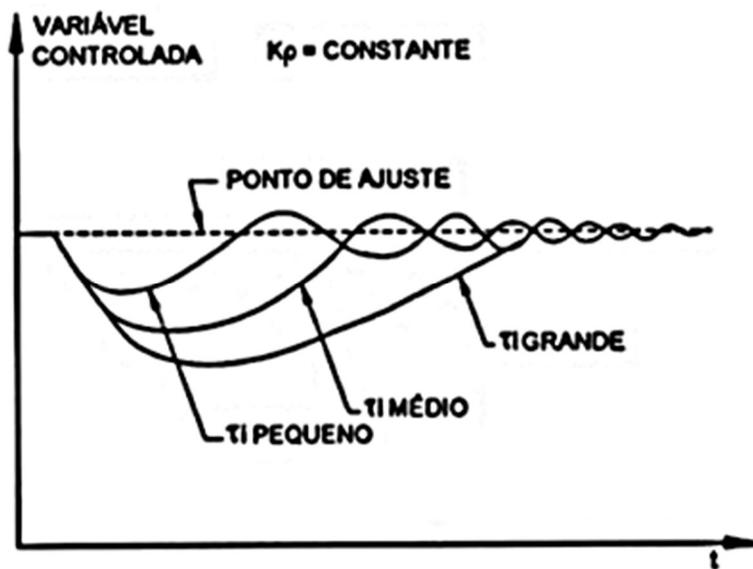


Fonte: Modificado de Silveira (2016)

Com a ação integral no controle PI, o sistema se comporta em prol da eliminação do erro, para que isso aconteça, um K_p ideal precisa ser aplicado e a variação passa a acontecer em T_i , a Figura 11, apresenta uma tendência de comportamento de um sistema em malha fechada, com K_p constante e variação de T_i . Nota-se que para um valor de T_i grande, o tempo de estabilização do sistema é maior, ou seja, demora-se mais tempo para que o sistema se iguale ao valor de

referência, enquanto para T_i pequeno pode se causar um excesso de correção, esse comportamento é justificado pelo fato da ação integral ser inversamente proporcional ao tempo integral (T_i) em si, uma vez que o tempo integral denota ao intervalo em que a correção do erro será feita. O tempo integral ideal irá depender do sistema como um todo (PANDA, 2012; OGATA, 2015).

Figura 11 – Tendência de comportamento do controlador PI com K_p constante e variação de T_i



Fonte: Bega (2011)

Os controles PI são os mais utilizados em processos industriais do tipo, ultrapassando, inclusive, a utilização dos controladores PID. Sua ação de eliminação do erro é, de uma forma geral, satisfatória. Um dos riscos associados a utilização do controle PI é a saturação da saída do controlador, também conhecida pelo termo *reset windup*, Este fenômeno está ligado à mudanças bruscas no sistema, como grandes mudanças de set points (sem nova sintonização), problemas físicos, entre outros (GARCIA, 2018).

3.1.2.1.3 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Como já visto, a função integral dos controle PI ou PID, denota a correção proporcional do erro em relação ao tempo, já a função derivativa dos controles PD e PID, denota a correção proporcional do erro em relação à taxa de velocidade da variação do erro, ou seja, é característica da função derivativa do controlador PID, antever o erro e agir previamente no ajuste

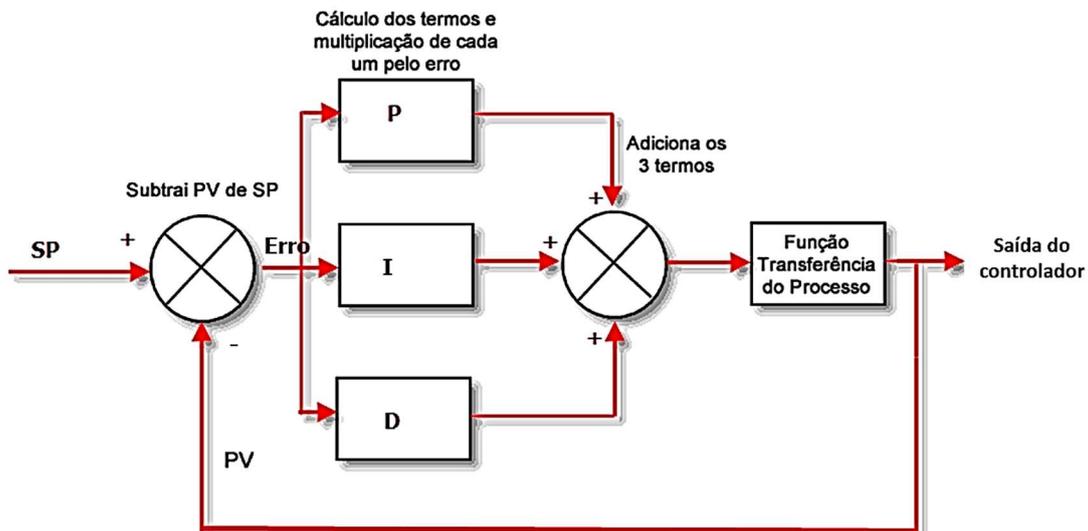
diminuindo assim, as oscilações no sistema (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013; GEROMEL; KOROGUI, 2019). A Equação 4 que descreve a inserção da ação derivativa no controle PID é:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

Onde, T_D = tempo derivativo. O tempo derivativo corresponde ao intervalo regular ao qual a ação derivativa deve ocorrer no sistema, a ação derivativa por sua vez, é proporcional a taxa de variação da velocidade do erro, tendo a função de agir de forma antecipada ao erro com o intuito de minimizar as oscilações, entretanto, por sua natureza, sistemas com ruídos altos e oscilações em demasiado não são compatíveis com a sua utilização, uma vez que a taxa de velocidade do erro desses sistemas é muito alta para que se possa agir de forma antecipada.

A combinação entre a função proporcional e os termos integral e derivativos do controle PID, estão representadas no diagrama de blocos de um sistema genérico em malha fechada na Figura 12.

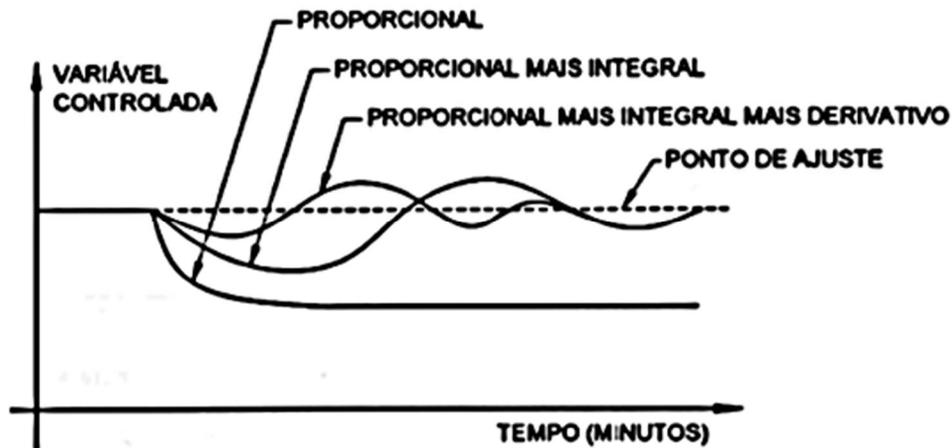
Figura 12 – Diagrama de blocos genérico da ação proporcional-integral-derivativo do controle PID



Fonte: Modificada de Silveira (2019)

Ao somar a ação derivativa ao controle PI, obtêm-se uma resposta mais rápida do sistema (BEGA, 2011), como é possível analisar nas curvas de resposta de um sistema PID da Figura 13.

Figura 13 – Curvas de resposta para controle P, PI e PID



Fonte: Bega (2011)

Com a ação integral, o sistema já está exposto a redução do erro, combinado com a ação derivativa, além da velocidade de estabilização do sistema, também é possível encontrar e redução na tendência de oscilações e aumento do ganho (PENEDO, 2014; GEROMEL; KOROGUI, 2019).

3.1.3 Sintonia de Controlador

Para que o controlador possa atuar de forma eficiente é necessário que os parâmetros que o regem estejam ajustados de forma a garantir sua eficiência. A função que a sintonia do controle impõe ao sistema tem por papel definir esses parâmetros para controle PID em processos. Ainda que mais de 90% dos controles na indústria sejam do tipo PID (em sua grande maioria configurados como PI), estima-se que apenas 23% dos controladores atuam de forma automática, 30% ainda são movidos por controle manual, 17% são ajustados pelas instruções de ajuste padrão dos fabricantes e cerca de 30% atuam em baixa performance (PANDA, 2012; GARICA, 2018).

Em suma, grande parte dos controladores ainda são ajustados pelo método de sintonia da Tentativa e Erro, ainda que existam técnicas de Sintonia de controladores largamente conhecidas datando desde 1942. Ziegler e Nichols foram pioneiros na proposta de metodologias para sintonia de controladores; sendo o Método do Ganho Crítico (aplicado em malha fechada) e o Método da Curva de Reação (aplicado em malha aberta) seus métodos mais difundidos (GARCIA; 2018; GEROMEL; KOROGUI, 2019).

Em 1952, 10 anos após o surgimento dos métodos sugeridos por Ziegler e Nichols, Cohen e Coon propõe uma melhoria desses métodos e alcançam melhor eficiência em processo com atrasos (tempo morto). Em 1984, surgem os métodos propostos por Aström e Hägglund, também baseados em Ziegler e Nichol e em 1986, surge o método IMC (Internal Model Control), proposto por Rivera. Além dos métodos citados, existem inúmeros outros métodos que podem ser utilizados atualmente na sintonia de controladores, inclusive métodos baseado em Fuzzy, Redes Neurais e adaptativos (OGATA, 2015; ALMEIDA; SALLES, 2016; GARCIA, 2018).

3.1.3.1 Métodos de Sintonia de controlador

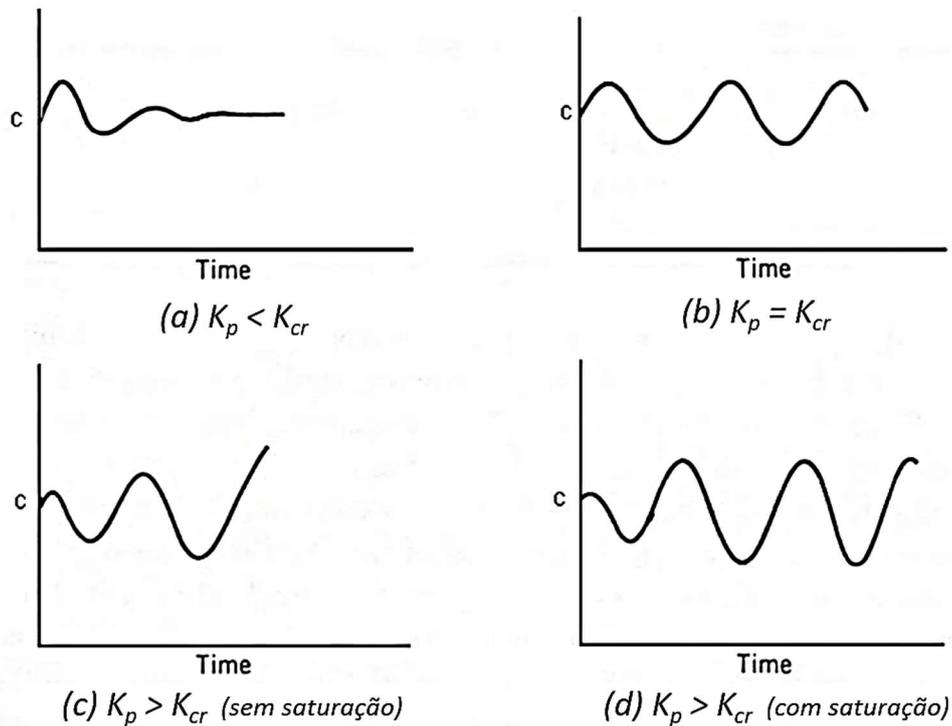
Uma vez que as características entre os sistemas de malha fechada e malha aberta são diferentes, é preciso que os parâmetros de sintonia atendam essas características, sendo assim, são propostos métodos de sintonia diferentes para cada tipo de sistema (GARCIA, 2018).

3.1.3.1.1 Sintonia em Malha Fechada pelo Método do Ganho Limite

Em sistemas de malha fechada, também conhecidos por sistemas de realimentação, é característico o valor da saída influenciar diretamente no controle do processo. Em sistemas modelados matematicamente, aplicar técnicas de ajustes dos parâmetros para diferentes fases dos regimes do sistema é possível, porém, tratando-se de sistemas muito complexos ou com modelo matemático desconhecido, a sintonia do controle pode ser feita por método analítico. O método do Ganho Limite, proposto por Ziegler e Nichol em 1942, é o método mais utilizado para este fim em malha fechada, inclusive em sistema modelados matematicamente (PANDA, 2012; GEROMEL; KOROGUI, 2019).

O modelo de Ziegler e Nichol propõe uma primeira ação experimental para que o ganho crítico possa ser encontrado e assim, o período crítico possa ser determinado (OGATA, 2015). Na Figura 14, é possível encontrar as curvas característica desta experimentação inicial.

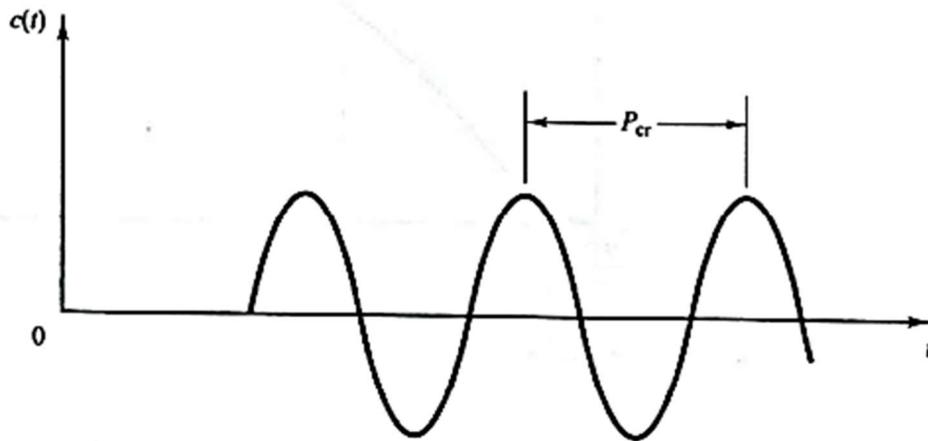
Figura 14 – Aplicação de tentativa e erro para determinação do ganho crítico



Fonte: Adaptado de SENAI (2015)

Essa fase consiste em zerar a influência dos termos integrais e derivativos do sistema e impor, de forma crescente um aumento no ganho proporcional, até se atinja uma oscilação de amplitude constante, também conhecida como oscilação mantida. Ao atingir esta constância na oscilação, o ganho imputado ao sistema é tido como o Ganho Crítico (K_{cr}). Vale salientar que se o sistema não apresentar oscilação mantida para nenhum valor de K_p , o método não será aplicável (PIRES, 2014; GARCIA, 2018). O período crítico (P_{cr}) corresponde ao tempo entre os picos de oscilação do sistema, como esquematizado na Figura 15.

Figura 15 – Curva de oscilação mantida para obtenção do período crítico



Fonte: Ogata (2015)

Com os valores do ganho crítico e período crítico determinados, aplica-se o método de Ziegler e Nichol, encontrado na Tabela 2, para definir os parâmetros ajustados do sistema.

Tabela 2 – Método Ziegler e Nichols para Ganho Limite

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$0,5K_{cr}$	–	--
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	--
PID	$0,6K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Fonte: Pires (2014)

Apesar de ser o método mais difundido e utilizado para sintonia de sistemas, o método exige vários experimentos até que se chegue aos valores necessários e também é comum a necessidade de ajustes mais finos para melhorar e elevar a eficiência dos controladores. De uma forma geral, o método atende as necessidades, mas vem passando por diversas revisões e novas propostas de melhorias ao longo dos anos (BEGA, 2011; GARCIA, 2018).

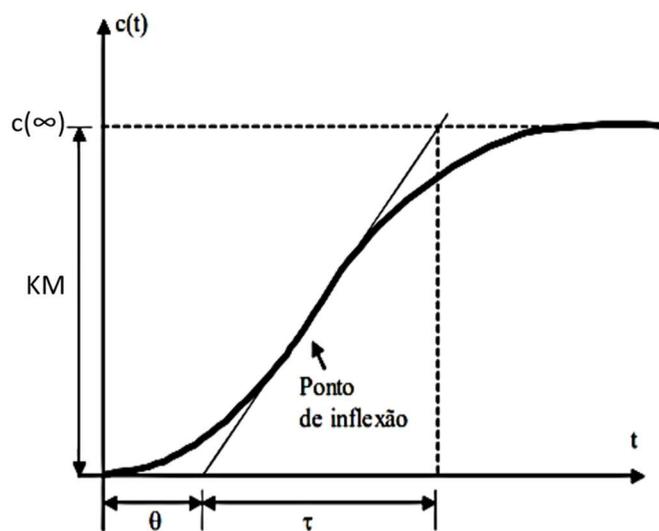
3.1.3.1.2 Sintonia em Malha Aberta pelo Método da Curva de Reação

Como visto anteriormente, sistemas em malha aberta apresentam como característica principal o fato do sinal de saída do controlador não influenciar no controle em si. O método mais

conhecido para a sintonia de sistemas em malha aberta é o método proposto por Ziegler e Nichols, método da curva de reação; e a versão do método da curva de reação proposto por Cohen e Coon (BEGA, 2011; PIRES, 2014).

O método da curva de reação foi concebido de forma empírica, onde o objetivo principal era alcançar um decaimento de cerca de $\frac{1}{4}$ na taxa. Para que isso possa ocorrer o sistema é imposto a uma variação do tipo degrau que por sua vez gera uma certa amplitude (PIRES, 2014; BRAGA, 2016), como é possível ver na Figura 16 que representa uma curva de reação.

Figura 16 – Curva de Reação



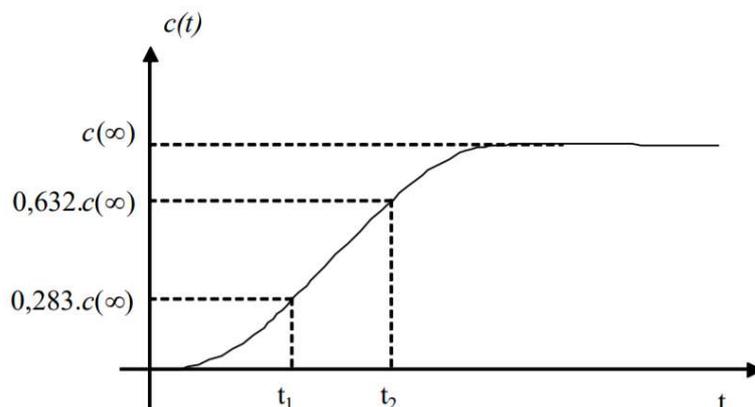
Fonte: Adaptado de Ogata (2015)

θ é o tempo de retardo, enquanto τ , a constante do tempo. Para saber o ganho no sistema, é preciso saber a amplitude (M) do sinal de entrada do tipo escada. O ganho pode ser calculado pela equação:

$$K = \frac{c(\infty)}{M} \quad (5)$$

Pela própria característica de dinamicidade dos sistemas de controle, nem sempre é possível aplicar o método do ponto de inflexão para a determinação dos parâmetros. Como alternativa, é possível aplicar o método de aproximação apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Método da aproximação para determinação de parâmetros através da curva de reação



Fonte: Ogata (2015)

Podendo assim determinar os valores de θ (tempo de atraso) e τ (constante de tempo), por meio das relações:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \text{ e } \theta = t_2 - \tau$$

Através dos valores de θ , τ , e K , pode-se chegar aos parâmetros de ajuste do sistema, através da Tabela 3, que representa o método proposto por Ziegler e Nichols:

Tabela 3 – Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{\theta}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	2θ	$0,5\theta$

Fonte: Braga (2016)

Seguindo a mesma proposta de Ziegler e Nichols, Cohen e Coon também propuseram uma tabela de valores para ajuste do controlador. O princípio é baseado no decaimento de $\frac{1}{4}$ na

taxa, e o método é tido como uma proposta de melhoria do método de Ziegler e Nichols (PIRES, 2014; GARCIA, 2018). Na Tabela 4, é possível encontrar os ajustes proposta por Cohen e Coon.

Tabela 4 - Método Cohen e Coon para Curva de Reação

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[1 + \frac{\theta}{3\tau}\right]$	∞	0
PI	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[0,9 + \frac{\theta}{12\tau}\right]$	$\frac{\theta[30 + 3(\theta/\tau)]}{9 + 20(\theta/\tau)}$	0
PID	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[\frac{16\tau + 3\theta}{12\tau}\right]$	$\frac{\theta[32 + 6(\theta/\tau)]}{13 + 8(\theta/\tau)}$	$\frac{4\theta}{11 + 2(\theta/\tau)}$

Fonte: Pires (2014)

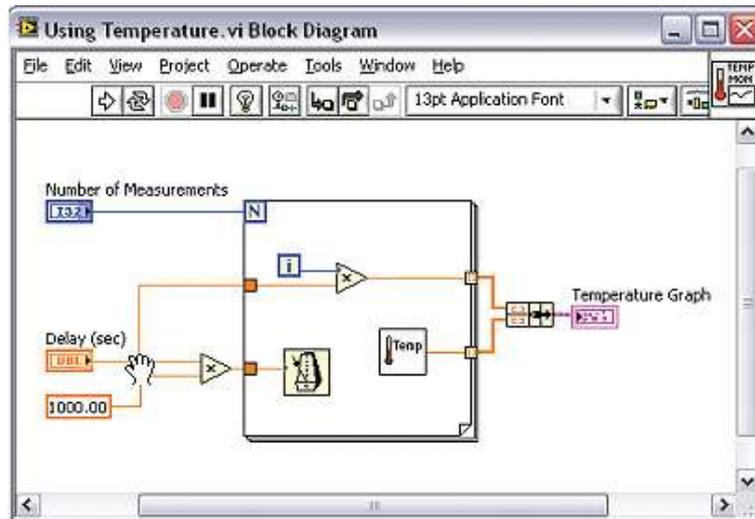
Por ser realizado em malha aberta, o método da curva de reação é mais sensível a erros na calibração do sistema, como também, pode ser bruscamente ajustado de forma errada para casos de grandes alterações na condição da operação durante o teste. Como vantagem, a obtenção dos parâmetros de ajuste é bem mais simples uma vez que apenas é necessário um teste (PIRES, 2014; GARCIA, 2018).

3.2 LabVIEW

Segundo a National Instruments (NI) (2020), criadora do LabVIEW: “O LabVIEW é um software de engenharia de sistemas para aplicações que requerem teste, medição e controle com acesso rápido a hardware e dados.” Diferente de outros softwares, o Labview permite que a programação seja feita através de blocos visuais, o que pode ser chamado de programação gráfica, facilitando a visualização dos sistemas e permitindo em poucas linhas de programação a criação de algoritmos complexos. As aplicações do LabView são inúmeras, sendo algumas delas: Desenvolvimento de sistemas de teste para produção, Design de máquinas inteligente e equipamentos industriais, validação ou verificação de circuitos elétricos, controle de sistemas físicos através de sensores e atuadores, entre outros (NATIONAL INSTRUMENTS, 2020).

A forma gráfica utilizada pelo LabVIEW para permitir a programação é baseada em diagramas de blocos, esses blocos, representam no diagrama a função que o equipamento, dispositivo, conexão, etc, exerce sob o sistema real ou que se pretende desenvolver (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019). Na Figura 18, é possível encontrar um diagrama de blocos criado no LabVIEW e sua representação da programação gráfica.

Figura 18 – Diagrama de Blocos desenvolvido em LabVIEW



Fonte: National Instruments (2019)

3.3 Arduino

Nas palavras da própria empresa Arduino (2019), que leva o nome do seu produto: “Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar”. Pela infinidade de possibilidade de sinais de entrada e saída de um arduino, a plataforma já é utilizada por milhares de projetos. A plataforma é programável, podendo utilizar linguagens de programação como C/C++ através do seu software, o IDE (Integrated Development Environment) que também é aberto, como também é compatível com outras plataformas (MatLAB, LabView, são alguns exemplos).

Na Figura 19, estão representados os componentes da Placa Arduino UNO, a placa de maior veiculação da marca.

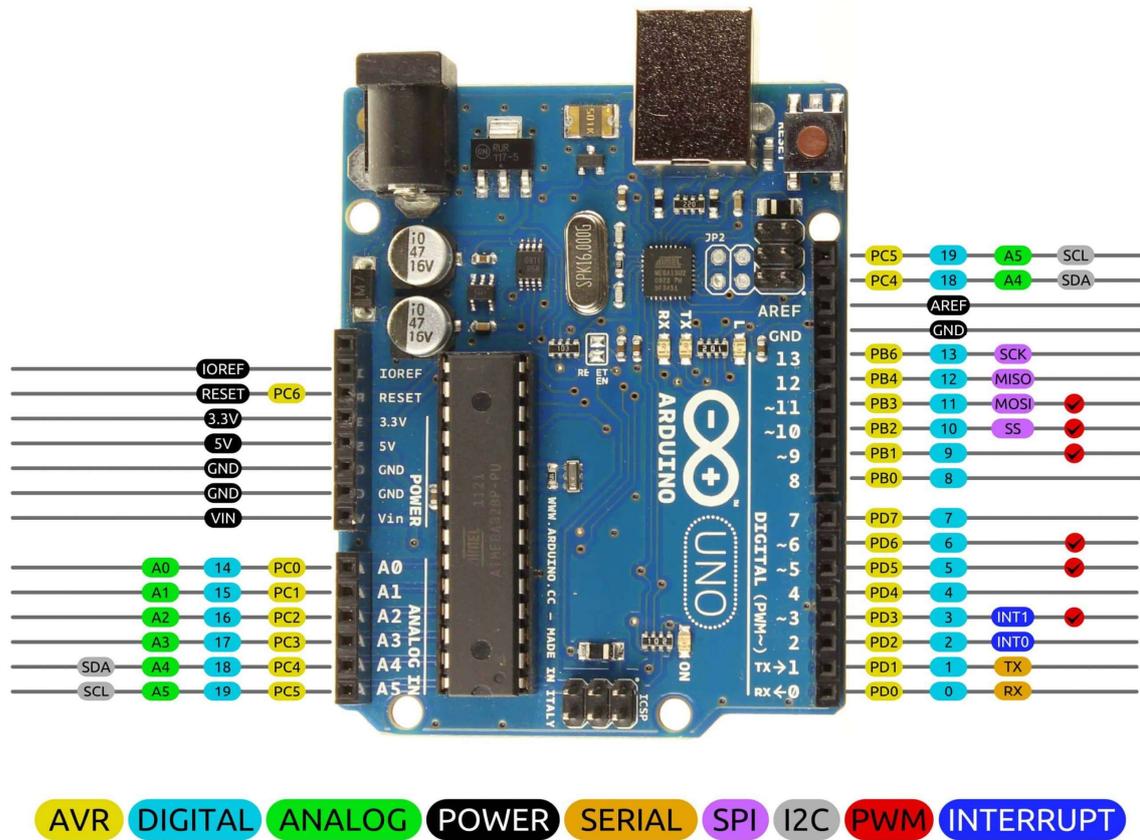
Figura 19 – Componentes da Placa Arduino UNO



Fonte: Protto (2020)

É através dos pinos e portas que o arduino recebe os sinais de entrada e enviam os sinais de saída, logo, são os meios de integração do arduino com o sistema. Já o microcontrolador é o responsável por armazenar a programação. Na Figura 20, é possível encontrar um esquema detalhado das pinagens do Arduino UNO. É válido salientar, que existem inúmeras placas Arduino, e a escolha da melhor placa para cada projeto deve levar em consideração inúmeros parâmetros, como a quantidade de dados que precisam ser lidos pela placa (PROTTO, 2020).

Figura 20 – Pinagem da Placa Arduino UNO



Fonte: Protto (2020)

Quando se busca uma forma de reduzir o custo de produção de determinado equipamento, pensar em componentes mais econômicos, seja para a aquisição do mesmo ou manutenção futura, torna-se uma opção, desde que estes componentes desempenhem de forma satisfatória sua função dentro do projeto. Desse modo, os microcontroladores Arduino têm ganhado cada vez mais espaço em diferentes projetos, por ser um microcontrolador de código aberto, compatível com diversas plataformas e de baixo custo e consumo de energia. Equipamentos das mais diferentes áreas, como: saúde, biotecnologia, agricultura, Indústrias (químicas,

farmacêuticas etc), já utilizam Arduino por seus inúmeros benefícios (SHEKHAR et al., 2017).

A necessidade de usar uma plataforma de prototipagem eletrônica com hardware e software abertos e extensíveis, de baixo custo, provida de ambiente de desenvolvimento integrado, fácil de programar, acessível a estudantes e a projetistas profissionais e amadores, torna as plataformas Arduino uma escolha justificável para uso e desenvolvimentos dos mais diferentes projetos (AHMED, 2016; ARDUINO, 2019).

3.3.1 Arduino aplicado ao controle de processos

A medição de parâmetros de forma precisa muitas vezes está condicionada ao uso de softwares e equipamentos sob patente cujo o custo não é acessível para a maior parte de aplicações simples e sem grande retorno financeiro, como determinadas pesquisas, usos domésticos, prototipagem etc. Uma das formas de diminuir o custo e, ainda assim, manter a flexibilidade, integração e efetividade dos sistemas de medição e monitoramento, é o uso de plataformas *Open Source*, como a plataforma Arduino (ALI et al., 2016). Porém, já é possível encontrar aplicações da plataforma arduino em ambientes que vão muito além das citadas anteriormente, com reais aplicações na indústria e processos.

Em 2013, a Arduino foi escolhida como a plataforma para o Open Source Building Science Sensors (OSBSS), um projeto que visava facilitar a coleta de dados ambientais em construções. A escolha da plataforma deu-se por seu alto potencial de computar milhões de linhas de códigos por segundo através de sua grande variedade de placas de circuitos, que também ofereciam a vantagem do baixo consumo de energia, além de possuir um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) a plataforma também já possui diversos sensores compatíveis com suas bibliotecas. No projeto OSBSS, foram incorporados os sensores de temperatura e umidade relativa; fluxo de ar e temperatura de superfície; intensidade de luz; movimento e proximidade; concentração de CO₂ e de medição de tensão genérica (ALI et al., 2016).

O baixo custo das plataformas arduino; a possibilidade de integração de vários sensores, como: pH, temperatura e pressão; e a facilidade de programação, foram fatores cruciais para justificar seu uso no desenvolvimento de um dispositivo automático aplicado no gerenciamento do tratamento prévio de um eletrodo de filme BDD (Rosa, et al. 2017). A placa também foi utilizada no projeto que visava viabilizar a remotibilização de laboratórios de física e engenharia, buscando permitir monitoramento e controle de processo on-line (CVJETKOVIC; STANKOVIC, 2017).

Drost, Kruif e Newport (2017), obtiveram um fluxo pulsante fisiologicamente realístico ao utilizar um microcontrolador arduino para controlar uma bomba de engrenagens. Além da possibilidade

da criação de sistemas semelhantes através do código aberto, também foi constatado que o custo total do projeto foi significativamente mais baixo em comparação com dispositivos comercializados.

3.4 Monitoramento e Controle de Nível

A medição de nível pode ser definida como a demarcação da posição de uma interface entre dois meios. É uma das variáveis mais comuns e mais utilizadas em aplicações industriais. A seleção do sistema de medição deve considerar vários fatores, como as características específicas da aplicação, tipo de produto cujo nível se quer medir, precisão, custos, entre outros. Por isso, existe grande variedade de sistemas de medição de nível, cada um com suas vantagens e limitações (BEGA, 2011; LAMB, 2015; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

Para exemplificar sua aplicação, sabe-se que o nível do meio líquido em um biorreator é um parâmetro de fundamental importância que deve ser monitorado e controlado para garantir um bom crescimento celular e rendimento satisfatório do produto. Para que um bioprocessamento transcorra de forma eficaz, o nível do meio líquido não deve ultrapassar o volume total do reator, sendo ainda recomendável que o volume de amostragem não ultrapasse 20 % do volume de trabalho do biorreator, sendo essa, uma situação clássica da necessidade do monitoramento e controle de nível (CARAMIHAI, SEVERIN, 2017).

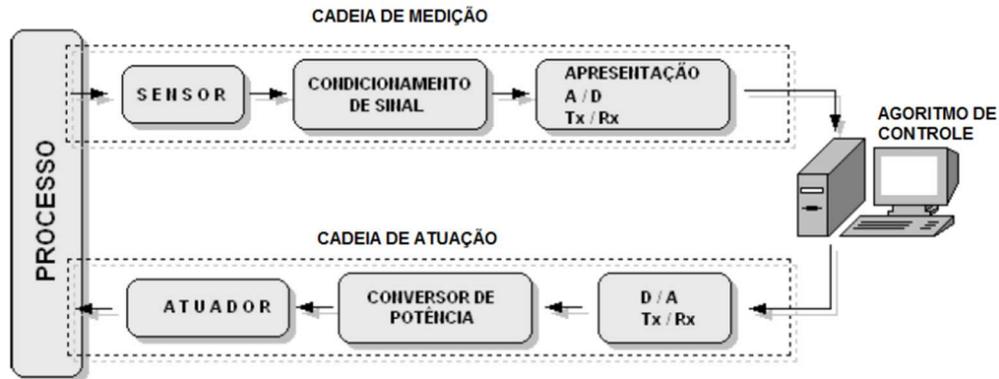
3.4.1 Sensores de Nível

Uma das formas mais práticas de se fazer o monitoramento do nível é através de sensores. O papel de um sensor no monitoramento ou medição de um processo é detectar alguma ação ou resposta específica do ambiente ao qual está inserido. Tratam-se de dispositivos que reagem a estímulos físicos ou químicos, e transformam sua resposta a reação captada em um sinal que pode ser interpretado por um programa de computador, por exemplo (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

O sinal de um sensor pode ser utilizado apenas como um dado para monitoramento, como também, como um sinal para uma alteração necessária no processo em um nível de controle. Para que isto ocorra, é necessário que todos os equipamentos envolvidos (meio, sensores, *hardware* e *software*) estejam integrados (LAMB, 2015; OSCAR, 2016). Na Figura 21,

pode ser observado um esquema de funcionamento genérico de um sistema de medição desencadeado pela ação de um sensor com atuação à nível de controle.

Figura 21 - Cadeia de medição e atuação em nível de controle



Fonte: Cassiolato (2018).

O funcionamento correto de um sensor depende de seu modelo matemático, curva de calibração e tabela de calibração. Ao reagir a um estímulo do meio em questão, o sensor irá parametrizar o dado obtido com os dados utilizados no seu desenvolvimento e programação. Existem diversas formas de classificar um sensor, sendo as mais comuns em relação a saída e ao estímulo (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020). No Quadro 2, é possível averiguar a classificação dos sensores mais comuns atualmente no mercado.

Quadro 2 - Classificação de sensores quanto à estímulos e saídas

ESTÍMULO	SINAL DE SAÍDA
Acústico	Onda (Amplitude, fase, polarização) Espectro Velocidade da onda
Elétrico	Carregamento Corrente Tensão Permissividade Condutividade

Quadro 2 - Classificação de sensores quanto à estímulos e saídas (continuação)

Magnético	Campo magnético Fluxo magnético Permeabilidade
Mecânico	Posição (linear/angular) Aceleração Força Massa Densidade Momento Torque Orientação
Óptico	Onda (amplitude, fase, polarização) Velocidade da onda Índice de refração Emissividade Absorção Refletividade
Térmico	Temperatura Fluxo Calor específico Condutividade térmica

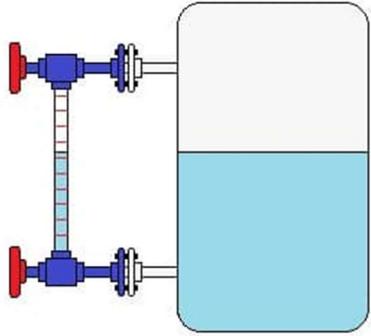
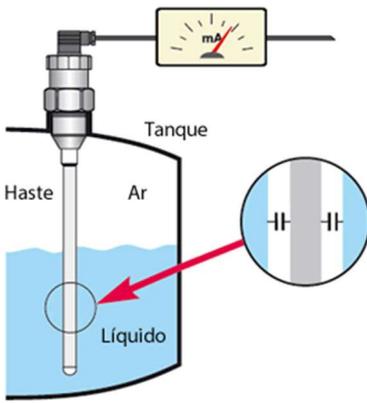
Fonte: Autoria própria (2020).

O sinal de saída de um sensor também permite classificá-lo quanto ao tipo, há dois tipos de sensores comuns, sensores analógicos e sensores digitais. Os sensores analógicos tem por característica uma resposta de saída proporcional à entrada. Variáveis como: temperatura e pressão - variáveis tidas como físicas - são facilmente interpretadas por sensores analógicos, uma vez que se tratam de grandezas contínuas no tempo, ou seja, podem assumir uma infinidade de valores dentro da faixa de operação e detecção do sensor utilizado. Sensores digitais, por sua vez, utilizam da lógica binária, podendo apenas assumir um entre dois valores por ação, valores esses que marcam as delimitações de detecção do sensor, podendo um valor indicar o

ponto alto (*high*) e o segundo valor o ponto baixo (*low*), ficando assim impossibilitado de assumir qualquer valor entre os contrapontos (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

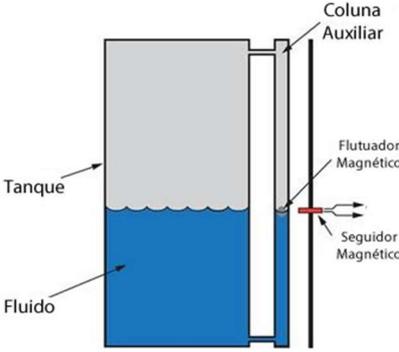
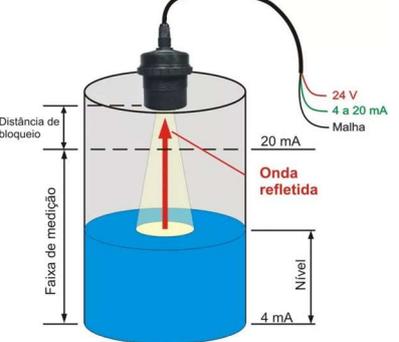
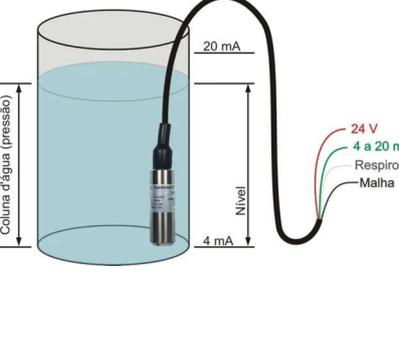
Por sua extensa lista de aplicações, é possível encontrar diferentes tipos de sensores de nível em diferentes tipos de equipamentos, como: reservatórios de água, climatizadores, nebulizadores, veículos, máquinas, entre outros. No Quadro 3, é possível conferir algumas formas mais comuns utilizadas para a medição e monitoramento do nível de líquido.

Quadro 3 - Tipos e aplicações de sensores de nível de líquido

Dispositivo	Tipo	Funcionamento e Aplicação
	<p>Medidor de nível de vidro</p>	<p>Um dos mais antigos e ainda utilizados métodos de medição de nível de líquido, trata-se de um dispositivo mecânico dotado de um régua e hastes ajustáveis manualmente. Apesar de muito utilizado, o dispositivo permite muitos erros de leitura e quase sempre não possui conectividade. Pode ser aplicado em qualquer superfície transparente na qual possa ser conectado.</p>
	<p>Sensor de nível por capacitância</p>	<p>Sensor utilizado submerso no meio líquido. A medição é baseada na constante dielétrica dos fluidos. Uma vez que o nível do meio é alterado, a capacitância também é induzida à alteração através de uma haste. Permite uma leitura contínua do estado do nível possibilitando um ótimo monitoramento. Utilizados em líquidos aquosos e não aquosos e coloridos.</p>

Continua...

Quadro 3 - Tipos e aplicações de sensores de nível de líquido

 <p>Tanque Fluido Coluna Auxiliar Flutuador Magnético Seguidor Magnético</p>	<p>Medidor de nível magnético</p>	<p>A medição é feita por flutuação, a flutuação é feita por ímãs que se comunicam com uma coluna auxiliar ligada ao recipiente principal. É possível fazer o monitoramento em tempo real no nível e este é o dispositivo que mais substitui os medidores de nível de vidro. Suportam alta pressão e líquidos corrosivos.</p>
 <p>Tanque / Silo Indicador Digital Células de Carga</p>	<p>Sensor de carga</p>	<p>Os sensores de carga são aplicados para medição de nível em determinadas situações que, geralmente, envolvem grandes reservatórios de líquido. Os sensores captam a variação de peso do recipiente e enviam um sinal que será transformado em nível de líquido a partir do cálculo de volume do recipiente utilizado.</p>
 <p>Distância de bloqueio Faixa de medição Nível Onda refletida 20 mA 4 mA 24 V 4 a 20 mA Malha</p>	<p>Sensor ultrassônico</p>	<p>Este tipo de sensor não entra em contato com o líquido e tem como base para a medição a velocidade do som. O sensor é posicionado acima do nível mais alto de líquido e emite constantemente pulsos ultrassônicos que por sua vez refletem na superfície do meio.</p>
 <p>Coluna d'água (pressão) Nível 20 mA 4 mA 24 V 4 a 20 mA Respiro Malha</p>	<p>Sensor hidrostático</p>	<p>A medição feita pelos sensores de nível hidrostáticos são baseados no cálculo da pressão da coluna de água do recipiente a ser medido. Permite conexão com outras plataformas e monitoramento, e necessariamente, precisa estar submerso no meio líquido.</p>

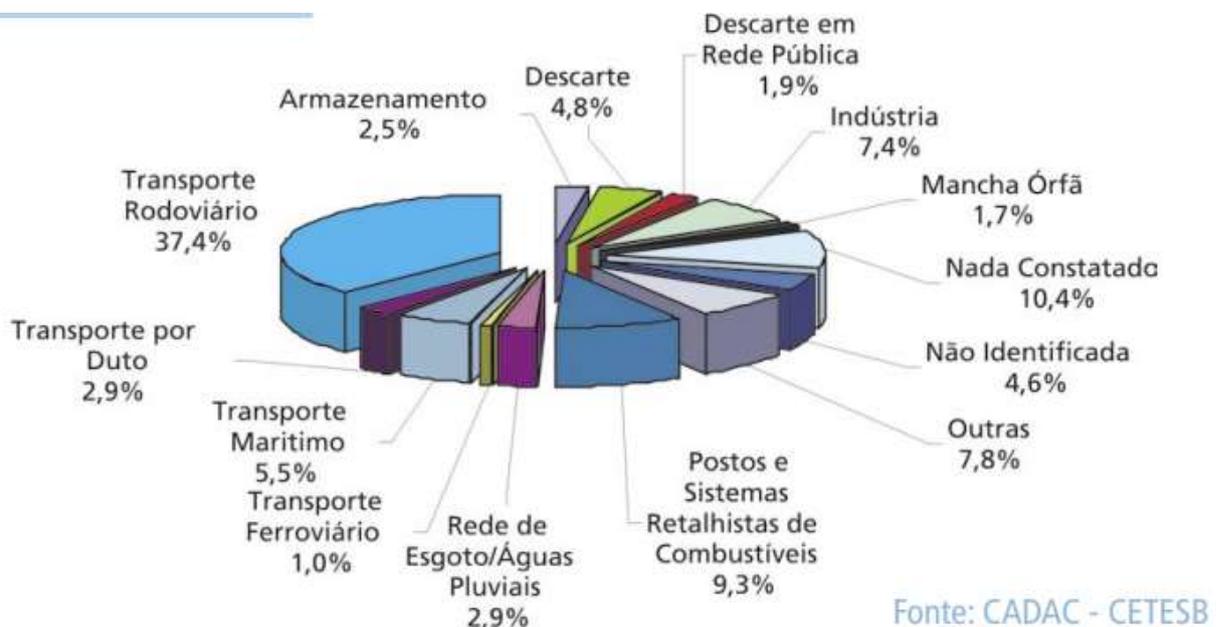
Fonte: Autoria própria (2020).

3.5 Controle de Nível Aplicado à Acidentes Ambientais

O Instituto Água e Terra (IAT), conceitua acidentes ambientais como eventos não previsíveis capazes tanto de danificar ecossistemas, como também, infringir danos a vida humana. O IAT (2019) exemplifica vazamentos e lançamentos de substâncias nocivas como acidentes ambientais, sejam estes vazamento ou lançamento de substância ocorrido em solo, curso d'água ou até mesmo na atmosfera. Os acidentes ambientais podem ser de natureza humana, como os conhecidos casos de vazamento de óleo no mar; ou causas naturais, como: terremotos, maremotos e deslizamento de terra. Os danos causados são proporcionais à magnitude do evento, podendo até ser classificado como desastre ambiental de natureza ampliada (FREITAS; PORTO; MACHADO, 2000).

Há inúmeros segmentos que podem ser responsáveis pela causa de acidentes ambientais. A CETESB (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental), empresa especializada no atendimento de acidentes ambientais da cidade de São Paulo, traz em um gráfico, que pode ser encontrado na Figura 22, o detalhamento das diferentes atividades pelas quais ele foram responsáveis por atender chamados de ocorrência de acidentes ambientais (GOUVEIA, 2005).

Figura 22 – Atividades causadoras de acidentes ambientais atendidas pela CETESB entre os anos de 1978 e 2004

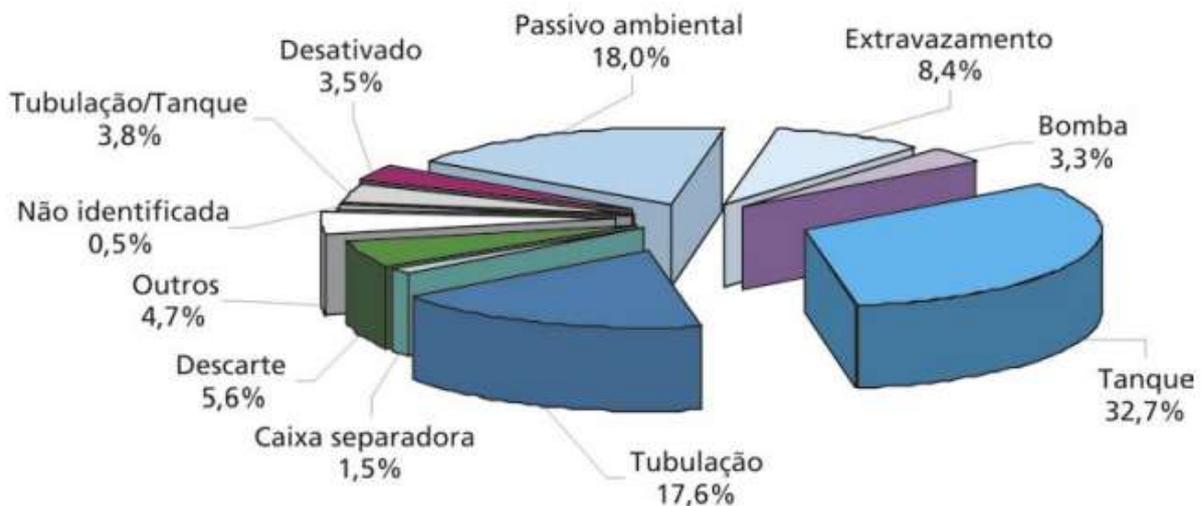


Fonte: Gouveia (2005)

É possível identificar que as atividades com maior contribuição em acidentes ambientais na cidade de São Paulo são os Transportes Rodoviários, Postos e Sistemas Recolhistas de Combustíveis, Indústrias, Transporte Marítimo e Descarte, que juntos somam 64,4% das atividades causadoras de acidentes ambientais.

Tratando-se de acidentes ambientais ocasionados por natureza humana, há diversas fontes causadoras destes acidentes. Na Figura 23, é possível encontrar um gráfico que demonstra a porcentagem de causas de acidentes ambientais identificadas no atendimento de chamados realizados pela CETESB entre os anos de 1978 a 2004.

Figura 23 – Causas de acidentes ambientais atendidos pela CETESB entre os Anos de 1978 e 2004



Fonte: Gouveia (2005)

Ao analisar este gráfico, fica claro a grande parcela de causas identificadas provenientes de equipamentos do processo (tanque, bomba, tubulação, caixa separadora) que chegam a ser 58,9% dos fatores causadores dos acidentes ambientais atendidos, enquanto as causas provenientes do processo em si (descarte, extravasamento) representam 14%, nos levando a entender que 72,9% das causas dos acidentes ambientais atendidos pela CETESB estavam ligadas diretamente à não execução eficiente do processo envolvido, que pode estar ligado diretamente a necessidade ou má execução do controle do processo.

Um dos segmentos industriais com maior poderio de causar danos ambientais estão alocados no setor químico, como por exemplo, as indústrias petroquímicas, sendo o vazamento de petróleo um dos maiores causadores de acidentes ambientais conhecidos da atualidade. Estima-se, que apenas entre os anos de 1970 e 1987, ocorreram mais de 125 vazamentos de petróleo em uma faixa entre 7 e 700 toneladas em cada vazamento, e nessa mesma época, mais

de 431 vazamentos de mais de 700 toneladas cada foram registrados, onde aproximadamente 54% das causas destes vazamentos foram provenientes de problemas na operação dos processos, incluindo fatores inerentes ao controle dos processos, por exemplo, o abastecimento (processo de fácil controle através do controle de nível), correspondeu à 6,2% da causa desses acidentes (SZEWCZYK, 2006).

Vazamento e derramamento de petróleo e óleos no geral, não são os únicos riscos ambientais provenientes das indústrias petroquímicas; liberação de gases, explosões e incêndios são alguns outros riscos passíveis do segmento. Acidentes ambientais podem ocorrer em qualquer fase dos processos, desde as etapas de obtenção da matéria-prima (Upstream), passando pelas etapas de beneficiamento, processamento (Midstream), até as etapas de refino e pós processamento (Downstream). O controle de nível é de suma importância e faz parte de todas as etapas do segmento (FREITAS, 2021).

No setor químico e petroquímico, o controle de nível é uma ação primordial para a manutenção da segurança, tanto da vida humana, capital, quanto do meio ambiente. Garantir que os processos sigam de acordo com o pré-estabelecido para tal e na medida especificada é de suma importância. Alterações de nível indesejadas podem causar sobrecargas no sistema, falhas no sistema, derramamentos, extravazamentos, vazamentos, explosões por equipamentos trabalhando à seco, entre outros riscos que acabam por gerar riscos ainda maiores de contaminação e acidentes graves, com prejuízos à vida (DEMUNER, 2015).

REFERÊNCIAS

ABB Kent-Taylor. **Fulscope Controller with adjustment sensitivity and reset control responses**. Londres: ABB Instrumentations; 1945, 30f.

AHMED, S. Intelligent Biodetector. **Open Journal of Applied Sciences**, v.6, p.903-937, 2016.

ALI, A. S. et. Al. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. **Building and Environment**, n. 100, p. 114-126, 2016.

ALMEIDA, G. M.; SALLES, J. L. F. **Controle Preditivo: Sintonia e Aplicações na Siderurgia**. 1ª Ed. Curitiba: Appris, 2016.

ARDUINO. What is Arduino? **ARDUINO**, 2019. Disponível em: Acesso em: 15 de junho de 2021.

BATISTA, R. G.; MENEGHETTI, C. R. Sistema comparativo de controle inteligente de nível aplicado às lógicas Fuzzy e PID. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 21, n. 38, p. 53-63, jun. 2018.

BEGA, E. A. (org). **Instrumentação Industrial**. 3ª Ed. [S.L.]: Interciência, 2011.

BENETT. S. **A history of control engineering: 1930-1955**. 1 ed. United Kingdon: Peter Peregrinus Ltd., 1993.

BRAGA, E. R. Sintonia do controlador pelo método de Ziegler e Nichols, para especificação de topo de uma coluna de destilação. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v. 02, n. 03, 2016.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na indústria de cerâmica vermelha: Medidas e alternativas para o controle dimensional. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 5-6, p. 40-43, 2016.

CARAMIHAI, M; SEVERIN, I. Aerobic Bioprocess Control Using Artificial Intelligence Techniques. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biotechnology and Bioengineering**, v. 11, n.1, 2017.

CASSIOLATO, C. Condicionamento de sinais analógicos e sensores. **Smar Technology Company**, 2018. Disponível em: <https://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/condicionamento-de-sinais-analogicos-sensores> Acesso em: 29 de julho de 2021.

CVJETKOVIC, V. M.; STANKOVIC, U. Arduino based physics and engineering remote laboratory. **International Journal of Online Engineering**, v. 12, n. 1, p. 87-96, 2017.

DEMUNER, L. R. et al. Aplicação de filtro partículas para estimação de comportamento de válvulas em condição de falha. **REQ²**, v. 01, n. 01, p. 73-83, 2015.

DOMINGUES, L. H. (org.). **Engenharia de Produção e a Indústria 4.0**. Ponta Grossa: Aya, 2020.

DROST, S.; KRUIF, B. J. de.; NEWPORT, D. Arduino control of a pulsatile flow rigs. **Medical Engineering and Physics**, v. 51, p. 67-71, 2017.

- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª Ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- FREITAS, C. M.; PORTO, M. F. S.; MACHADO, J. M. H. (orgs). **Acidentes Industriais Amplificados: Desafios e perspectivas para o controle e a prevenção**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2000.
- FREITAS, K. P. M. Gerenciamento de Riscos Ambientais na Indústria de Petróleo. **Revista Valore**, v. 06, p. 6013-6024, 2021.
- GARCIA, C. **Controle de Processos Industriais: Estratégias convencionais – Volume 1**. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- GARCIA, C. **Controle de Processos Industriais: Estratégias Modernas – Volume 1**. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- GARCIA JUNIOR, E. **Introdução a sistemas de supervisão, controle, aquisição e aquisição de dados – Escada**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.
- GEORGINI, J. M. **Automação Aplicada: Descrição e implementação de sistemas Sequenciais com PLCs**. 9ª Ed. São Paulo: Saraiva, 2018.
- GEROMEL, J. C.; KOROGUI, R. H. **Controle Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, ensaios práticos e exercícios**. 2ª Ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- GOUVEIA, J. L. N. **Relatório de atendimento a acidentes ambientais em postos e sistemas retalhistas de combustíveis 1984 a 2004**. 1ª Ed. São Paulo: CETESB, 2005.
- GRANELL, C. et al. Future Internet technologies for environmental applications. **Environmental Modelling & Software**, v. 78, p. 1-15, 2015.
- IAT – Instituto Água e Terra. Acidentes Ambientais. IAT, 2019. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Acidentes-Ambientais#>. Acesso em: 17/08/2021.
- LAMB, F. **Automação Industrial na Prática: Controle e Processos Industriais**. 1ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- NATIONAL INSTRUMENTS. Conceitos Básicos do Ambiente LabVIEW. **National Instruments**, 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/pt/environment>. Acesso em: 25 de Julho de 2021.
- NATIONAL INSTRUMENTS. What is LabVIEW? **National Instruments**, 2020. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>. Acesso em: 25 de Julho de 2021.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.
- OSCAR, R. **Instrumentação Industrial: Controle Total de Processos**. 1ª Ed. São Paulo: Viena, 2016.
- PANDA, R. C. (org.) **Introduction to PID Controllers**. 1ª Ed. [S.l.]: IntechOpen, 2012.
- PENEDO, S. R. M. **Sistemas de Controle: Matemática Aplicada à Projetos**. 1ª Ed. São Paulo: Érica, 2014.

PERKEL, J. M. The Internet of things comes to lab. **Nature**, v. 542, p. 125-126, 2017.

PIRES, V. P. SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID EM UM SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO. **Revista da Graduação**, v. 7, n. 2, 8 dez. 2014.

PROTTO. Entendendo os componentes e a pinagem dos arduinos. **Protto**, 2020. Disponível em: <https://protto.com.br/2020/10/19/entendendo-os-componentes-e-a-pinagem-dos-arduinios/>. Acesso em: 16 de julho de 2021.

ROSA, T. M. et al. Development and application of a labmade apparatus using open-source “arduino” hardware for the electrochemical pretreatment of boron-doped diamond electrodes. **Electrochimica Acta**, v. 231, p. 185-189, 2017.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). **Controle Automático de Processos**. São Paulo: SENAI-SP, 2015.

SHEKAR, Y. et al. Intelligent IoT Based Automated Irrigation System. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 12, n. 18, p. 7306-7320, 2017.

SILVA, E. B. et al (org.). **Automação & Sociedade: Quarta Revolução Industrial, um olhar para o Brasil**. Rio de Janeiro: Brasport, 2020.

SILVEIRA, C. R. Controle PID. **Citisystems**, 2016. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 15 de Agosto de 2021.

SZEWCZYK, S. B. O. Processos envolvidos em um derramamento de óleo no mar. In: 8º MCSul / VIII SEMENGO (Conferência Sul em Modelagem Computacional / Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica), 2018, Rio Grande. ANAIS DO 8º MCSUL / VIII SEMENGO, 2006. v. 1. p. 1757-1772.

THOMAZINI, D. ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 9ª Ed. São Paulo: Érica, 2020.

CAPÍTULO II

ARTIGO ACEITO PELA REVISTA BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT
ISSN: **2525-8761**
Qualis B2

SISTEMA COMPARATIVO DE CONTROLE PID DE PLANTA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE NÍVEL UTILIZANDO MÉTODOS DE SINTONIA DE ZIEGLER E NICHOLS

COMPARATIVE PID CONTROL SYSTEM OF DIDACTIC PLANT FOR LEVEL CONTROL USING ZIEGLER AND NICHOLS TUNING METHODS

Myllena Syngred Raimundo Santana

Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais – PPGDPA - UNICAP
Endereço Institucional: Campus Universitário. R. do Príncipe, 526 - Boa Vista, Recife - PE, 50050-900

Email: m.syngred@gmail.com

RESUMO

O Controle PID (proporcional-integral-derivativo) corresponde a mais de 90% dos tipos de controladores utilizados em processos industriais, uma vez que a sua aplicação é considerada relativamente simples e resolve de forma satisfatória boa parte dos problemas de controle de processos. Para garantir que o controle implementado corresponda de forma eficiente ao sistema é preciso garantir que os seus parâmetros de ajuste estejam oferecendo o maior ganho possível, dessa forma, evitando perdas e desperdícios e até aumentando a segurança e confiabilidade do processo. Este trabalho buscou encontrar de forma experimental os melhores parâmetros de ajustes de uma planta didática para controle de nível, utilizando os métodos do Ganho Limite e da Curva de Reação, ambos propostos por Ziegler e Nichols.

Palavras Chaves: Sintonia do controlador, Controle de nível, Controle PID.

ABSTRACT

PID Control (proportional-integral-derivative) corresponds to more than 90% of the types of controllers used in industrial processes, since its application is considered relatively simple and satisfactorily solves most of the process control problems. To ensure that the implemented control efficiently matches the system, it is necessary to ensure that its adjustment parameters are offering the greatest possible gain, thus avoiding losses and waste and even increasing the safety and reliability of the process. Level control is an extremely important process as it is crucial for the safety of the operation as a whole and for the prevention of environmental accidents. This work tried to find, in an experimental way, the best adjustment parameters of a didactic plant for level control, using the Limit Gain and Reaction Curve methods, both proposed by Ziegler and Nichols.

Keywords: Controller tuning, Level control, PID control.

1. INTRODUÇÃO

Os precursores dos controles PID atuais, têm seus lançamentos datados entre 1933 e 1935. Esses primeiros modelos, desenvolvidos pelas empresas Taylor Instrument Company e Foxboro Company, já apresentavam as ações proporcional e integral (GARCIA, 2018). O controle PID tem como função principal, viabilizar que um sistema permaneça em condições previamente estabelecidas, ainda que precise corrigir o sistema durante sua atuação. A ação proporcional do controle PID equivale a comparação constante entre os parâmetros reais do sistema com os parâmetros definidos, enquanto a ação integral visa a diminuição da diferença entre o valor real e o valor indicado de maneira mais rápida e a ação derivativa, por sua vez, é aplicada à diminuição da oscilação entre estes parâmetros (PANDA, 2012).

Para garantir que o controle do processo está atuando de forma eficiente, os parâmetros de controle devem ser ajustados para tal. Ziegler e Nichols, foram precursores na proposição de métodos de sintonia de controladores, sendo seus principais métodos conhecidos, os métodos do Ganho Limite e da Curva de Reação. Embora esses métodos tenham sido propostos em 1942, ainda são largamente utilizados nos dias atuais (GEROMEL; KOROGUI, 2019). Estima-se que 90% dos controladores de indústrias são do tipo PID, porém, muitos operam de maneira não sintonizada (ou com má sintonização), o que acaba por afetar a eficiência do sistema e promover falhas, danos; e aumentar a probabilidade de acidentes, perdas e desperdícios (GARCIA, 2019).

O controle de nível é um dos processos mais comuns da indústria e pode ser encontrado em uma gama de aplicações diferentes. Podendo ser utilizado para meios líquidos, sólidos e semissólidos, este tipo de controle pode impactar diretamente na qualidade do produto final, no custo da operação, na segurança no sistema, na eficiência e em muitos outros aspectos da produção, sendo assim, a adoção de um controle de nível eficaz traz benefícios desde a redução de custos operacionais até um aumento da produtividade, uma vez que o sistema passa a alcançar equilíbrio de maneira mais rápida, além de que previne acidentes ambientais uma vez que garante o correto funcionamento do sistema (FREITAS, 2015; BATISTA; MENEGHETTI, 2018).

Quando o modelo matemático do sistema é conhecido, é possível encontrar os parâmetros ótimos de ajuste para o mesmo, porém, muitos dos sistemas são modelados considerando seu funcionamento linear, uma vez que grande parte dos processos consegue suportar certo grau de erro e ainda assim, promover uma resposta eficiente para

o sistema, fazendo com que os modelos matemáticos não sejam tão utilizados para processos simples de controle (LEONARDI, et al., 2019). Sabendo da grande aplicação dos controladores PID e entendendo a importância de garantir que os sistemas de controle de nível atuem da forma mais eficiente possível, o seguinte trabalho teve como objetivo aplicar diferentes métodos experimentais de sintonia de controladores e avaliar qual produziria o melhor ajuste de parâmetros na planta proposta.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizada uma planta didática de controle de nível, baseada em Arduino e LabVIEW, dotada de sensor de nível de contato com sinal analógico. Foram aplicados os Métodos de Sintonia de Controladores do Ganho Limite (em malha fechada) e o da Curva de Reação (em malha aberta), onde os parâmetros de ajuste foram comparados e definiu-se qual imputava ao sistema melhor eficiência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Planta didática para controle de nível

Na execução deste trabalho foi utilizada uma planta didática para controle de nível localizada na Universidade Católica de Pernambuco. A bancada didática conta com reservatório cilíndrico de acrílico sobre uma plataforma de metal, dotada de canos PVC de $\frac{3}{4}$ de polegadas que permitem o abastecimento e retirada de fluido do sistema. Na superfície superior foi implantado um sensor do tipo boia que, por sua vez, se comunica com o CLP desenvolvido em Arduino em linguagem LabVIEW. O sistema ainda possui válvulas esferas manuais, porém, o controle final é realizado pelas válvulas esferas com acionamento elétrico, através do CLP. O sistema possui bombas centrífugas trifásicas com potência de 0,33 cv. Na Figura 1, é possível encontrar registro da planta.

Figura 1 – Planta didática para controle de nível

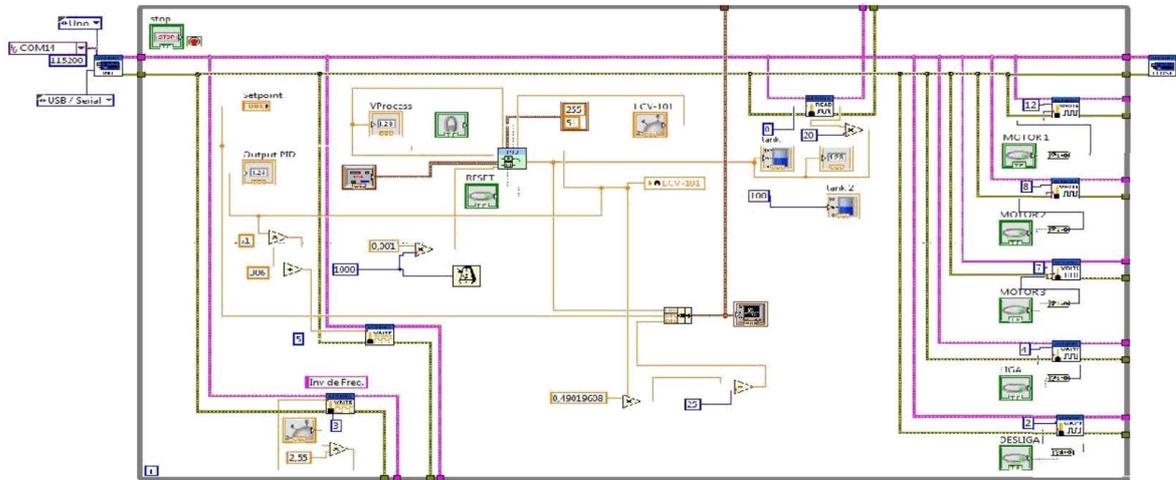


Fonte: Autoria Própria (2021)

2.2 Interface Planta-Arduino-LabVIEW

O sistema de controle foi desenvolvido através da Plataforma LabVIEW, onde foi feita toda a parte da programação do controle de nível. O sensor de nível do tipo boia (sempre em contato) faz o monitoramento contínuo do nível de líquido dentro do recipiente, enquanto o Arduino (CLP do sistema) faz a leitura do sinal do sensor, que ao atingir o set point, tem o seu sinal convertido pelo inversor de frequência que por sua vez, transmite sinal para as válvulas que irão a partir deste sinal de controle abrir ou fechar sua abertura, fazendo com que o líquido aumente ou diminua dentro do sistema proporcionalmente ao valor de referência. Na Figura 2, este processo está representado pela Tela Block Diagram do LabVIEW.

Figura 2 – Representação lógica do sistema de controle de nível em Tela Block Diagram do LabVIEW



Fonte: ARRUDA, et al.; 2016

2.3 Controle PID

Um controlador PID tem como função manter um sistema, de forma mais aproximada possível, continuamente correspondendo a um parâmetro de referência, este parâmetro é o set-point. O sistema de controle utiliza o set-point para calcular a diferença entre esse valor de referência e os valores reais das variáveis do processo, essa diferença é tida como o Erro (GARCIA, 2018). O sistema pode assumir controle apenas proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo ou proporcional-integral-derivativo a depender de sua aplicação. A Equação 1 é a que relaciona o sinal de saída do sistema (com os valores reais do processo) com o set-point (valor parâmetro para o sistema), no domínio da frequência (OLIVEIRA, et al.; 2016) é dada por:

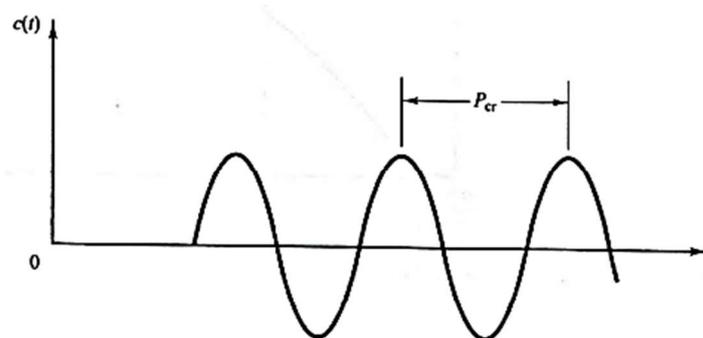
$$u(t) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} + T_d s \right) e(t) \quad (1)$$

Onde, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador no domínio de La Place e $e(t)$ o erro.

2.4 Método de Sintonia do Ganho Crítico (Malha Fechada)

O método de sintonia de controle do Ganho crítico, proposto por Ziegler e Nichols em 1942, é aplicado no sistema em malha fechada, caracterizando um sistema de realimentação, onde o sinal de saída do controlador é utilizado para o ajuste do sistema (BEGA, 2011). A aplicação deste método consiste em zerar a ação derivativa do controlador PID e elevar ao máximo a ação integral, enquanto se aumenta gradativamente a ação proporcional através do seu valor de K_p , até que se atinja uma oscilação constante no sistema, como na demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Curva de oscilação mantida para obtenção do período crítico



Fonte: OGATA, 2015

Ao atingir a oscilação mantida do sistema, o valor de K_p resultante da oscilação é tido como o ganho crítico (K_{cr}), e o tempo decorrido entre os picos de oscilação é o período crítico (P_{cr}). Com os valores do ganho crítico e período crítico, é possível determinar os valores do Ganho proporcional, Tempo Integral e Tempo derivativo a serem posteriormente na função de transferência do controle PID (PIRES, 2014), utilizando a Tabela 1.

Tabela 1 – Método Ziegler e Nichols do Ganho Limite

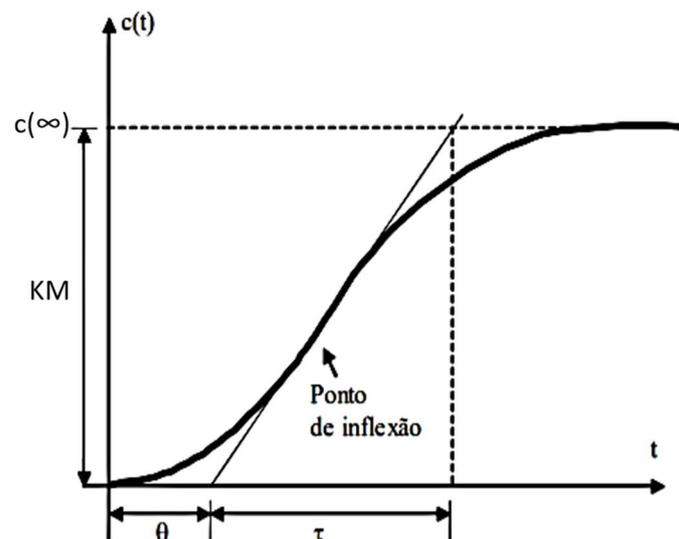
Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$0,5K_{cr}$	–	--
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	--
PID	$0,6K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Fonte: PIRES, 2014

2.5 Método de Sintonia da Curva de Reação (Malha Aberta)

O método de sintonia da Curva de Reação, também proposto por Ziegler e Nichols em 1942, consiste em imputar ao sistema uma variação do tipo degrau, para isso, o sistema é colocado em malha aberta. Com a variação imputada ao sistema, deve-se analisar o comportamento da curva de reação que deve gerar uma amplitude do tipo S (BRAGA, 2016), como mostrado na Figura 4.

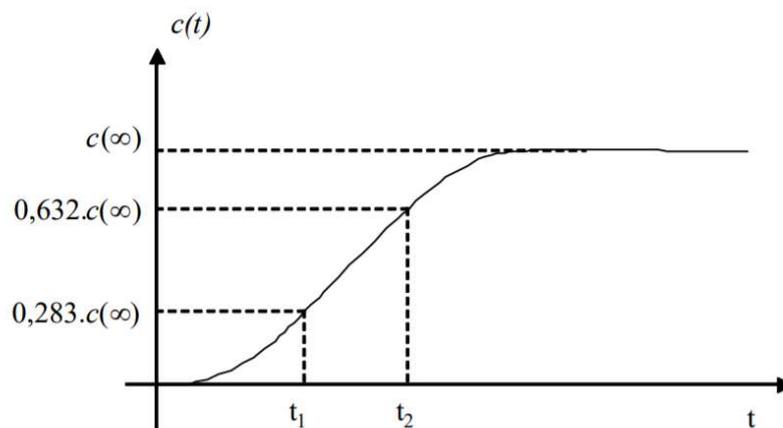
Figura 4 – Curva de Reação



Fonte: Adaptado de Ogata (2015)

Pela própria característica de dinamicidade dos sistemas de controle, nem sempre é possível aplicar o método do ponto de inflexão para a determinação dos parâmetros. Como alternativa, é possível aplicar o método de aproximação apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Método da aproximação para determinação de parâmetros através da curva de reação



Fonte: Ogata (2015)

Sendo possível, então, determinar os valores de θ (tempo de atraso) e τ (constante de tempo), por meio das relações:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \text{ e } \theta = t_2 - \tau$$

Com a obtenção da curva de reação, é possível identificar o tempo de retardo (θ) e a constante do tempo (τ); enquanto o ganho do sistema é dado por $K = c(\infty)/M$, onde M é a amplitude do sinal de degrau imputado ao sistema. Com os valores de θ , τ e K conhecidos, é possível conhecer os parâmetros de ajusta através da Tabela 2:

Tabela 2 – Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação

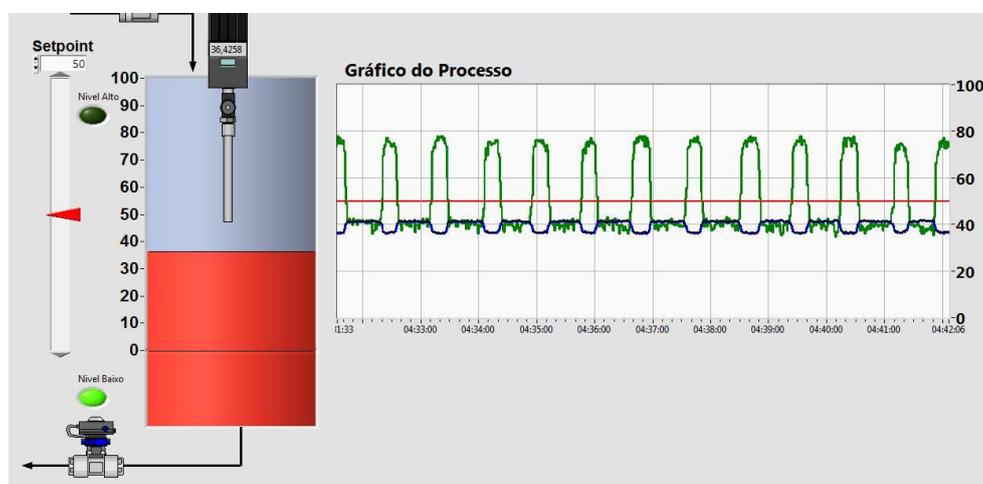
Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{\theta}{0.3}$	0
PID	$1,2 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	2θ	0.5θ

Fonte: BRAGA, 2016

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao aplicar o método de sintonia para malha fechada (Ganho Limite), as ações derivativa e integral do controle foram zeradas e o ganho proporcional foi aumentado de cinco em cinco por cento até que o sistema alcançasse a oscilação mantida. A oscilação mantida foi alcançada quando o valor de K_p foi igual a 15, o qual passou a ser adotado como o valor do ganho crítico (K_{cr}), enquanto o período crítico (P_{cr}) foi de 30 s (0,5 min). A Figura 6, demonstra o momento em que o sistema alcança a condição para a aplicação do método de sintonia, onde a linha verde indica o comportamento da variável manipulada (a abertura da válvula de controle); a linha azul o nível, o comportamento da variável controlada (o nível); e a linha vermelha, o valor referência adotado (o setpoint).

Figura 6 – Gráfico de resposta do processo em oscilação mantida



Fonte: Autoria Própria (2021)

Ao utilizar a Tabela 1 para definir os valores dos parâmetros de ajustes, foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste experimental obtidos pelo método do ganho Limite

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	7,50	–	--
PI	6,75	0,416	--
PID	9,00	0,250	0,0625

Fonte: Autoria Própria (2021)

Dessa forma, os valores finais de K_p , T_i e T_d , foram determinados ao aplicar os parâmetros de ajustes encontrados na Tabela 3 na Equação 1, que relaciona os sinais de entrada e saída de um sistema de controle PID, como é possível encontrar na Tabela 4.

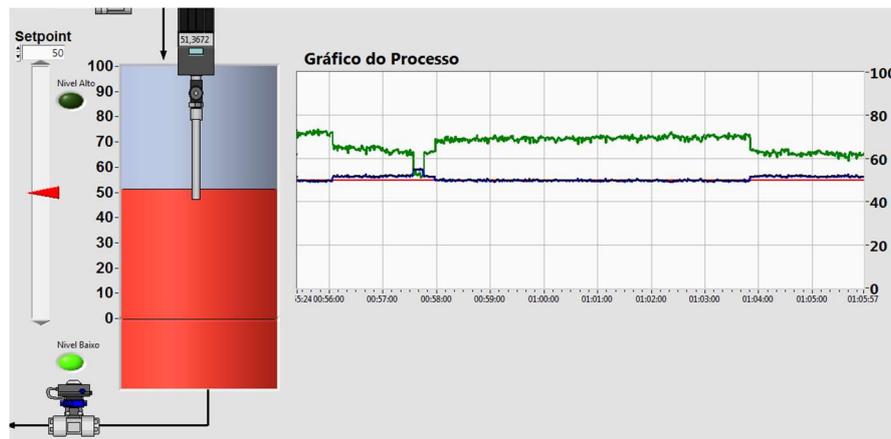
Tabela 4 – Parâmetros de sintonia do controlador em malha fechada

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	7,50	–	--
PI	6,75	16,22	--
PID	9,00	36,00	0,5625

Fonte: Autoria Própria (2021)

Ao aplicar os parâmetros de sintonia encontrados, obteve-se os seguintes gráficos de processo, encontrado nas Figuras 7 e 8, respectivamente para controle PI e PID.

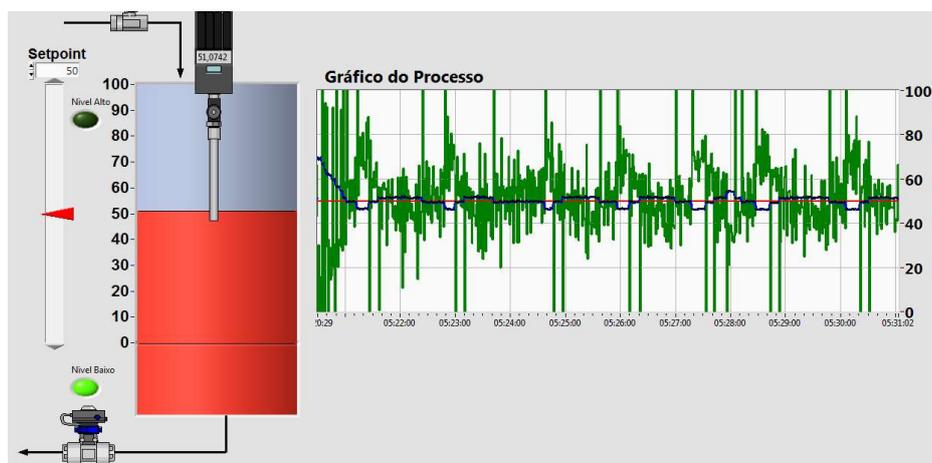
Figura 7 – Gráfico de processo sob ação de controle PI sintonizado pelo método ganho limite



Fonte: Autoria Própria (2021)

Observa-se que houve um ajuste satisfatório do sistema a um set-point igual a 50, em menos de 30 segundos utilizando sintonia em malha fechada sob as ações proporcional e integrativa. É possível analisar também, que existe um ruído a certa frequência, que faz com que o sistema apresente uma pequena variação de nível e logo retorne para o set-point. O nível, representado pela linha azul do gráfico mantém-se sempre muito próximo ao set point (linha vermelha do gráfico, mesmo enquanto a abertura da válvula apresenta oscilações maiores (representada pela linha verde do gráfico).

Figura 8 – Gráfico de processo sob ação de controle PID sintonizado pelo método ganho limite

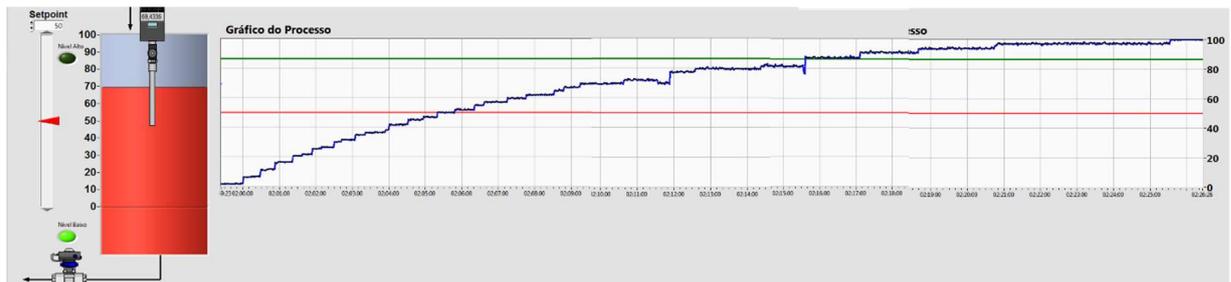


Fonte: Autoria Própria, 2021

Quando submetido à ação PID, sintonizada pelo método de malha fechada, o sistema apresenta grande dificuldade em manter o nível no set-point, dessa forma, fazendo com que a variável manipulada (abertura da válvula) se torne extremamente instável, isso se dá devido ao alto ruído do sistema e pelo fato de ser um sistema que apresenta uma alta taxa de oscilação, o que faz com o que o ganho derivativo não seja aconselhado. Apesar de manter o nível em uma oscilação aceitável para determinados processos que não necessitem de valores exatos de nível, esta ação de controle traz prejuízo direto para o equipamento, uma vez que infringe à válvula, uma ação repetitiva de abertura-fechamento excessiva, podendo à longo prazo diminuir o tempo de vida do equipamento.

Para aplicar o método de sintonia de controladores da curva de reação, o sistema foi colocado sob uma perturbação do tipo degrau de 60% no nível. A partir dessa perturbação, obteve-se o seguinte gráfico, encontrado na Figura 9.

Figura 9 – Curva de Reação do Sistema



Fonte: Autoria Própria (2021)

O tempo de retardo (θ), foi de 21 segundos, enquanto o tempo constante (τ), foi de 270 segundos, obtidos pelo método da aproximação demonstrado na Figura 5. O equilíbrio do sistema foi alcançado no nível 100%. Tendo esses valores conhecidos, foi possível obter os parâmetros de sintonia, encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de sintonia obtidos pela curva de reação

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	7,70	∞	0
PI	6,93	70,00	0
PID	9,24	42,00	10,50

Fonte: Autoria Própria (2021)

Ao aplicar os parâmetros de sintonia encontrados pelo método da curva de reação, os gráficos encontrados nas Figuras 10 e 11, representam o comportamento do sistema, respectivamente, sob ação de controle PI e PID.

Figura 10 – Gráfico de processo sob ação de controle PI sintonizado pelo método curva de reação

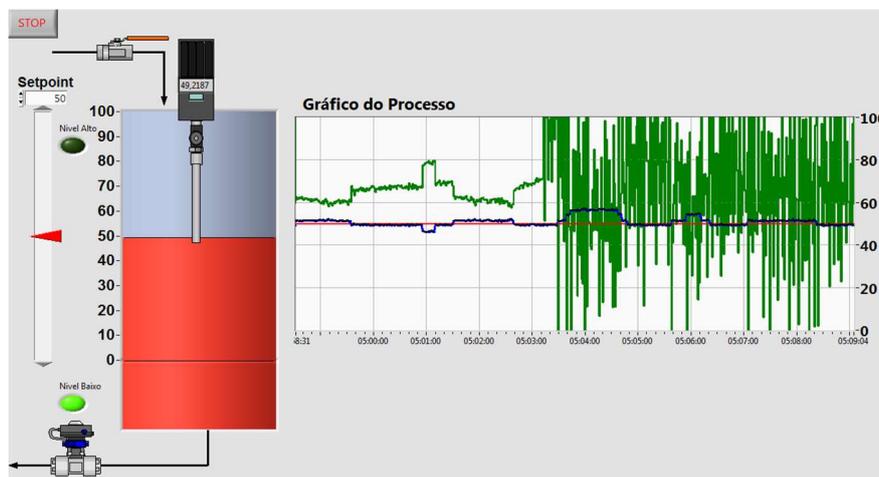


Fonte: Autoria Própria (2021)

Observa-se, através da sintonia imposta por malha aberta sob as ações proporcional-integral, que o sistema apresenta dificuldade em permanecer exatamente no set-point adotado, apesar de apresentar uma variação de nível aceitável, de cerca de apenas 5% no nível. O sistema também apresenta certo ruído periódico que acentua as alterações de níveis. Ainda assim, o tipo de sintonia pode ser adotado para determinados processos, uma vez que as variações de nível apresentadas são toleráveis. Nota-se que a sintonia por malha fechada sob as ações proporcional-integral, representada pelo gráfico encontrado na Figura 6, exibe uma vantagem em relação a esta sintonia, uma vez que

consegue fazer com que o sistema corresponda ao set-point de forma mais satisfatória e com menos oscilações e ruídos.

Figura 11 – Gráfico de processo sob ação de controle PID sintonizado pelo método curva de reação



Fonte: Autoria Própria (2021)

Quando submetido à sintonia por malha aberta sob as ações proporcional-integral-derivativa, o sistema apresenta resposta semelhante a encontrada na Figura 7, quando imposto à sintonia por malha fechada. A ação derivativa oferece ao sistema maior instabilidade, pelos mesmos motivos citados na aplicação da ação derivativa no sistema sintonizado pelo método do Ganho Limite, a velocidade de oscilação do sistema é incompatível com a utilização da ação derivativa uma vez que se apresenta em excesso.

É entendido, pois, que a sintonia que oferece maior estabilidade e responde de forma mais satisfatória para este sistema é a Sintonia determinada pelo método de malha fechada de Ziegler e Nichols. Os métodos de sintonia desenvolvidos por Ziegler e Nichols podem ser entendidos como um ponto de partida para determinar o melhor ajuste do sistema (OGATA, 2015), sendo assim, mesmo tendo sido alcançado um nível de controle satisfatório através do método de malha fechada, o sistema ainda pode ser submetido à um ajuste fino que pode melhorar a eficiência do controle, como mostrado por Oliveira e colaboradores (2016).

O método da curva de reação, apesar de mais simples por haver a necessidade de apenas um experimento, oferece uma maior margem para erros de interpretação humana, uma vez que a interpretação da curva de reação pode não ser exata em sistemas com oscilações, fazendo com que haja uma maior probabilidade de erro. Além disso, como é

determinado em malha aberta, qualquer anomalia no momento da determinação dos parâmetros pode ocasionar parâmetros de ajuste destoantes (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-IAEINI, 2013).

Sabe-se que a ação derivativa busca agir de forma antecipada ao erro, para isso, ela deve ser proporcional à velocidade do erro (GARCIA, 2018). Uma vez que o sistema apresentado neste trabalho demonstrou um ruído muito alto e uma oscilação constante que pode ser percebida pelos picos de variação ao longo do processo, a ação derivativa não se aplica a ele, uma vez, que o sistema não daria conta de antever com eficiência o erro uma vez que o mesmo é constante, dessa forma, explicando a grande oscilação nas respostas do sistema quando colocado sob as ações PID sintonizadas tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Esse tipo de comportamento é comum à grande parte dos processos reais, por isso, o controle PI é o mais encontrado na Indústria (GARCIA, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao aplicar os métodos de sintonia desenvolvidos por Ziegler e Nichols em malha aberta (Método da Curva de Reação) e em malha fechada (Método do Ganho Limite), notou-se que o sistema alcançou níveis satisfatórios de controle para ambos métodos de sintonia quando submetidos as ações proporcional-integral, porém, demonstrou também, para ambos métodos de sintonia, instabilidade quando submetidos as ações PID devido à natureza oscilatória do sistema. O método do Ganho Limite foi o que demonstrou melhor eficiência, uma vez que conferiu ao sistema maior estabilidade. Como sugestão para a melhoria do controle do processo, sugere-se que seja feito o ajuste fino dos parâmetros de sintonia encontrados pelo método do ganho limite para que se possa conferir ao sistema maior estabilidade.

REFERÊNCIAS

ARRUDA, W. F. et al. Projeto de uma planta didática de controle de nível com interface Arduino-LabVIEW nos cursos de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza.

BATISTA, R. G.; MENEGHETTI, C. R. Sistema comparativo de controle inteligente de nível aplicado às lógicas Fuzzy e PID. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 21, n. 38, p. 53-63, jun. 2018.

BEGA, E. A. (org). **Instrumentação Industrial**. 3ª Ed. [S.L.]: Interciência, 2011.

BRAGA, E. R. Sintonia do controlador pelo método de Ziegler e Nichols, para especificação de topo de uma coluna de destilação. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v. 02, n. 03, 2016.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª Ed. São Paulo: Bookman, 2013.

FREITAS, K. P. M. Gerenciamento de Riscos Ambientais na Indústria de Petróleo. **Revista Valore**, v. 06, p. 6013-6024, 2015.

GARCIA, C. Controle de Processos Industriais: Estratégias convencionais – Volume 1. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018.

GARCIA, C. Controle de Processos Industriais: Estratégias Modernas – Volume 1. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2019.

GEROMEL, J. C.; KOROGUI, R. H. Controle Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, ensaios práticos e exercícios. 2ª Ed. São Paulo: Blucher, 2019.

LEONARDI, F. et al. Projeto de Controladores PID Robustos via Otimização Numérica com Aplicação no Controle de Nível. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 05, n. 05, 2019.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

OLIVEIRA, J. P. A. et. Al. Control Plant Generic PID Controllers Using the Second Tuning Methods Ziegler-Nichols. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 02, n. 08, 2016.

PANDA, R. C. (org.) **Introduction to PID Controllers**. 1ª Ed. [S.L.]: IntechOpen, 2012.

PIRES, V. P. SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID EM UM SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO. **Revista da Graduação**, v. 7, n. 2, 8 dez. 2014.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). **Controle Automático de Processos**. São Paulo: SENAI-SP, 2015.

ARTIGO A SER SUBMETIDO À REVISTA INTERNATIONAL JOURNAL OF
DEVELOPMENT RESEARCH ISSN: **2230-9926**
Qualis A2

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE CONTROLE CONTÍNUO DE NÍVEL BASEADA EM ARDUINO, CONTROLE PI E LABVIEW

Myllena Syngred Raimundo Santana

Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais
Recife, Pernambuco, Brasil
m.syngred@gmail.com

Resumo. O controle de processos tem como finalidade garantir que um determinado processo se mantenha em conformidade com os parâmetros adotados, esses parâmetros devem buscar sempre a máxima eficiência do sistema. Tratando-se do controle de nível, o controle do processo passa assumir também um papel crucial na segurança da operação, uma vez que falhas relacionadas ao controle de nível podem vir a gerar riscos ao sistema, a vida humana e ao meio ambiente. Estima-se que apenas 23% dos processos industriais funcionem de maneira automática, acarretando assim em maior probabilidade de perdas, acidentes e erros humanos. Sendo o controle de nível, um dos processos mais comuns e necessários na indústria, este trabalho visou desenvolver uma estratégia de controle de nível, visando a máxima eficiência dos sistemas e a prevenção de acidentes ambientais, utilizando controle PID, associado ao uso da plataforma open source Arduino e do Software LabVIEW em uma planta didática. A estratégia desenvolvida foi associadas à processos reais com grandes possibilidade de ganhos à sua implementação.

Palavras chaves: Sistemas de controle, Controle Automático, sintonia de controle

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento e controle são práticas comuns do funcionamento de processos industriais. É através desse controle que os parâmetros de funcionamento ótimo dos sistemas são mantidos. Além de garantir maior qualidade do produto, o controle garante uma maior eficiência do sistema, gerando assim maior confiabilidade do processo, disponibilidade do sistema, segurança operacional, diminuição da probabilidade de erros e falhas, e redução no custo de manutenção e operação (FRANKLIN. POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013; SILVA, et al.; 2020). Apesar dos já conhecidos e comprovados benefícios do monitoramento e controle de processos, é estimado que apenas 23% dos processos industriais sejam automáticos (GARCIA, 2019).

Para definir a melhor estratégia de controle de um sistema, vários parâmetros devem ser levados em consideração, desde as variáveis do sistema em si, até a necessidade de robustez do sistema, de uma forma geral, o melhor controle é aquele que atenda as especificações e tenha o melhor custo-benefício. Atualmente, existem diversas estratégias de controle modernas, porém, estima-se que mais de 90% dos sistemas de controle são do tipo convencionais, uma vez que as estratégias de controle convencionais atendem as demandas necessárias dos processos industriais e são relativamente simples (GARCIA, 2019; GARCIA, 2018).

Uma das maneiras mais comuns de classificações do controle, são entre: Controle contínuo e controle discreto. No controle discreto, o mais comum é que o sistema atue entre um range de dois valores (ligado, desligado; aberto, fechado), já no sistema contínuo, o sistema de controle pode assumir uma infinidade de valores entre um valor de mínimo e máximo, onde geralmente, esses valores são proporcionais à um parâmetro previamente referenciado. Controle ON-OFF é um tipo de controle discreto, já controles do tipo contínuos podem ser encontrados em diversos tipos de controles PID (GARCIA, 2018; GEORGINI, 2018; OSCAR, 2016).

O controle de nível é um processo deveras comum nas indústrias petroquímicas, biotecnológicas, alimentícias, entre muitas outras. Apesar de comum, falhas no controle de nível podem impactar diretamente na qualidade final do produto e ainda causar danos (problemas no reabastecimento ocasionando trabalho a seco de uma bomba acarretando queima do equipamento, por exemplo) e acidentes graves de trabalho e ambientais (transbordamento de grandes quantidade de líquido/material, por exemplo), em contrapartida, com um controle eficiente de nível, além da qualidade do produto, pode-se obter redução de custos do processo, aumento da disponibilidade do sistema e produtividade até mesmo, prevenir acidentes com altos riscos de contaminação ambiental (LAMB, 2015; BATISTA; MENEGHETTI, 2018; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020; FREITAS, 2021).

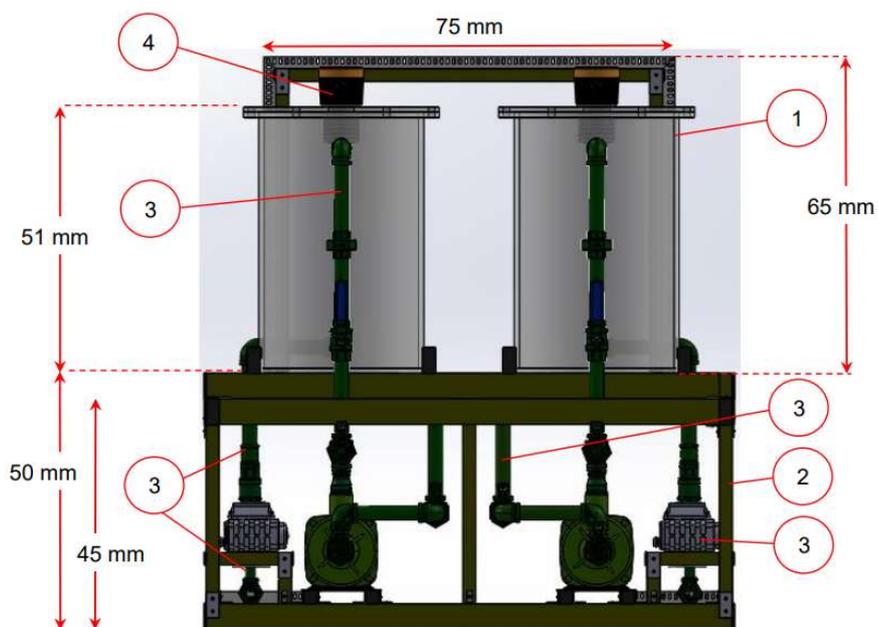
Sabendo da possibilidade de ganhos em sistemas industriais com a adoção do controle de nível eficiente, este trabalho propõe diferentes estratégias de controle de nível que sejam replicáveis em processos reais na indústria com os ajustes necessários para tal. A estratégia proposta é baseada em controle PID aplicada em um processo contínuo, utilizando interface Arduino-LabVIEW, também aplicada à planta didática de controle de nível.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

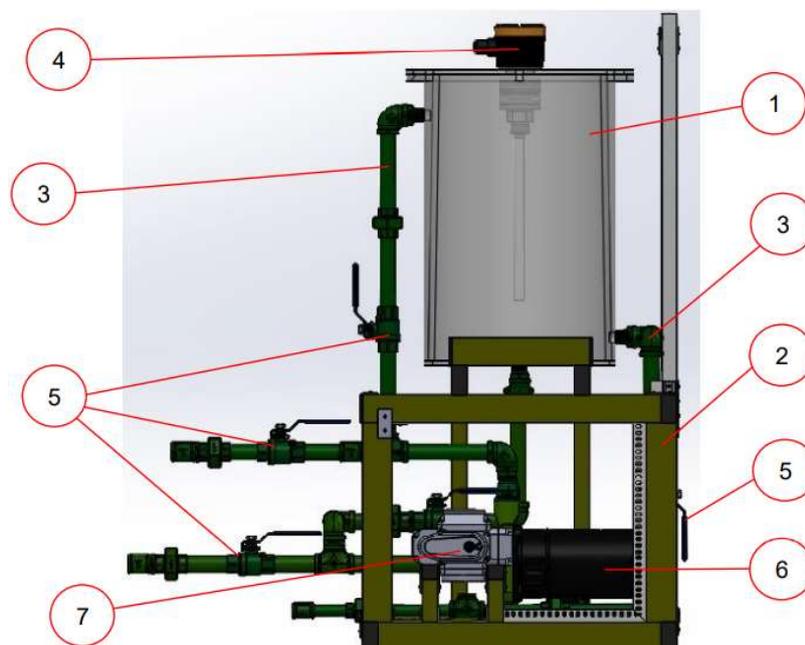
2.1 Planta didática para controle de nível

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizada uma planta didática de controle com características semelhantes e adaptáveis à processos reais na Indústria. A Planta conta com 2 (dois) recipientes cilíndricos de acrílico (1) de medidas $h=51$ cm, $d=40$ cm, sob uma estrutura metálica (2), o transporte de líquido é feito através de tubulações de PVC (3) de $\frac{3}{4}$ de polegadas. A planta é dotada de sensor do tipo boia (4) na sua região superior, possui também válvulas manuais (5) do tipo esfera espalhadas pela planta; 2 (duas) bombas centrífugas (6) trifásicas de 0,33 cv de potência e válvulas de acionamento automático (7) do tipo esferas controladas por CLP, como vide na Figura 1, que mostra respectivamente as vistas frontal (a) e lateral direita (b) da planta.

Figura 1 – Desenho técnico de planta didática de controle de nível



(a) Vista Frontal da planta



(b) Vista lateral direita da planta

Fonte: Lima Filho (2018)

A planta didática foi desenvolvida de maneira a permitir o uso isolado de ambos recipientes ou não, sendo assim, dotada de 2 (duas) partes que podem funcionar de forma simultânea ou em paralelo.

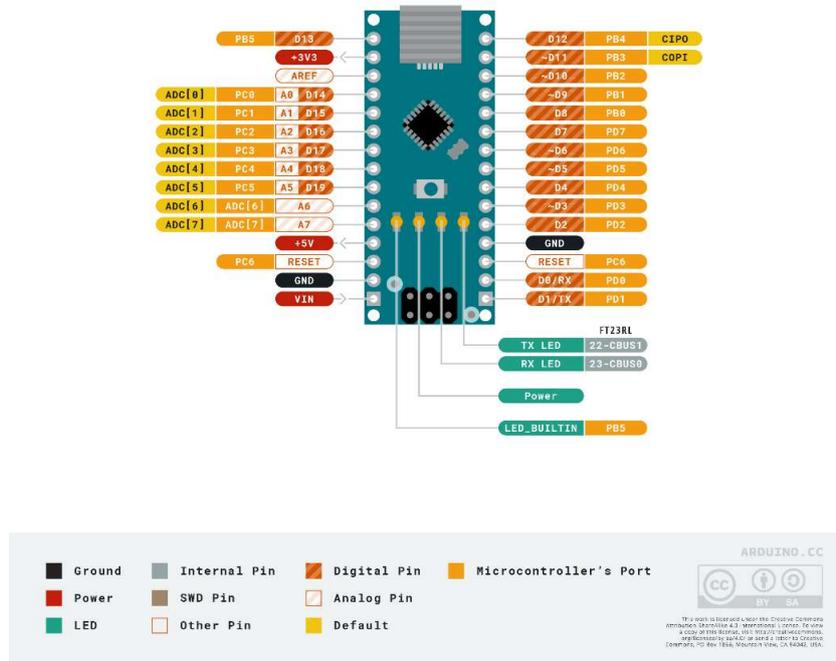
2.2 Controle contínuo utilizando controle PID baseado em Arduino e LabVIEW

A estratégia de controle contínuo proposta para esta planta didática visa manter o nível de líquido de acordo com um set-point pré-estabelecido. Para que isto ocorra, o sensor de nível do tipo boia deve permanecer em contato com o meio líquido de forma a monitorar o nível, que no sistema é a variável controlada. O sinal do sensor é enviado ao Arduino, que por sua vez, deve fazer a inferência entre o nível real do sistema e o nível referência no qual o sistema deve permanecer, feita a inferência, o sinal é convertido por um inversor de frequência e o sinal convertido é enviado às válvulas de acionamento automático, que por sua vez, deverão aumentar ou diminuir o seu diâmetro de abertura (variável manipulada) para permitir o escoamento ou alimentação de fluido no sistema.

Para a aplicação do controle, a planta conta com um sistema de controle lógico programável (CLP) de baixo custo, baseado na plataforma Open Source Arduino e no

software LabVIEW. A placa escolhida para este projeto foi o micro-controlador Arduino Nano, que tem sua pinagem representada na Figura 2.

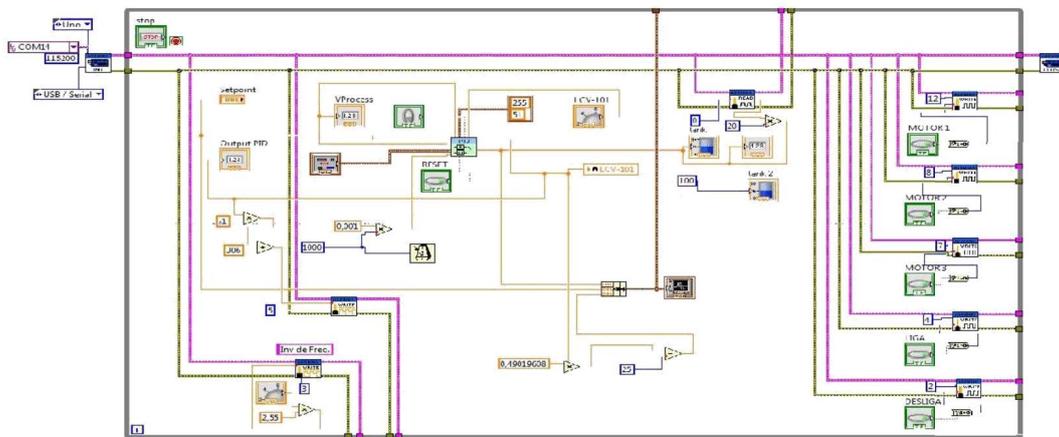
Figura 2 – Esquema de pinagem do Arduino Nano



Fonte: Arduino (2019)

A Figura 3 representa a programação lógica imputada ao sistema desenvolvida em linguagem LabVIEW que representa o funcionamento, antes citado, do sistema de controle.

Figura 3 – Representação lógica do sistema de controle de nível em Tela Block Diagram do LabVIEW

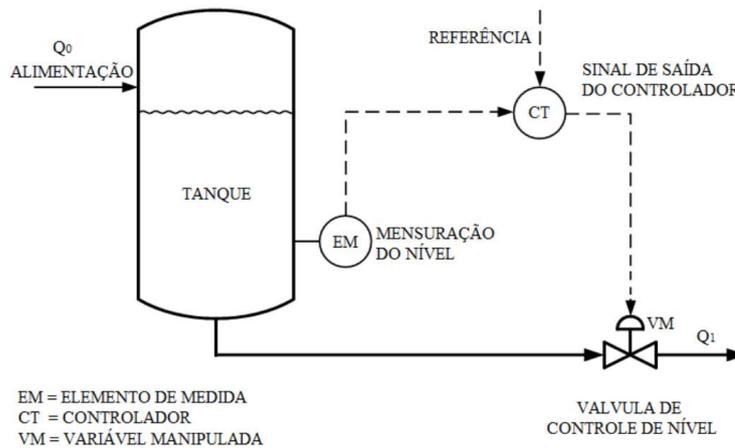


Fonte: ARRUDA, et al.; 2016

2.2.1 Determinação da Função de Transferência da Planta

Para que se pudesse entender de forma simulada como a planta se comportaria utilizando diferentes métodos de sintonia, de maneira a permitir uma melhor análise, buscou-se determinar a função de transferência da planta didática de controle de nível utilizada neste trabalho, cujo o fluxo de líquido corresponde ao sistema mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Representação de fluxo de um sistema



Fonte: SILVA et al. (2018)

Por haver alteração dinâmica do fluxo, já entende-se que o sistema não é linear, porém, como muitos dos processos industriais permitem um range de aceitação grande e são modelados considerando sua forma linear, adotaremos aqui esse tipo de modelagem.

Sabendo que o sistema respeita as leis da conservação da massa e da mecânica dos fluidos, entende-se que a velocidade de saída do fluido levará em consideração, principalmente, a altura no nível de líquido do tanque estudado e a vazão de entrada. Uma vez que a saída é controlada por meio de uma válvula que possui área de saída variante no tempo, isso fará com que a vazão de saída também se altere com o tempo, sendo assim, a relação da saída de líquido com a altura do nível pode ser dada por

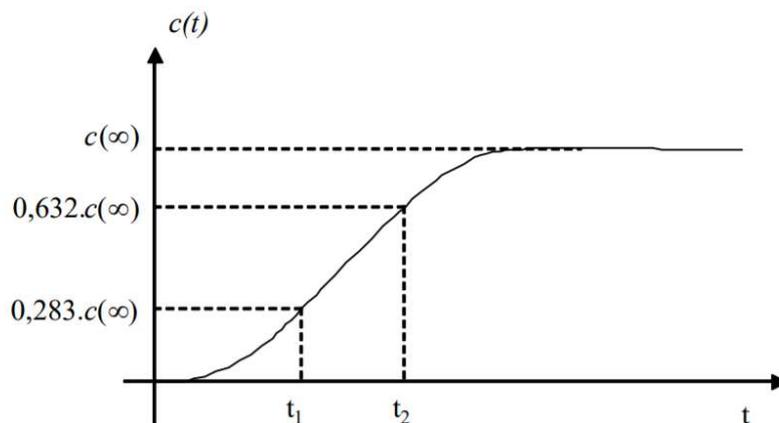
$$\frac{Q_s}{H_s} = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Onde K e τs estão ligados à constante da válvula, e Q_s e H_s representam a relação de entrada e saída sistema sob a ótica da vazão de entrada e saída e a variação de nível.

Isso significa dizer, que o modelo linear da planta didática de controle de nível utilizada nesse trabalho, corresponde a uma função de transferência de primeira ordem.

Para determinar os parâmetros do modelo, foi utilizado o método da curva de reação, onde o sistema foi colocado sob uma perturbação no nível de 60. Como o tempo de estabilização do sistema foi muito longo, dificultando a adoção da determinação dos parâmetros diretamente através do ponto de inflexão, foi utilizado o método da aproximação, presente na Figura 5.

Figura 5 – Método de aproximação para determinação de parâmetros da curva de reação



Fonte: Ogata (2015)

Podendo assim determinar os valores de K (ganho), θ (tempo de atraso) e τ (constante de tempo), por meio das relações:

$$K = \frac{c(\infty)}{M}; \tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \text{ e } \theta = t_2 - \tau$$

Ao determinar os parâmetros, foi possível fazer a montagem do diagrama de blocos do sistema no software gratuito Scilab que permitiu a simulação de diferentes valores de parâmetros de ajuste do controlador.

2.2.2 Controle PI e seus métodos de sintonia

O controlador PI tem como função fazer com que o sistema permaneça em um determinado estado que está relacionado aos valores referência imputados ao sistema pela

ação do controlador. A relação entre o estado real do sistema e os parâmetros de referência, é dada por:

$$u(t) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i} + T_d s \right] e(t)$$

A sintonia do controlador são meios de encontrar os parâmetros de ajuste que forneçam a melhor eficiência para o controlador. Tendo em vista isto, foram avaliados 3 (três) métodos de sintonia de controlador para este trabalho.

Método do Ganho Limite

As ações derivativas e integrais do controle foram colocadas em 0 e o ganho proporcional (K_p) foi aumentado de 5% em 5% até que se obtive-se uma saída oscilatória constante. Quando a oscilação de saída alcançou as características desejadas, o valor de K_p deste momento, foi tomado como o valor de K_{cr} , conhecido como ganho crítico. E o período crítico, ou seja, o tempo decorrido entre o pico de duas oscilações, foi calculado. Os valores de K_p , T_i e T_d , então, foram tomados utilizando a Tabela 1:

Tabela 1 – Método Ziegler e Nichols para Ganho Limite

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$0,5K_{cr}$	–	--
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	--
PID	$0,6K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Fonte: Pires (2014)

Os parâmetros de ajuste determinados pelo método do Ganho Limite foram utilizados na simulação através do software Scilab e posteriormente testado experimentalmente na planta.

Método da Curva de Reação: Por Ziegler e Nichols, e Cohen e Coon

Para obtenção dos parâmetros de sintonia pela Curva de Reação, utilizou-se inicialmente, a metodologia antes citada, representada na Figura 5, para a obtenção dos valores de K, τ e θ . Com os valores determinados, foram utilizadas as Tabelas 2 e 3, respectivamente, para determinar os valores dos parâmetros por Ziegler e Nichols e Cohen e Coon.

Tabela 2 – Método Ziegler e Nichols para Curva de Reação

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{\theta}{0.3}$	0
PID	$1,2 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	2θ	0.5θ

Fonte: Braga (2016)

Tabela 3 - Método Cohen e Coon para Curva de Reação

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[1 + \frac{\theta}{3\tau}\right]$	∞	0
PI	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[0,9 + \frac{\theta}{12\tau}\right]$	$\frac{\theta[30 + 3(\theta/\tau)]}{9 + 20(\theta/\tau)}$	0
PID	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[\frac{16\tau + 3\theta}{12\tau}\right]$	$\frac{\theta[32 + 6(\theta/\tau)]}{13 + 8(\theta/\tau)}$	$\frac{4\theta}{11 + 2(\theta/\tau)}$

Fonte: Pires (2014)

Com os parâmetros de ajuste determinados pelos 2 (dois) métodos, os valores foram utilizados para simular o comportamento do sistema através do software Scilab e posteriormente foram utilizados experimentalmente na planta de controle de nível.

2.2.3 Método de análise e aplicação

Para entender por completo as respostas do sistema, todos os parâmetros de sintonia foram utilizados primariamente em simulação da planta por meio do Software Scilab, após entender como o processo deveria se comportar, através dos sinais obtidos na simulação, os parâmetros foram imputados ao sistema de controle da planta em um set-point 50.

Observou-se o comportamento inicial do processo até o momento da estabilização do sistema, e o tempo levado para esta estabilização, assim como, também, o comportamento das oscilações. Após um determinado tempo de estabilização, o sistema foi imposto a uma perturbação através da variação do set-point, que foi estabelecido de 50 para 75 e mais uma vez, foi observado o comportamento do sistema. Passado o tempo de estabilização do set-point 75, o set-point foi trocado mais uma vez, agora, retornando para 50, e o processo de retorno e estabilização, observado.

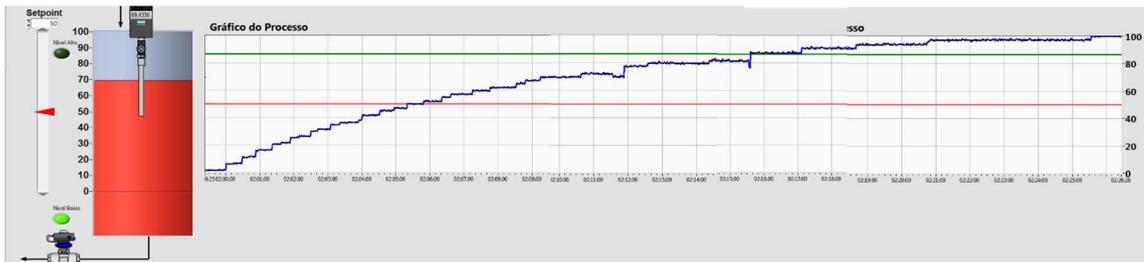
A nível de análise e entendimento, utilizou-se os parâmetros de sintonia do controlador, sintonizado pelo método que apresentou melhor estabilidade, para analisar a viabilidade da utilização do Tempo Derivativo no sistema. Sendo assim, o sistema foi submetido ao controle PID e feito um ajuste fino, até que apresenta-se uma estabilidade no PID aceitável.

Com os parâmetros analisados, a sintonia que imputava ao sistema melhor eficiência e estabilidade foi definida e então foram identificados processos para os quais a estratégia de controle proposta pode ser aplicada e agregar aumento de eficiência ao sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao submeter o sistema a uma perturbação no nível de 60% em malha aberta, o comportamento do momento da perturbação até a estabilização, que aconteceu ao atingir 100% de nível, é registrada pela curva de reação apresentada na Figura 6. Ao analisar o gráfico, é possível notar o comportamento oscilatório do sistema e ruídos mais acentuados ao longo da faixa de estabilização.

Figura 6 – Curva de Reação do sistema



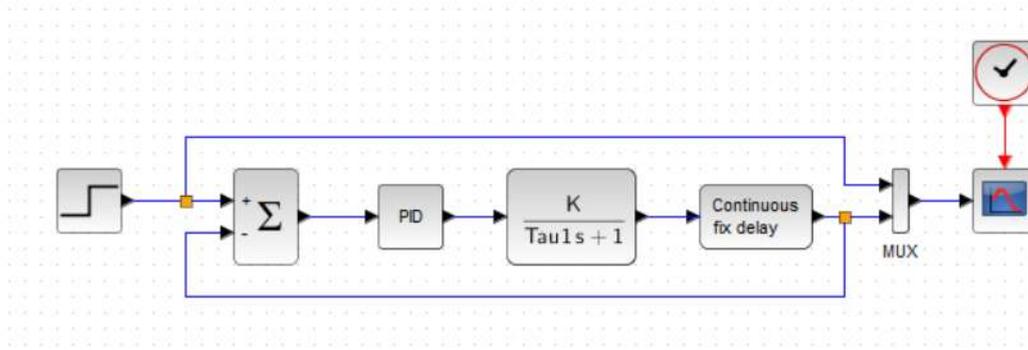
Fonte: Autoria Própria (2021)

Após a obtenção da curva de reação, foi utilizado o método de aproximação na curva de reação para definir o tempo de retardo que foi $\theta = 21$ s e a constante de tempo que foi $\tau = 270$ s; e ainda com a análise gráfica, foi determinado o valor do ganho $K=1,67$. Com os parâmetros, determinou-se a Função de Transferência da Planta:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{1,67}{4,5s + 1} e^{-0,35}$$

O sistema apresentou tempo de retardo maior que zero, logo, a função engloba este tempo também, através da adição da exponencial de $-0,35$, que é representada no Diagrama de Blocos do sistema através do bloco *Continuous fix delay*. Com a função de transferência determinada, foi criado o diagrama de blocos que representa o processo através do Software Scilab, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Blocos da Planta didática de Controle de Nível



Fonte: Autoria Própria (2021)

Foram obtidos, então, os parâmetros de sintonia para que utilizavam os métodos em malha aberta, Curva de Reação de Ziegler e Nichols e Curva de Reação de Cohen e Coon, e posteriormente, foi realizado o método do ganho limite para a obtenção dos parâmetros em

malha fechada, por intermédio do Ganho Limite de Ziegler e Nichols, sendo os valores apresentados na Tabela 4 os utilizados para realizar a sintonia do controlador PI na planta didática de nível.

Tabela 4 – Parâmetros de ajuste para sintonia do controlador

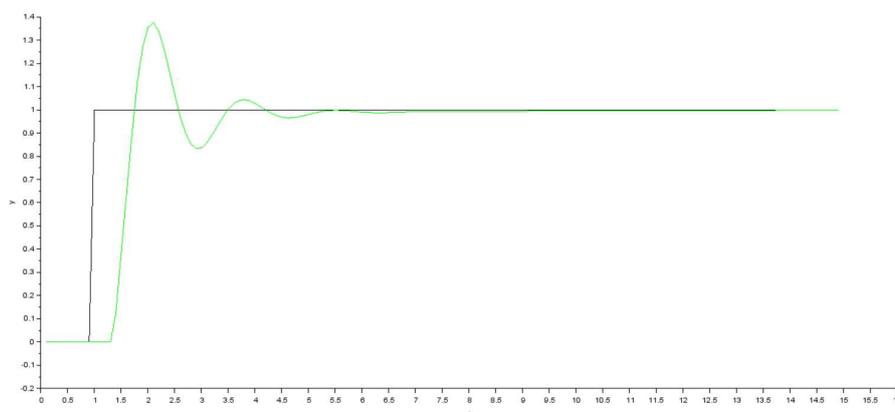
Método de Sintonia	K_p	T_i
Curva de Reação (CC)	6,98	60,15
Curva de Reação (ZN)	6,93	70,00
Ganho Limite (ZN)	6,75	16,20

Fonte: Pires (2014)

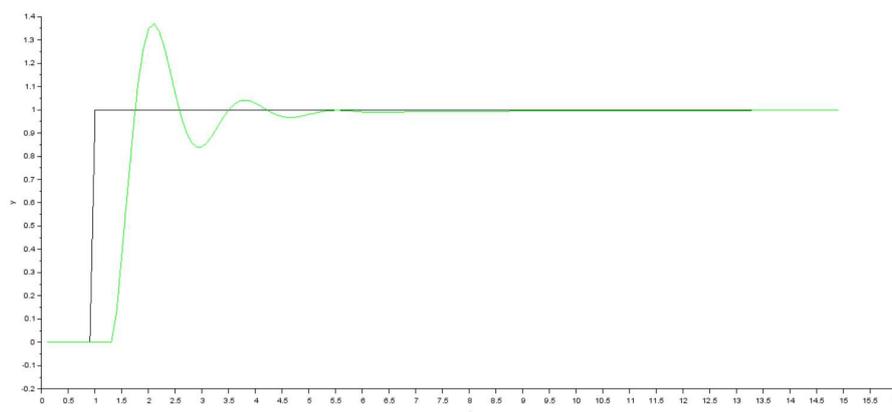
Nota-se, já em uma primeira observação, que os parâmetros assemelham-se nos valores de sintonia do Ganho proporcional, porém, divergem, em até mais de 4 vezes entre o maior e o menor valor para o Tempo Integral.

Ao simular o controle através do software Scilab, com os parâmetros de sintonia, foi obtido as seguintes curvas resposta Figura 8, respectivamente, para o método Curva de Reação Cohen e Coon (a), método Curva de Reação: Ziegler e Nichols (b) e Ganho Limite (c).

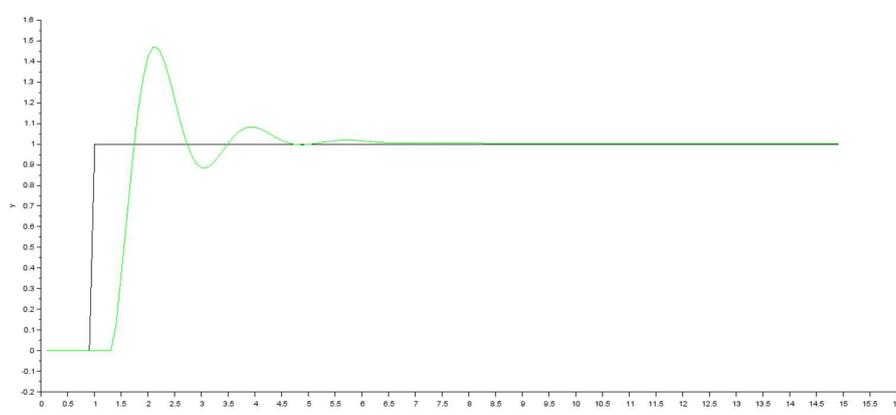
Figura 8 – Curva Resposta do sistema



(a) Sintonizado pela Curva de Reação: Cohen e Coon



(b) Sintonizado pela Curva de Reação: Ziegler e Nichols



(c) Sintonizado pelo Ganho Limite: Ziegler e Nichols

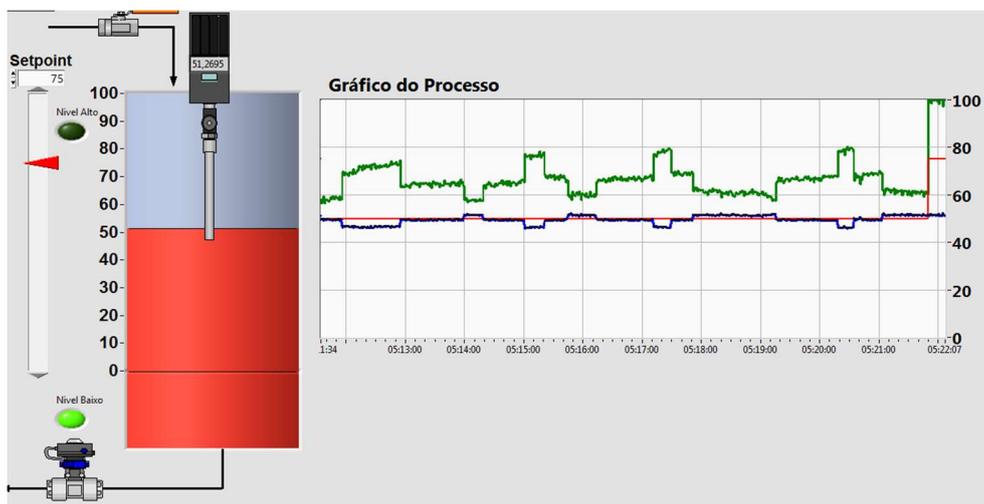
Fonte: Autoria Própria (2021)

Quando simulado, mesmo com diferença substancial nos parâmetros de ajuste para o tempo integral do sistema, as curvas resposta apresentaram, sintonia deveras aceitável e satisfatória, demonstrando uma pequena vantagem para a curva sintonizada por meio do Ganho Limite, onde já no segundo pico o sistema entra em estabilidade, enquanto as curvas resposta sintonizadas por meio dos métodos de curva da reação, apresentam uma amplitude de oscilação maior e uma oscilação a mais para entrar em equilíbrio, porém, satisfazendo ainda assim, uma boa sintonia para controles.

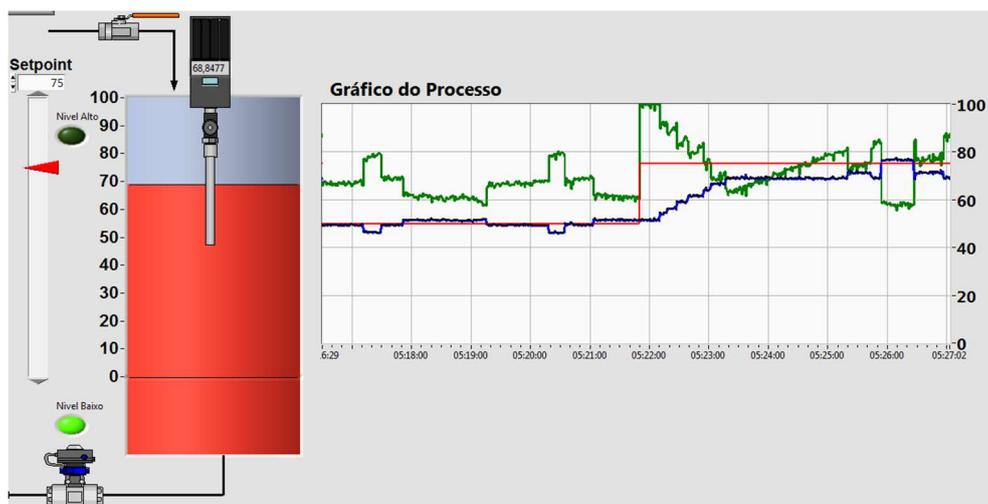
Compreendendo que as linhas vermelhas dos gráficos de controle do sistema representam o valor referência (setpoint) imputado ao mesmo; as linhas verdes, o comportamento da variável manipulada do sistema (abertura da válvula de controle) e as linhas azuis, o comportamento da variável controlada (o nível), seguimos com a interpretação

dos resultados. Ao aplicar experimentalmente os parâmetros de sintonia obtidos pela curva de reação por Cohen e Coon, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Figura 9.

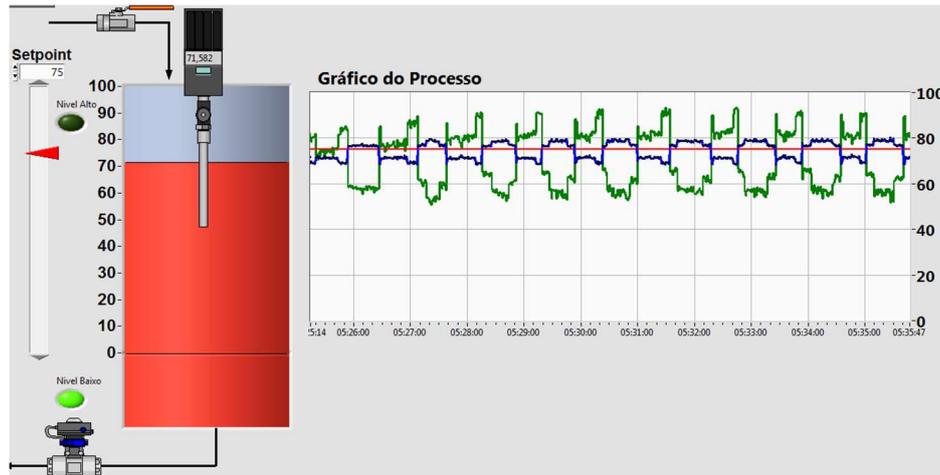
Figura 9 – Controle PI de nível sintonizado pela Curva de Reação de Cohen e Coon



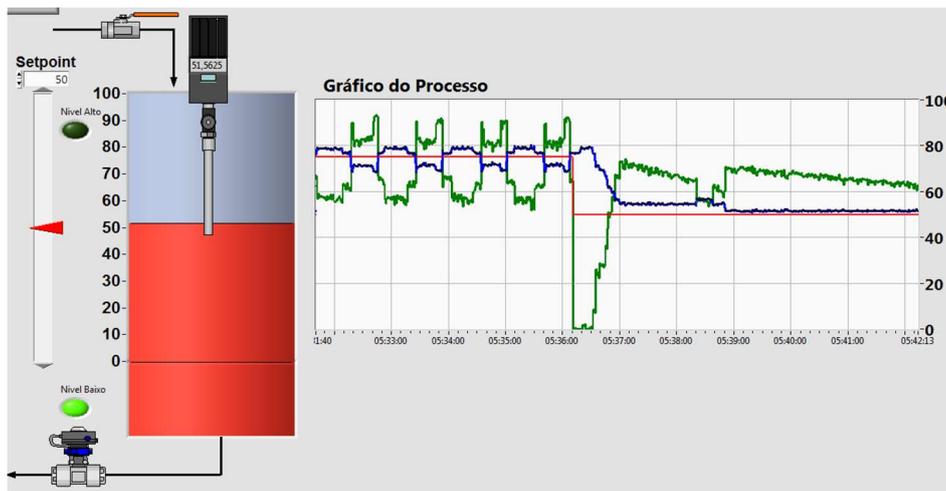
(a) Sistema em estabilidade (Sintonia CC)



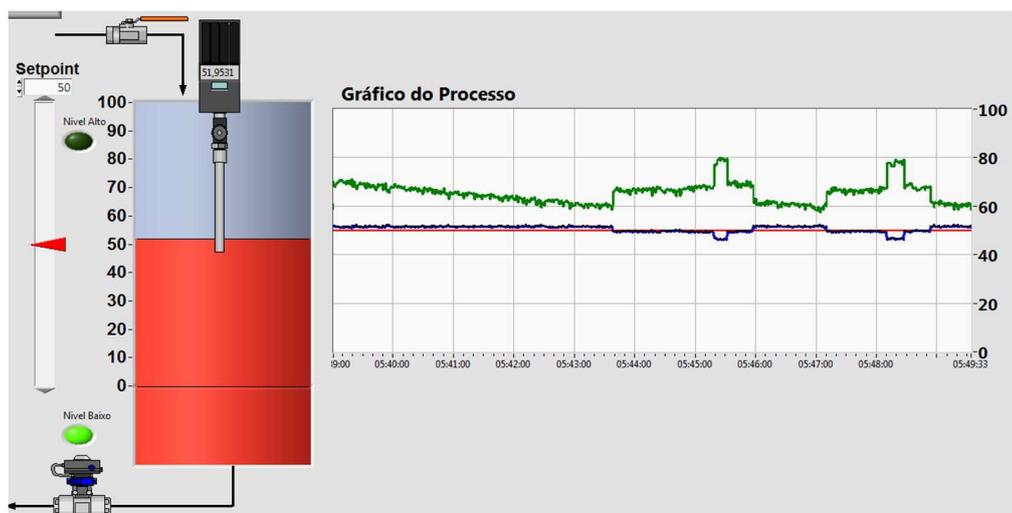
(b) Perturbação superior de 25% (Sintonia CC)



(c) Resposta à perturbação 25% (Sintonia CC)



(d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial (Sintonia CC)

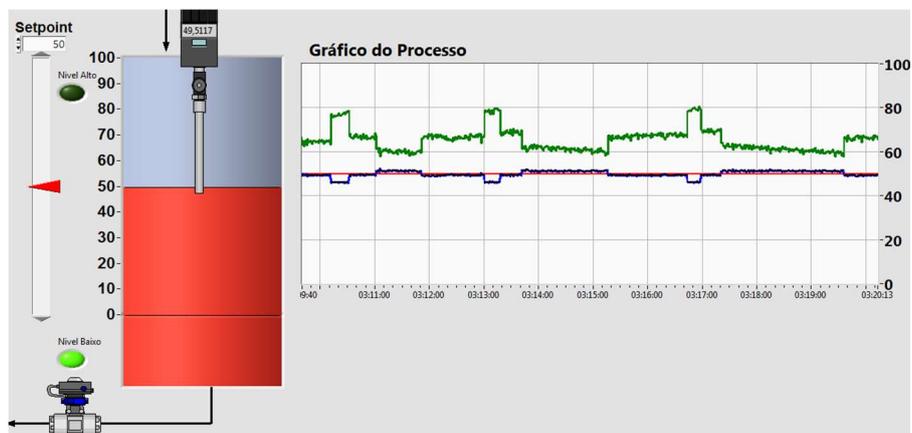


(e) Resposta do retorno ao SP inicial (Sintonia CC)

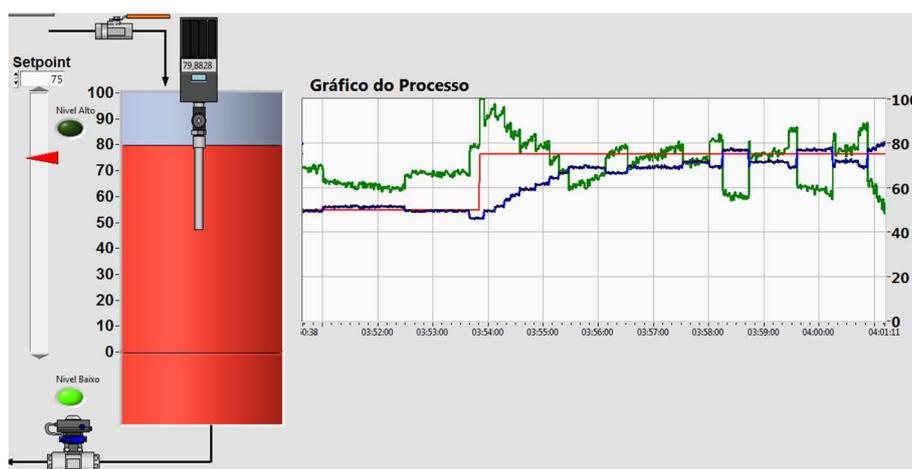
Fonte: Autoria Própria (2021)

Já na Figura 10, encontram-se as reações do sistema de controle de nível da planta sintonizado pelo método da Curva de Reação de Ziegler e Nichols.

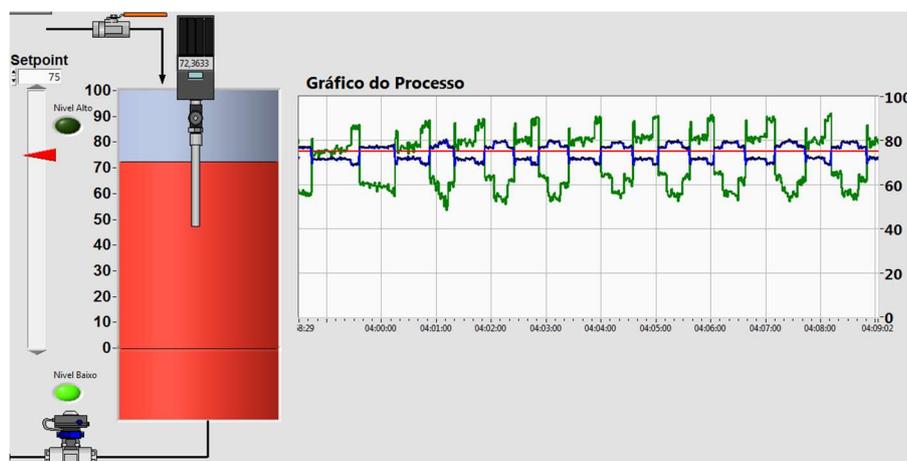
Figura 10 – Controle PI de nível sintonizado pela Curva de Reação de Ziegler e Nichols



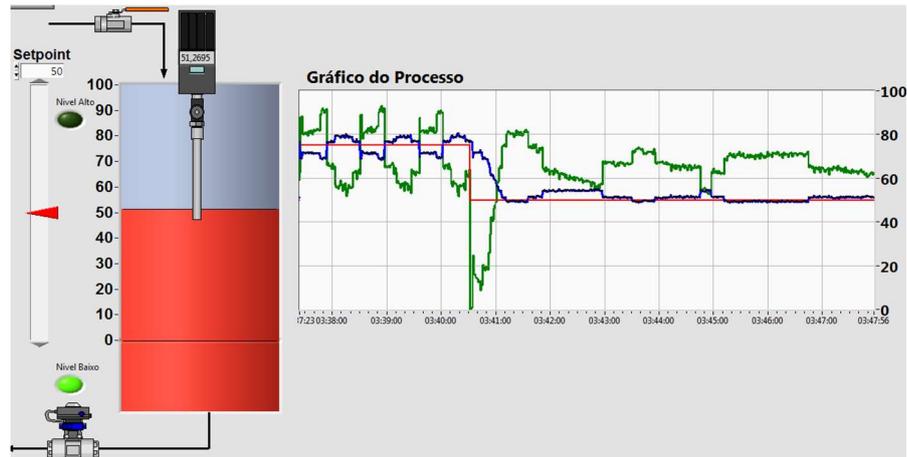
(a) Sistema em estabilidade (Sintonia ZN)



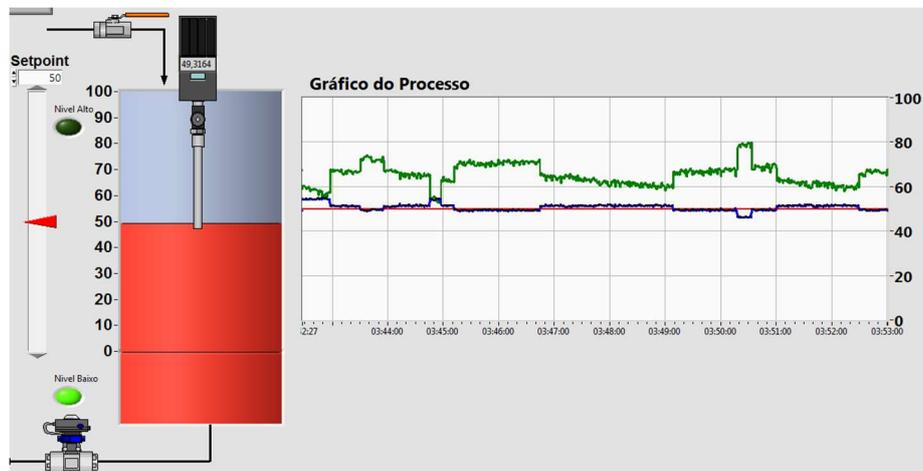
(b) Perturbação superior de 25% (Sintonia ZN)



(c) Resposta à perturbação 25% (Sintonia ZN)



(d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial (Sintonia ZN)

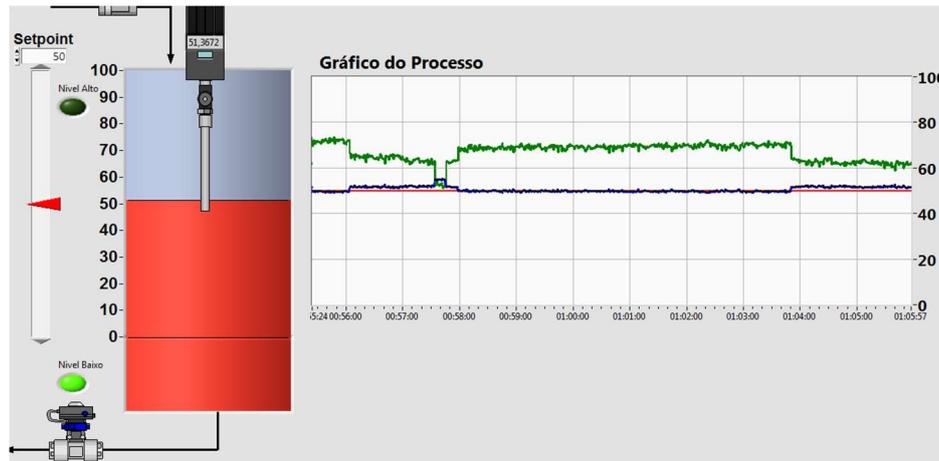


(e) Resposta do retorno ao SP inicial (Sintonia ZN)

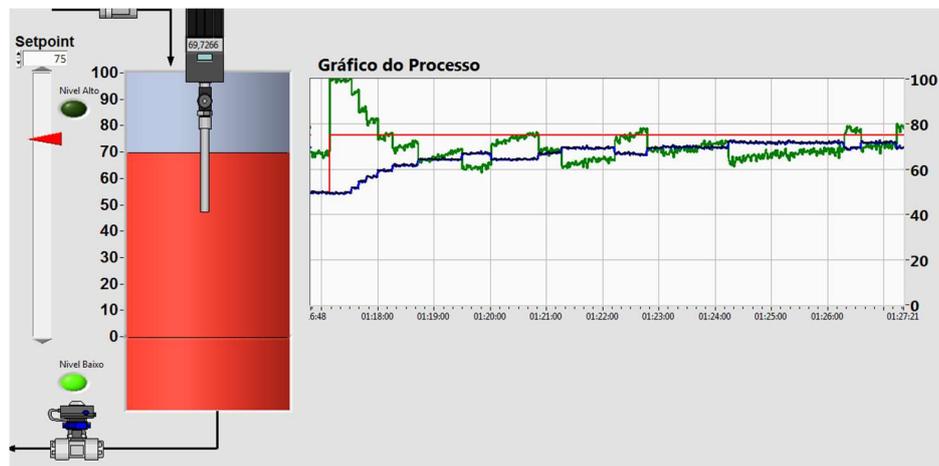
Fonte: Autoria Própria (2021)

Por fim, aplicando experimentalmente os parâmetros de sintonia obtidos por meio do método do Ganho Limite de Ziegler e Nichols, o sistema apresentou as seguintes reações encontradas na Figura 11.

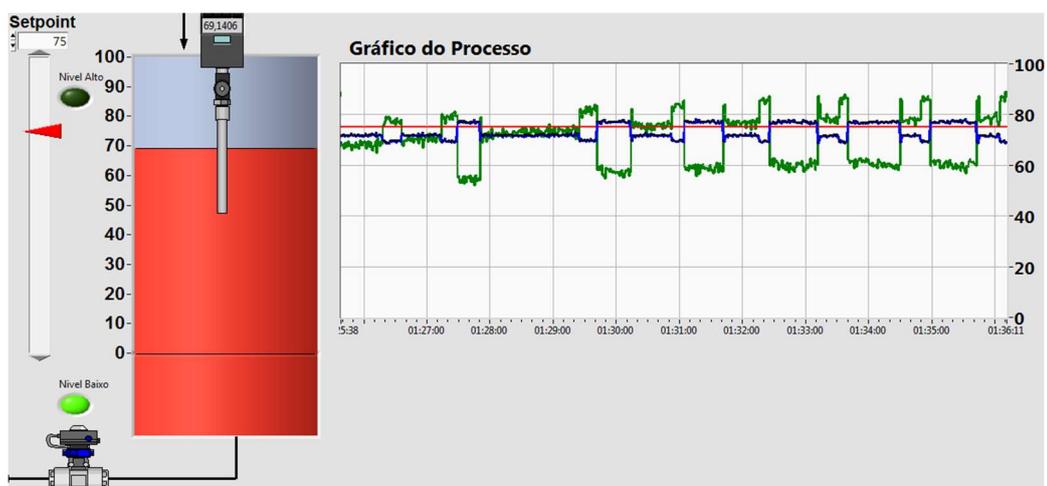
Figura 11 - Controle PI de nível sintonizado pelo Ganho Limite de Ziegler e Nichols



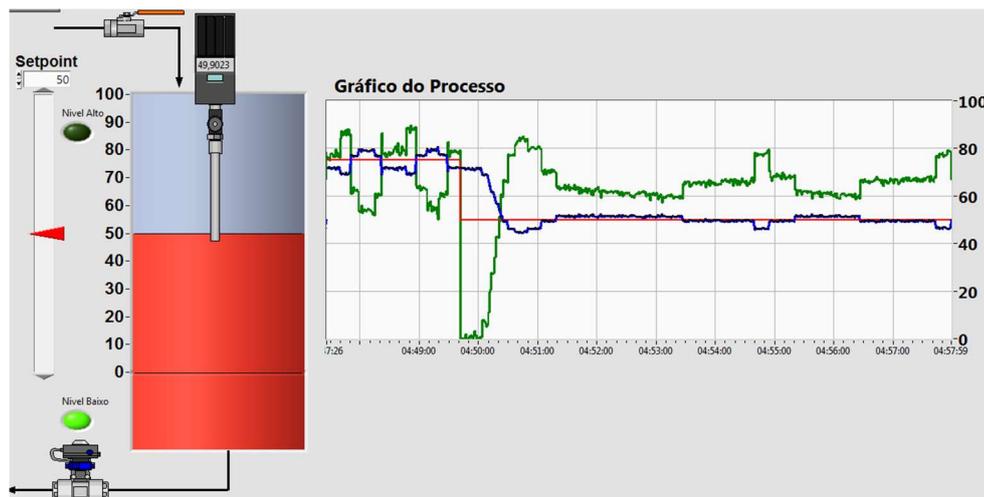
(a) Sistema em estabilidade



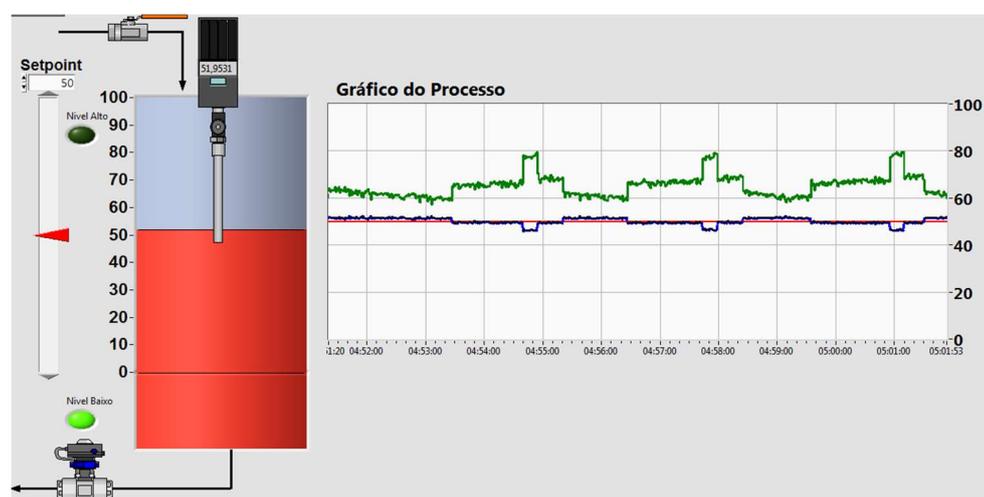
(b) Perturbação superior de 25%



(c) Resposta à perturbação 25%



(d) Perturbação inferior de 25%: Retorno ao SP inicial



(e) Resposta do retorno ao SP inicial

Fonte: Autoria Própria (2021)

Comparando o comportamento do sistema sob a aplicação experimental dos parâmetros de sintonia obtidos pelos métodos da Curva de Reação de Ziegler e Nichols, de Cohen e Coon, e do método do Ganho Limite, observa-se que atingindo a estabilidade para o mesmo set-point (Figuras 9a, 10a e 11a), o sistema apresenta um controle de nível satisfatório, embora, o método do Ganho Limite, apresente um resultado mais estável ao longo do tempo e variações de menor amplitude. Já a resposta do sistema sob a sintonia pelo Método da Curva de Reação, mostrou-se equivalente para ambos os métodos analisados.

O fato do sistema responder de forma satisfatória para os três métodos de sintonia, pode ser associado à própria função da ação integral no controle. A ação do ganho integral busca agir sob a ótica do erro acumulado, que é definido pela amplitude e duração do erro no

decorrer da utilização do sistema. Sendo assim, pode-se dizer que o erro encontrado pelo controlador no sistema deu margem para que o controle se comporta-se de forma quase que linear em um certo intervalo de Tempo Integral (LAMB, 2015; OGATA, 2015).

Quanto à mudança de set-point, nenhum dos métodos utilizados agiu de forma satisfatória (Figuras 9c, 10c e 11c) quando o sistema foi submetido à uma perturbação de 25% (Figuras 9b, 10b e 11b) no aumento do nível requerido. Apesar disso, o sistema mantém um controle de nível aceitável nesta mudança de set-point para processos que não necessitem de um nível de líquido regular, uma vez que a alteração do nível não se altera a mais de 5% por cento (inferior e superior), depois da estabilização do sistema. Entretanto, a oscilação seguirá sendo permanente enquanto o sistema seguir no set-point superior. Mesmo o método do Ganho tendo oscilações com maior amplitude em detrimento aos da Curva de Reação, o sistema ainda exibe uma oscilação mantida.

Este comportamento do sistema pode ter fundamentação matemática ou material. Se matemática, pode estar ligada a definição da Função de Transferência da planta (OGATA, 2015), uma vez que foi obtida em um set-point igual ao do primeiro set-point (50%). A hipótese é reforçada, quando o sistema é retornado ao set-point inicial (Figuras 9d, 10d e 11d), após ser submetido à um aumento de 25%, e ainda assim, ocorre a recuperação do sistema sob as condições de estabilidade do set-point inicial, como nota-se nas Figuras 9e, 10e e 11e. Quanto a fundamentação material (BEGA, 2011; OSCAR, 2016), pode-se ligar a algum problema específico, tanto na abertura da válvula, quanto à capacidade do torque da bomba.

Determinando então que o método de Sintonia do controlador que apresentou melhor eficiência e estabilidade foi obtido pelo método do Ganho Limite, o sistema foi submetido as ações proporcional-integral-derivativa sob a mesma sintonia, cujo os parâmetros podem ser encontrados na Tabela 5:

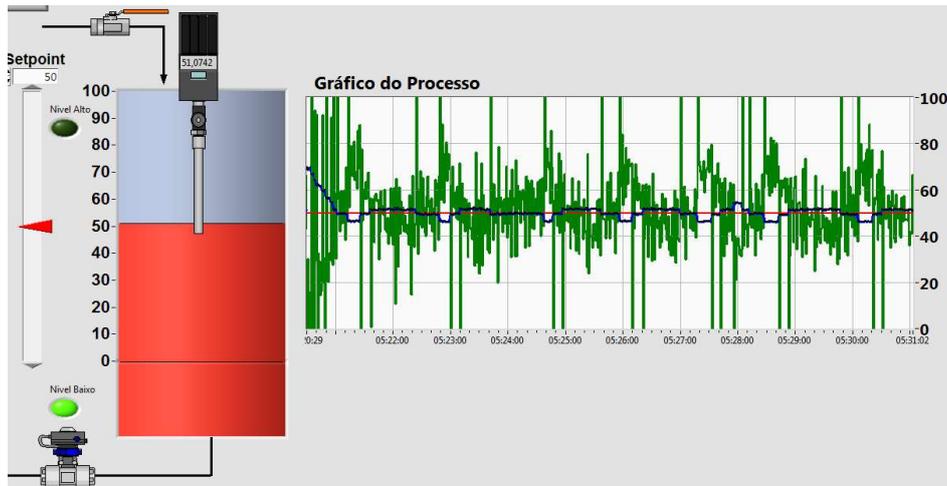
Tabela 5 – Parâmetros de sintonia obtidos pelo Ganho Limite para controle PID

Controlador	K_p	T_i	T_D
PID sem ajuste	9,00	36,00	15
PID com ajuste	9,00	36,00	0,01

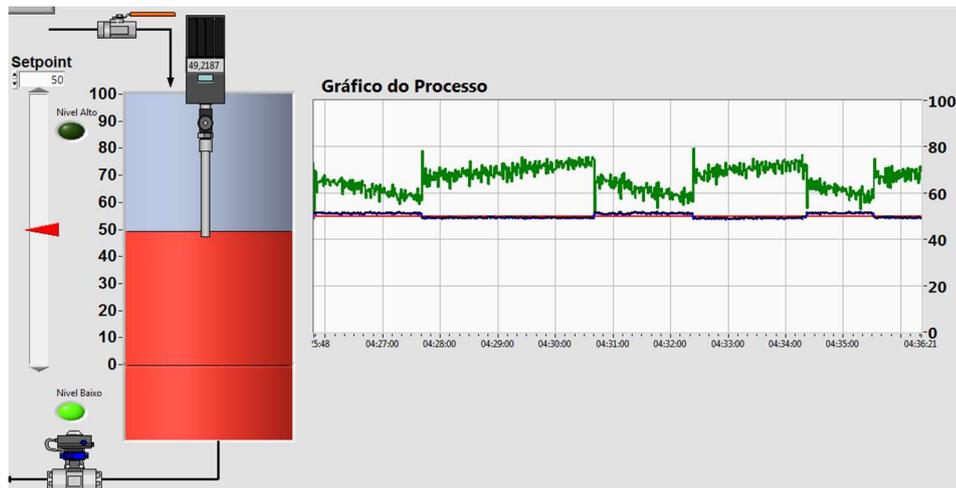
Fonte: Autoria Própria (2021)

Ao ser submetido a um controle PID, o sistema respondeu da maneira apresentada na Figuras 12, respectivamente sem ajuste (a) e com ajuste (b)

Figura 12 – Controle PID sintonizado pelo método Ganho Limite



(a) Controle PID sem ajuste fino



(b) Controle PID com ajuste fino

Fonte: Autoria própria

Ao submeter o sistema aos parâmetros de sintonia obtidos pelo método do Ganho Limite sem ajuste, percebe-se que o sistema apresenta uma instabilidade quase que instantaneamente. A instabilidade só é atenuada quando o Tempo derivativo é reduzido para bem próximo de 0 (zero). Isso acontece devido a própria natureza da ação derivativa que atua antecipadamente ao erro em razão da sua velocidade de ocorrência (FRANKLIN; POWELL; EMANI-ENAINI, 2013). Como o sistema demonstra uma oscilação constante, a ação derivativa não consegue atuar de forma satisfatória no sistema, mesmo apresentando o melhor controle de nível (maior estabilidade e menor oscilação) entre todos os métodos utilizados anteriormente (GARCIA, 2018).

A atuação não satisfatória é justificada pelo desgaste ao qual a válvula é submetida sob a ação PID do controle, uma vez que passa a exigir uma velocidade de abertura e fechamento da válvula que pode elevar o desgaste do equipamento e, conseqüentemente, diminuir seu tempo de vida. Pode-se analisar, estatisticamente (e até financeiramente), se a adoção deste tipo de controle pode compensar o seu uso (BEGA, 2011; OSCAR, 2016).

Neste trabalho, entendeu-se que o uso do controle PI, sob a sintonia do método do Ganho Limite é a que oferece melhor benefício, levando em consideração a efetividade do controle e a conservação do equipamento, sendo assim, a estratégia de controle adotada é proposta para algumas das seguintes aplicações:

- **Ensino de controle de processos para nível técnico e superior:** O controle PID possui grande aplicação na indústria, sendo, muitas vezes implementado por engenheiros, porém, controlado por outros profissionais, dessa forma, entende-se que a prática do processo pode agregar muito valor e conhecimento aos profissionais envolvidos, tanto no planejamento quanto na operação dos sistemas de controle, como é reiterado por Lima, Barros e Acioli Júnior (2020); Verly e colaboradores (2020); Editora Poison (2019); Arruda e colaboradores (2016). É ainda válido salientar, a necessidade da formação de qualidade que compreende os processos de controle como fator crucial para a segurança e prevenção de acidentes.
- **Controle de construções verticais:** Cruz e colaboradores (2016), apontam a estratégia de controle PID sintonizada em malha fechada, vide o método do Ganho Limite, como satisfatória no controle de nível para processos que necessitam de bombeamento de água ou fluidos, no geral, entre recipientes, como também, na alimentação ou reposição de matéria-prima (CRUZ, et al., 2016). O controle PID pode apresentar vantagem neste tipo de processo, uma vez que este tipo de controle de nível não exige que o nível de líquido permaneça, necessariamente, em um mesmo valor, tolerando alterações no nível ao logo do tempo, desde que haja o abastecimento/alimentação/reposição na quantidade desejada (RIBEIRO; SANTOS, 2017). Porém, para processos que necessitem de uma dosagem exata de reposição/alimentação, o sistema proposto pode não garantir a efetividade esperada (BERNER, et al. 2018). Olhando sob a ótica da prevenção de acidentes ambientais, problemas e falhas em tanques de armazenamento e alimentação aparecem como uma das causas principais de acidentes ambientais (GOUVEIA, 2005; FREITAS, 2021), sendo assim, o controle de nível é crucial para a prevenção de acidentes nestes tipos de construções verticais.

- **Manutenção de condições do processo:** Em alguns processos produtivos, é necessário manter a matéria-prima ou derivados sob determinada condição, como é visto no processo da produção de argila vermelha, apresentado por Braga, Santos e Sales (2016), onde é necessário manter a argila umedecida no nível certo interfere diretamente na plasticidade, variável muito importante para a determinação da qualidade desta matéria. A incorporação de um sistema de controle de nível, associada as demais estratégias apontadas por Braga, Santos e Sales, podem dar robustez ao processo e garantir uma qualidade maior da matéria, sendo apenas necessário, a calibração do sistema em relação aos parâmetros necessários ao umedecimento da argila. Já em uma ótica de prevenção de acidentes ambientais, podemos salientar a importância do controle de nível para sistemas de resfriamento e lubrificação, que visam manter as condições do processo em um patamar seguro, garantindo o bom funcionamento do equipamento (OSCAR, 2016), sendo esse controle de nível muito básico, visando apenas garantir a disponibilidade de fluido para o sistema e a erradicação da possibilidade de trabalho a seco ou em temperaturas que ofereçam risco ao sistema (DEMUNER, 2015). Já o controle de nível voltado para o abastecimento e alimentação de sistemas, traz ainda maior impacto na prevenção de acidentes, uma vez que falhas neste processo podem ocasionar derramamentos, vazamentos e outros tipos de acidentes, que, caso envolvam grandes quantidades de fluído, ou materiais nocivos, podem vir a causar danos extremos à vida humana e ao meio ambiente afetado pela contaminação (GOUVEIA, 2005; FREITAS, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos dias atuais, muitos processos de controle moderno já foram desenvolvidos e podem ser encontrados em inúmeros processos dentro e fora da indústria, porém, mais de 97% dos sistemas de controle adotados em processos industriais ainda são do tipo PI e em uma menor quantidade PID (GARCIA, 2019). Olhando sob essa ótica, é importante reforçar a necessidade de uma boa sintonização dos controladores, uma vez que os menos exercem uma alta influência sobre a qualidade do processo e produtos obtidos por meio deste. A sintonia do controlador PI obtida por meio do método do Ganho Limite, mostrou-se satisfatória para a planta analisada, demonstrando eficiência em maior nível, embora, os outros de sintonia também tenham apresentado um controle aceitável. Entendeu-se através da análise realizada, que não é aconselhável utilizar controle PID para processos com oscilações excessivas, uma vez, que a ação derivativa torna o sistema instável. Foi elucidado a

importância da adoção do controle de nível nos mais variados tipos de processos, uma vez que, além de oferecer ganhos em qualidade, produtividade e redução de custo, o controle de nível ainda atua como fator determinante na prevenção de acidentes ambientais causados por falhas na operação e equipamentos. De modo geral, este trabalho atingiu o seu objetivo, pois foi identificado o ajuste mais eficiente para o processo e proposto sua aplicabilidade em processos reais visando a máxima eficiência desses processos e a prevenção de acidentes ambientais.

5. REFERÊNCIAS

ARDUINO. What is Arduino? **ARDUINO**, 2019. Disponível em: Acesso em: 15 de junho de 2021.

ARRUDA, W. F. et al. **Projeto de uma planta didática de controle de nível com interface Arduino-LabVIEW nos cursos de engenharia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza.

BATISTA, R. G.; MENEGHETTI, C. R. Sistema comparativo de controle inteligente de nível aplicado às lógicas Fuzzy e PID. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 21, n. 38, p. 53-63, jun. 2018.

BRAGA, E. R. Sintonia do controlador pelo método de Ziegler e Nichols, para especificação de topo de uma coluna de destilação. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v. 02, n. 03, 2016.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na indústria de cerâmica vermelha: Medidas e alternativas para o controle dimensional. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 5-6, p. 40-43, 2016.

BEGA, E. A. (org). **Instrumentação Industrial**. 3ª Ed. [S.L.]: Interciência, 2011.

BERNER, J. et al. **An experimental comparison of PID autotuners**. **Control Engineering Practice**, v. 73, p. 124-133, 2018.

CRUZ, et al. Controle de Nível em Malha Fechada. In: BRAZILIAN TECHNOLOGY SYMPOSIUM, 1., 2016, São Paulo.

DEMUNER, L. R. et al. Aplicação de filtro partículas para estimação de comportamento de válvulas em condição de falha. **REQ²**, v. 01, n. 01, p. 73-83, 2015.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª Ed. São Paulo: Bookman, 2013.

FREITAS, K. P. M. Gerenciamento de Riscos Ambientais na Indústria de Petróleo. **Revista Valore**, v. 06, p. 6013-6024, 2021.

GARCIA, C. **Controle de Processos Industriais: Estratégias convencionais – Volume 1**. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018.

GARCIA, C. **Controle de Processos Industriais: Estratégias Modernas – Volume 1.** 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 2019.

GEORGINI, J. M. **Automação Aplicada: Descrição e implementação de sistemas Sequenciais com PLCs.** 9ª Ed. São Paulo: Saraiva, 2018.

GOUVEIA, J. L. N. **Relatório de atendimento a acidentes ambientais em postos e sistemas retalhistas de combustíveis 1984 a 2004.** 1ª Ed. São Paulo: CETESB, 2005.

LAMB, F. **Automação Industrial na Prática: Controle e Processos Industriais.** 1ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

LIMA, A. B.; BARROS, P. Z.; ACIOLI JÚNIOR, G. Plataforma robótica didática para ensino de identificação e sintonia de controladores PI. **Revista Automática**, v. 01, n. 01, 2020.

LIMA FILHO, H. J. B. et al. **Processo Didático Para Ensino De Estratégias De Controle De Nível Com Interface De Comunicação Via Computador.** Depositante: Hilário Jorge Bezerra de Lima Filho. BR 202017018889-8 U2. Depósito: 02 de setembro de 2017. Concessão: 26 de março de 2018.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

OSCAR, R. **Instrumentação Industrial: Controle Total de Processos.** 1ª Ed. São Paulo: Viena, 2016.

OSCAR, R. **Instrumentação Industrial: Controle Total de Processos.** 1ª Ed. São Paulo: Viena, 2016.

PIRES, V. P. Sintonia de um controlador pid em um sistema de controle de vazão. **Revista da Graduação**, v. 7, n. 2, 8 dez. 2014.

POISSON EDITION (org). **Educação no século XXI: Engenharia.** 1ª Ed. Belo Horizonte: Poisson, 2019.

RIBEIRO, A. M.; SANTOS, R. B. Sintonia de um controlador PID em um sistema de controle de nível de tanques em série utilizando um software gratuito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 12., 2017, São Carlos.

SILVA, E. B. et al (org.). **Automação & Sociedade: Quarta Revolução Industrial, um olhar para o Brasil.** Rio de Janeiro: Brasport, 2020.

SILVA, et al. **Controle de Nível de Tanque baseado na Mescla entre Scilab e Arduino Baseado no Controle PI.** In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS, 3., 2018, Paraná.

THOMAZINI, D. ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações.** 9ª Ed. São Paulo: Érica, 2020.

VERLY, A. et al. Identificação de modelos para uma planta de nível didática SMAR PD3-F. **Revista Automática**, v. 01, n. 01, 2020.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

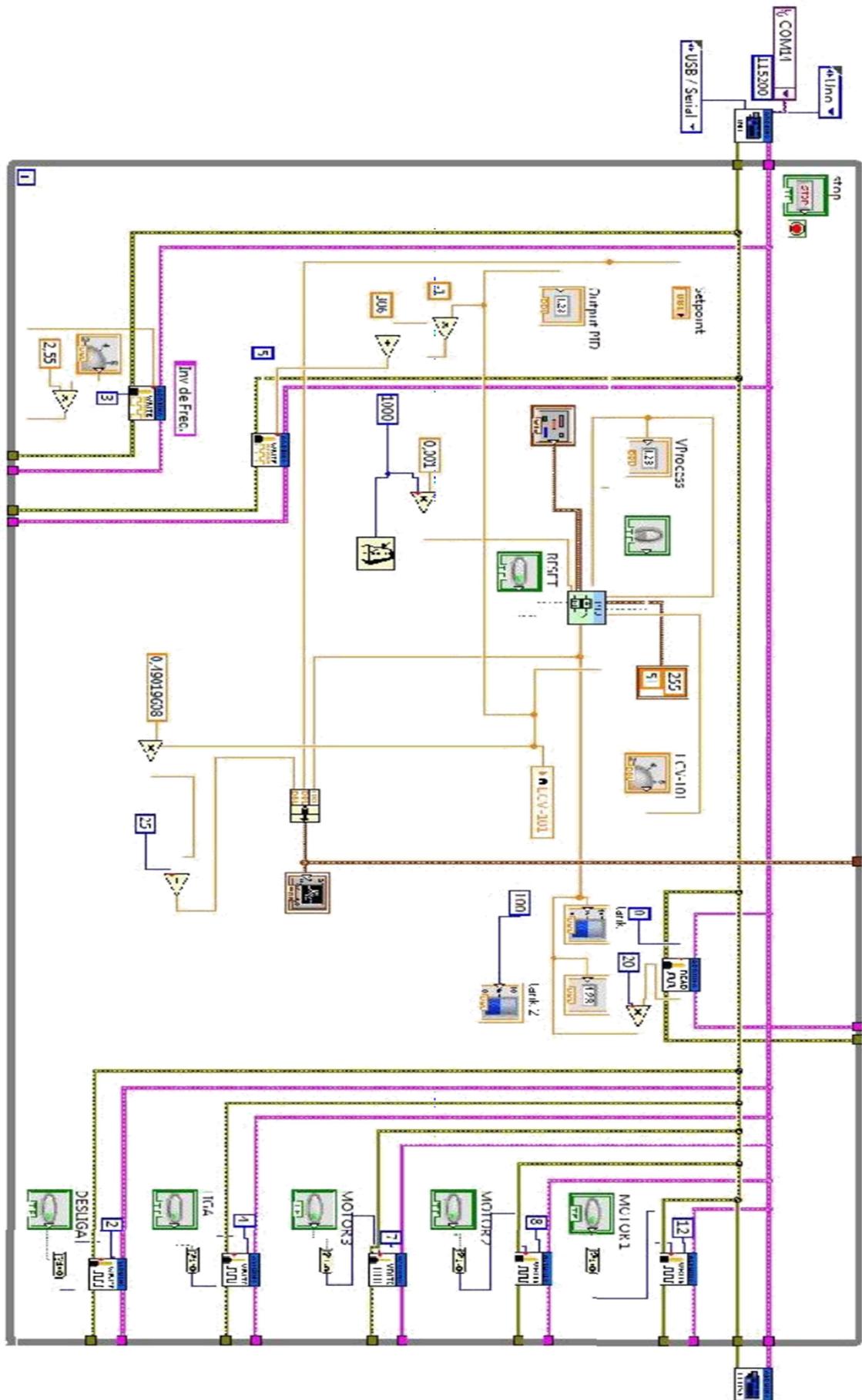
Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem as seguintes conclusões:

- Os métodos de sintonia utilizados na pesquisa mostraram-se satisfatórios na obtenção de parâmetros de ajuste que aumentassem a eficiência do processo, sendo assim, qualquer um deles, podendo ser replicados para processos reais da indústria. Garantir o melhor uso do equipamento através da sua utilização em máxima eficiência é uma das formas de ter o retorno mais positivo dos processos, sendo assim, aplicar métodos de sintonia de controladores demonstrou ser uma maneira prática e relativamente fácil para obter os parâmetros de ajuste que melhor desempenhassem o papel de aumentar a eficiência do sistema de controle.
- A determinação da Função de Transferência do sistema foi dada através da linearização do sistema, o que pode acarretar numa visão não total do processo de controle, sabendo disso, é interessante que em uma oportunidade futura, o sistema seja analisado em sua forma dinâmica e tenha sua Função de Transferência determinada levando em consideração o seu comportamento real.
- Como a Função de Transferência do Sistema apresentou um tempo de retardo, o Diagrama de Blocos elaborado no software Scilab necessitou da adição de um bloco que representasse este tempo, acarretando na utilização do bloco *Continuous fix delay*.
- Com a simulação foi possível prever o comportamento do sistema sob a ação de sintonização para os diferentes métodos de sintonia aplicado durante a pesquisa, o comportamento simulatório apontou para uma proximidade de resultado entre os métodos que se mostraram satisfatórios, comportamentos confirmados outrora de maneira experimental.
- O método de sintonia do Ganho Limite, demonstrou certa vantagem sobre os métodos da Curva de Reação. Por ser um método que obtém os parâmetros de ajuste com o sistema em malha fechada, leva em consideração as particularidades do sistema durante sua execução.

- De uma forma geral, a estratégia de controle PI demonstrada neste trabalho, sintonizada pelo método do ganho limite, apresentou uma boa eficiência, uma vez que conseguiu manter o nível de controle no seu set point inicial e suportou uma mudança de set point em oscilações aceitáveis, porém, é interessante buscar entender a causa para o não alcance do equilíbrio no momento da perturbação causada na mudança de set point, para que assim se possa solucionar o problema e obter um processo que consiga manter a eficiência para diferentes perturbações. O controle PI garante um bom desempenho para sistemas com altos ruídos e oscilações. Uma vez que grande parte dos sistemas de controle reais estão inseridos em ambientes e processos que os propiciam esta realidade de altas oscilações e ruídos, o controle PI adotado na experimentação desta pesquisa comprovou a veracidade da sua eficiência e demonstrou ser o mais apropriado para o tipo de aplicação. É de suma importância buscar meios para garantir a melhor eficiência de sistemas de controle convencionais, uma vez que este tipo de controle ainda é o mais utilizado na indústria, fazendo-se relevante o objeto central da pesquisa desenvolvida neste trabalho. Valendo salientar que para que a ação derivativa possa ser implementada no sistema ela deve receber um ajuste fino que tenderá a 0, ainda assim, a sua utilização demonstrou um aumento do estresse nas válvulas de controle, estresse esse que tem por efeito comum, aumentar o desgaste do equipamento e diminuir o seu tempo de vida, podendo inclusive, reverberar na disponibilidade do equipamento.
- No que tange ao objetivo de analisar a estratégia proposta de controle de nível sob a ótica da prevenção de acidentes ambientais, foi possível constatar, com o apoio das literaturas utilizadas, que o controle de nível é de suma importância neste âmbito, uma vez que é empregado em processos comuns das indústrias que possuem alto risco de serem causadores de acidentes ambientais, dessa forma, sendo o controle de nível crucial para o condicionamento dos sistemas e manutenção do funcionamento ótimo dos mesmos.

Para pesquisas futuras, sugere-se a aplicação do controle de nível em um sistema modelado de forma dinâmica e combinado com outras variáveis de processos, como: temperatura, oxigênio dissolvido, pH e etc., aplicado à processos biotecnológicos.

ANEXOS





República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 202017018889-8 U2



(22) Data do Depósito: 02/09/2017

(43) Data da Publicação Nacional: 26/03/2019

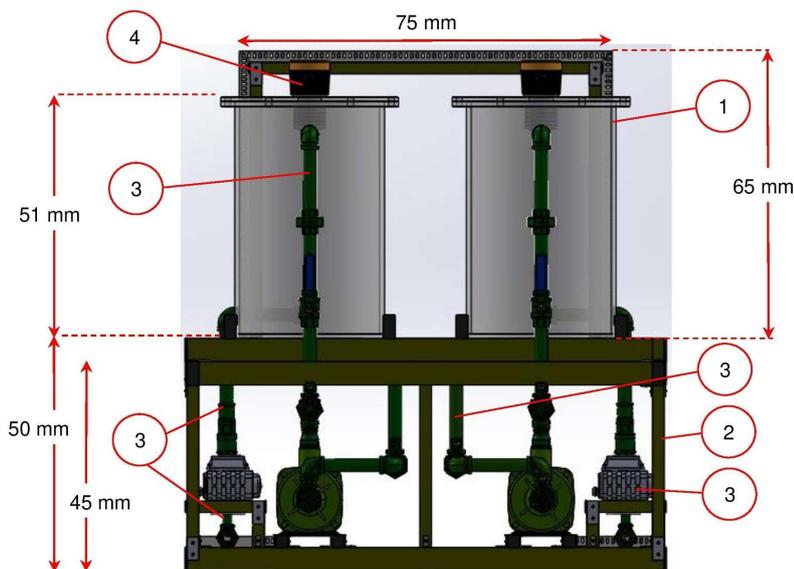
(54) **Título:** PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR

(51) **Int. Cl.:** G09B 5/00; G09B 9/00.

(71) **Depositante(es):** HILÁRIO JORGE BEZERRA DE LIMA FILHO.

(72) **Inventor(es):** HILÁRIO JORGE BEZERRA DE LIMA FILHO; JAILSON ROLIM TEODOSIO; VICTOR PORTO CARREIRO LIRA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE; JOÃO LUCAS LINS BOMFIM; RENAN BISPO DOS SANTOS.

(57) **Resumo:** Este modelo de utilidade refere-se a um equipamento didático projetado para possibilitar a implementação de diferentes estratégias para o controle de nível de reservatórios por meio de instrumentos de processos e estratégias de controle, tais como: controle manual, determinação de características de sistema em malha aberta e fechada com controle proporcional integral e derivativo (PID), estudo de estabilidade em diferentes condições, regulação de controlador On-Off, estudo de resposta submetendo o sistema a distúrbios periódicos ou não periódicos de diversos tipos. A unidade proporciona aos alunos e professores, aplicações e ferramentas mais próximas da realidade da indústria.



RELATÓRIO DESCRITIVO:
“PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”

- [01] Atualmente as tecnologias disponíveis apresentam limitações, pois são projetadas para controlar apenas uma variável, utilizando o mesmo sensor, com todas conexões prontas (fiação), que dificultam a elaboração de novas práticas e rotas operacionais. Em geral, os reservatórios não permitem a visualização da dinâmica do fluido, tendo em vista que são construídos em materiais metálicos, com alto custo de aquisição.
- [02] Com o intuito de solucionar e melhorar os pontos apresentados no item anterior, desenvolveu-se a presente invenção visando melhorar o aprendizado, reduzir o custo de fabricação e aumentar o número de práticas contextualizadas com as situações reais em processos industriais.
- [03] O equipamento foi projetado sob uma estrutura metálica de alumínio com custo inferior as tradicionais estruturas oferecidas no mercado. Os reservatórios foram fabricados em material transparente (acrílico), de baixo custo, permitindo a observação da dinâmica do processo, bem como a formação de vórtices e em determinados regimes de escoamento.
- [04] Os dois tanques permitem realizar o mesmo experimento de modo independente, em diferentes condições operacionais. Também é possível combinar os dois tanques para representar processos com associação de tanques ou paralelo.
- [05] O presente modelo de utilidade trata-se de um equipamento concebido para demonstrar de forma didática a operação de controle de nível por meio de diversos instrumentos de processos e estratégias de controle, proporcionando aos alunos e professores, aplicações e ferramentas mais próximas da realidade da indústria.

- [06] O equipamento pode ser aplicado em salas de aula de cursos técnicos e profissionalizantes, em Universidades, assim como na capacitação de mão-de-obra especializada para a indústria, envolvendo os conceitos de instrumentação, informática industrial, engenharia de controle e automação e engenharia da computação e redes industriais.
- [07] Visando o aumento do número de estratégias de controle, toda instalação elétrica do equipamento é feita por meio de pinos-banana, permitindo modificar com facilidade a rota operacional, ou o tipo de microcontrolador ou controlador lógico programável (clp) que será conectado ao arranjo experimental.
- [08] Diferentes sensores ou sistemas de transmissão de nível podem ser utilizados nesse equipamento, tais como: medição por empuxo, medição por capacitância, medição por ultra-som, medição por radar, medição por laser, medição descontínua (tipo bóia ou por condutividade), medição por pressão hidrostática, medição por pressão diferencial e medição com borbulhador.
- [09] A invenção poderá ser melhor compreendida através da seguinte descrição detalhada, em consonância com as figuras em anexo, onde:
- [10] A **Figura 1** representa uma vista frontal do equipamento e suas respectivas cotas (em milímetros).
- [11] A **Figura 2** representa uma vista direita (lateral) do equipamento.
- [12] A **Figura 3** representa uma vista superior do equipamento e suas respectivas cotas (em milímetros).
- [13] A **Figura 4** representa uma vista isométrica do equipamento.
- [14] Com referências a estas figuras, pode-se observar na **Figura 1**, o reservatório **(1)** construído em material transparente (acrílico), montado em uma estrutura metálica de alumínio **(2)**. Tubulações de PVC **(3)** com diâmetro nominal de 3/4 de polegadas foram instaladas nas regiões de entrada e saída de fluido

do reservatório **(1)**. Na região superior dos reservatórios foram instalados sensores de nível **(4)**, podendo ser substituído por outro tipo de sensor, de acordo com a prática.

[15] A Figura 2 ilustra as válvulas de abertura manual **(5)** (tipo esféricas), utilizadas para controlar o fluxo, bem como para alterar a configuração do sistema. Observa-se também o posicionamento de bombas centrífugas **(6)** trifásicas, com potência de 0,33 cv. A bomba tem a função de retirar o fluido de um recipiente externo, e recalcar o mesmo para dentro do reservatório **(1)**, onde serão estabelecidos rotas de controle de nível. Foram instaladas válvulas automáticas **(7)** com atuador de acionamento elétrico. Esta válvula **(7)** é do tipo esférica, e funciona como elemento final de controle, sendo acionada por meio de microcontrolador ou clp.

REIVINDICAÇÕES

1ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** constituir-se de uma planta de controle de nível de reservatórios industriais, concebida em bancada dupla, que permite a implementação de práticas e treinamentos em ambiente mais próximo do ambiente industrial, com diferentes estratégias de controle de nível, e configurações compatíveis com os microcontroladores de código aberto e controladores lógicos programáveis comerciais (clps), proporcionando experimentações diversas que podem ser implementadas com facilidade em plantas industriais.

2ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** obedecer à reivindicação 1 e por possuir os mesmos instrumentos (bombas centrífugas trifásicas, válvulas esféricas com acionamento elétrico, válvulas esféricas manuais, inversor de frequência, sensor de nível tipo bóia e reservatórios) encontrados em processos industriais de larga escala, utilizando fontes de alimentação entre 5 e 12 volts (corrente contínua) sinais e módulos de comunicação nos padrões de 0 a 5 volts (corrente contínua), 0 a 20 mA, 4 a 20 mA e 0 a 10 volts.

3ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** obedecer às reivindicações 1 e 2, e possuir tubulações e conexões em PVC, estrutura metálica de sustentação em alumínio e tanques (reservatórios de água) concebidos em material transparente (acrílico) de baixo custo.

4ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** obedecer às reivindicações 1 a 3, e estabelecer rotas de controle de nível baseadas em diferentes variáveis manipuladas: velocidade de rotação do rotor da bomba, e percentual de abertura da válvula esférica com acionamento elétrico.

5ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** proporcionando as seguintes aplicações: estudo do processo e dos componentes industriais utilizados; controle manual de processos, determinação das características de um sistema com malha aberta; determinação das características de um sistema com malha fechada com controle PID e o efeito das três ações de controle (proporcional, integral, derivativa); estudo da estabilidade do sistema em diversas condições e calibração em diferentes ações de controle; determinação das características do sistema de malha aberta com regulagem ON-OFF e os efeitos dos parâmetros de regulagem; estudo da resposta do sistema a distúrbios periódicos ou não periódicos de diversos tipos.

6ª) “PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”. **Caracterizada por** obedecer às reivindicações 1 a 4, e estabelecer comunicação em tempo real, disponibilizando banco de dados das medidas experimentais.

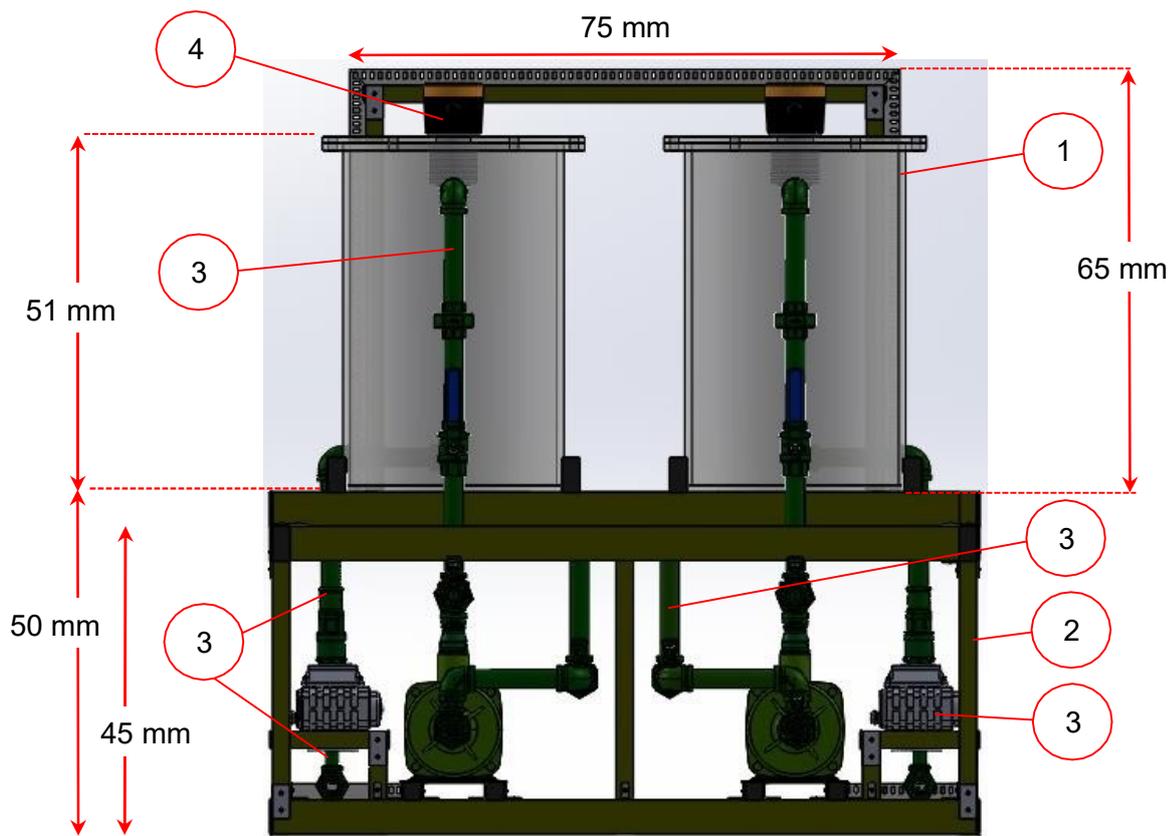


Figura 1 – Vista frontal do equipamento

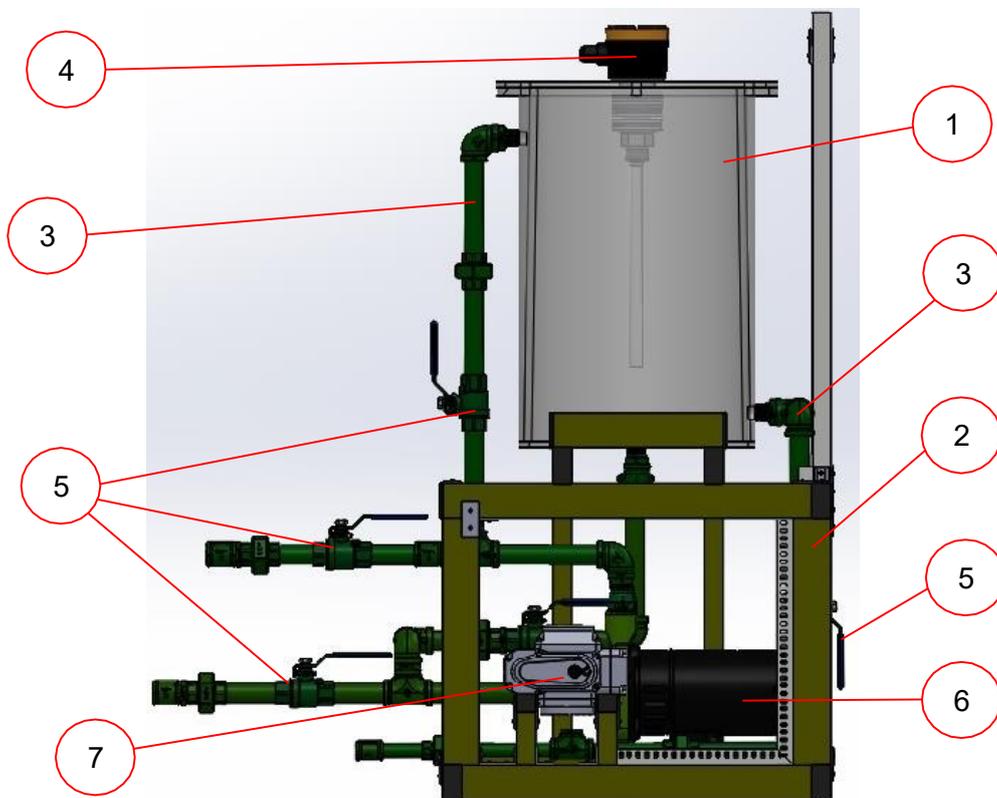


Figura 2 – Vista direita do equipamento

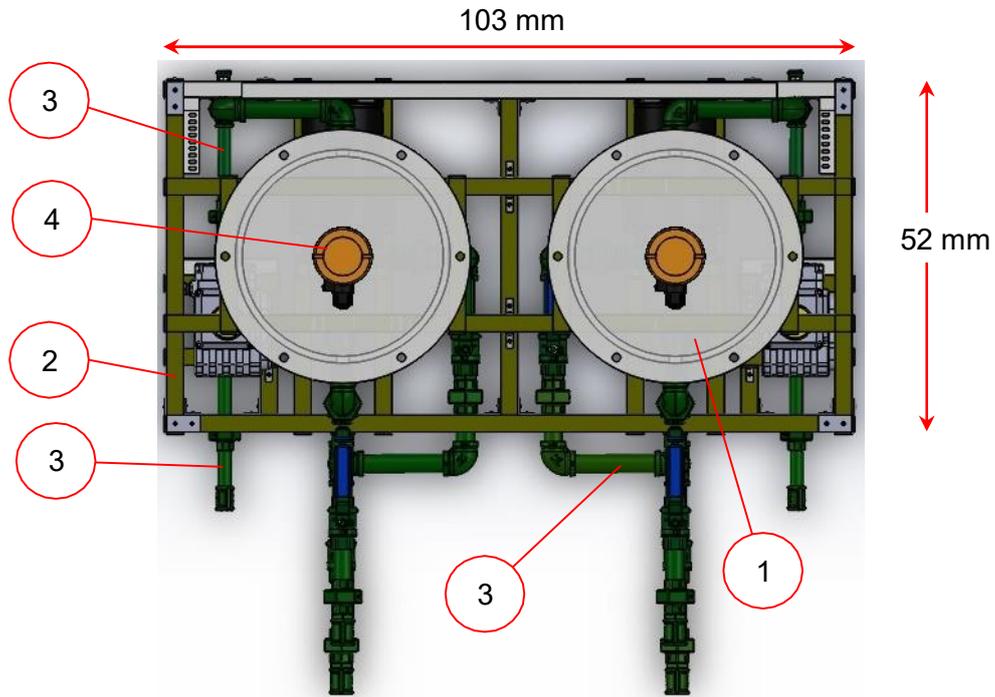


Figura 3 – Vista superior do equipamento

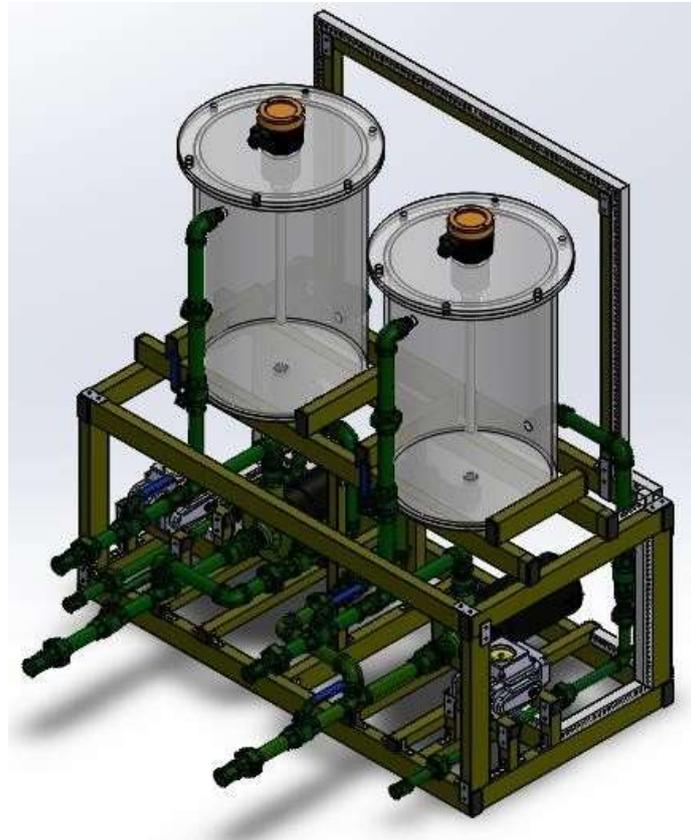


Figura 4 – Vista isométrica do equipamento

Modelo de Utilidade: **“PROCESSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL COM INTERFACE DE COMUNICAÇÃO VIA COMPUTADOR”**

RESUMO

Este modelo de utilidade refere-se a um equipamento didático projetado para possibilitar a implementação de diferentes estratégias para o controle de nível de reservatórios por meio de instrumentos de processos e estratégias de controle, tais como: controle manual, determinação de características de sistema em malha aberta e fechada com controle proporcional integral e derivativo (PID), estudo de estabilidade em diferentes condições, regulagem de controlador On-Off, estudo de resposta submetendo o sistema a distúrbios periódicos ou não periódicos de diversos tipos. A unidade proporciona aos alunos e professores, aplicações e ferramentas mais próximas da realidade da indústria.