



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



BRUNA SILVA DE FREITAS

**CONTROLE DE NÍVEL DE DOIS TANQUES
ACOPLADOS COM IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE
PROPORCIONAL E INTEGRAL EM
CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2019

BRUNA SILVA DE FREITAS

**CONTROLE DE NÍVEL DE DOIS TANQUES
ACOPLADOS COM IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE
PROPORCIONAL E INTEGRAL EM
CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

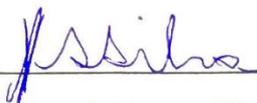
Orientadora: Prof. Regiane de Sousa e Silva Ramalho, M.Eng.

Co-orientador: Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro, Ph.D.

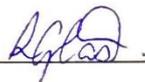
Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Dezembro/2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Monografia intitulada **Controle de nível de dois tanques acoplados com implementação de controle proporcional e integral em controladores lógicos programáveis** defendida e aprovada em 16 de dezembro de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Profa. Ms. Regiane de Sousa e Silva Ramalho – Orientadora



Profa. Dra. Luciana Gomes Castanheira – Professora Convidada



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço às mulheres da minha vida:

À minha mãe por toda coragem, apoio e amor.

À minha vó por toda paciência, ternura e compreensão.

À minha tia-irmã por todo incentivo, exemplo e consideração.

À toda minha família com a qual sempre pude contar.

Ao professor Paulo Monteiro por toda inspiração.

Aos meus queridos amigos que foram compreensivos com minha ausência.

Ao Diego Alberto, Diego Damasio, Lucas Manuel e Thiago Tavares por toda ajuda.

À Fundação Gorceix pelo crescimento proporcionado e apoio financeiro.

Ao NTI por todo aprendizado e momentos felizes.

À Mind Makers pela oportunidade e confiança.

À UFOP por ter me ajudado a ser uma pessoa melhor.

RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido o controle de nível de dois tanques acoplados com implementação de controle proporcional integral (PI), programado em *Ladder*, utilizando controlador lógico programável (CLP), modelo *Training Box Duo* TB131 da Altus. O nível do tanque inferior (tanque 1) deveria ser mantido numa faixa pré-estabelecida, enquanto o tanque superior (tanque 2) se comportava como distúrbio, não sendo necessário fazer o controle de seu nível. Os parâmetros proporcional integral (PI) do controlador foram obtidos por meio do experimento da Curva de Reação por *Ziegler-Nichols*. Foi desenvolvido um Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA), por meio do *software* ELIPSE E3, para leitura e registro dos níveis dos tanques, havendo alarmes que indicavam dois eventos pré-configurados: nível baixo e nível alto no tanque 1. Além disso, foi configurado um banco de dados em *Access* que permitiu consultar o histórico dos níveis, podendo exibir e, também, exportar para vários formatos um relatório da consulta. Definiu-se um ponto de operação manualmente e, após entrar em regime permanente, foi enviado um degrau com acréscimo de 10% do valor do fundo de escala. Foram feitos ensaios para determinar os pontos de operação em cada tanque, além de cálculos para obtenção do ponto de inflexão, seu instante, valor da derivada e altura no ponto. Com base na curva de reação do sistema, determinou-se L (atraso da resposta), T (constante de tempo) e K_0 (ganho direto do sistema). A partir das três constantes, obtiveram-se os parâmetros PI do controlador para alcançar um amortecimento particular na resposta em malha fechada e também a função de transferência aproximada do sistema. Finalmente, a programação foi desenvolvida em *Ladder* com os parâmetros PI encontrados e a saída do sistema pôde ser observada em tempo real por meio do Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA) desenvolvido.

Palavras-chaves: PID, controle de nível, CLP.

ABSTRACT

In this monograph project, the level control of two coupled tanks with PI (proportional integral) control implementation was developed, programmed by Ladder programming language using Programmable Logic Controller (PLC), model Training Box Duo TB131, belongs to Altus. The lower tank level (tank 1) should be kept within a pre-established range, while the upper tank level (tank 2) behaved as a disturbance and no level control was required. The integral proportional (PI) parameters of the controller were obtained by the Ziegler–Nichols tuning method. A Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) was developed using ELIPSE E3 software to read and record tank levels, with alarms indicating two pre-configured events: low level and high level in tank 1. Moreover, an Access database was configured that allowed to query the history of the levels, being able to display and also export a query report to various formats. An operating point was set manually and, after going into steady state, a step signal was sent to the system entrance with an increase of 10% of the full scale value. Tests were made to determine the operating points in each tank, as well as calculations to obtain the inflection point, its instant, derivative value and height at the point. Based on the system reaction curve, L (response delay), T (time constant) and K_0 (direct system gain) were determined. The PI parameters of the controller were found through the three system constants, achieving particular damping in the closed loop response, as well as obtaining the approximate system transfer function. Finally, the programming was developed by the Ladder programming language with the PI parameters found and the system output could be observed in real time through the developed Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA).

Key-words: PID, level control, PLC.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação por bloco de um processo.	14
Figura 2.2 - Sistema de Controle em Malha Aberta.	15
Figura 2.3 - Sistema de Controle em Malha Fechada.....	15
Figura 2.4 - Controle ON/OFF.	16
Figura 2.5 - Histerese no controle ON/OFF	16
Figura 2.6 - Controle ON/OFF	17
Figura 2.7 - Curva de resposta a um degrau.	20
Figura 2.8 - Esquema básico do CLP.	21
Figura 2.9 - Inicialização e ciclo de varredura.	22
Figura 2.10 - Acionamento de uma lâmpada.....	24
Figura 2.11 - Relacionamento de rede tipo mestre-escravo.	26
Figura 3.1 - Configuração adotada para sistema de dois tanques.....	29
Figura 3.2 - CLP Training Box Duo TB131 da Altus.	29
Figura 3.3 - Tela Inicial do Sistema SCADA.....	31
Figura 3.4 - Tela de Login do Sistema SCADA.....	31
Figura 3.5 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA.....	32
Figura 3.6 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Manual.....	33
Figura 3.7 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Automático ON/OFF.....	34
Figura 3.8 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Automático PID.....	35
Figura 3.9 - Tela de Eventos do Sistema SCADA.	36
Figura 3.10 - Tela de Gráficos do Sistema SCADA.....	37
Figura 3.11 - Tela de Administração do Sistema SCADA.....	37
Figura 3.12 - Tela do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados onde se registra os níveis em tempo real, exibe histórico e exporta relatórios.....	39
Figura 3.13 - Gráfico “Ensaio para determinação do ponto de operação do Tanque 1 e Tanque 2” gerado por um <i>script</i> no software MATLAB.	40
Figura 3.14 - Gráfico “Cálculo do Ponto de Inflexão” gerado por um <i>script</i> no <i>software</i> MATLAB.	40
Figura 3.15 - Gráfico “Determinação de L e T” gerado por um <i>script</i> no <i>software</i> MATLAB.	41
Figura 3.16 - Instante do Ponto de Inflexão e Valor da Derivada no Ponto de Inflexão.	41
Figura 3.17 - Valor da altura no Ponto de Inflexão.....	42
Figura 3.18 - Bloco do Controlador PID no <i>software</i> MasterTool IEC.	43
Figura 4.1 - Resposta do sistema com parâmetros PI obtidos por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols.....	46

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeito de cada parâmetro do Controlador PID em um Sistema de Controle em Malha Fechada.....	18
Tabela 2.2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols pelo método da curva de reação.	21
Tabela 2.3 - Três dos principais símbolos da programação <i>Ladder</i>	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
CP	Controlador Programável
CPA	Controlador Programável para Automação
E/S	Entrada/Saída
I/O	<i>Input/Output</i>
IEC	<i>International ElectroTechnical Commission</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
K_0	Ganho Direto do Sistema
K_d	Termo Derivativo do Controlador PID
K_i	Termo Integral do Controlador PID
K_p	Ganho Proporcional do Controlador PID
L	Atraso da Resposta do Sistema
LD	<i>Ladder</i>
MLP	Modulação por Largura de Pulso
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
T	Constante de Tempo do Sistema
TF	Tomada de Força

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Estado da arte.....	10
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	11
1.2.1	Objetivos gerais	11
1.2.2	Objetivos específicos	11
1.3	Justificativa do trabalho.....	12
1.4	Estrutura do trabalho	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Teoria de Controle	14
2.1.1	Sistemas de Controle.....	14
2.1.1.1	Sistema de Controle em Malha Aberta.....	14
2.1.1.2	Sistema de Controle em Malha Fechada	15
2.1.2	Controlador ON/OFF	15
2.1.3	Controlador PID.....	17
2.1.3.1	Ação Proporcional.....	18
2.1.3.2	Ação Proporcional Integral	18
2.1.3.3	Ação Proporcional Derivativa	19
2.1.4	Métodos de Sintonia para Controladores PID.....	20
2.1.4.1	Método de Ziegler-Nichols	20
2.2	Controlador Lógico Programável (CLP)	21
2.2.1	Linguagem de Programação <i>Ladder</i>	23
2.3	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA).....	24
2.3.1	<i>Tags</i>	24
2.3.2	Telas sinóticas.....	25
2.3.3	Alarmes e Eventos	25
2.3.4	Histórico	25
2.3.5	Relatório.....	25
2.4	Protocolos de Comunicação de Dados	26
2.4.1	Modbus	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Descrição da Planta	28
3.2	Controlador Lógico Programável (CLP)	29
3.3	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA).....	30
3.3.1	Tela Inicial.....	30
3.3.2	Tela de Visão Geral.....	32
3.3.2.1	Controle Manual	33
3.3.2.2	Controle Automático – ON/OFF.....	33
3.3.2.3	Controle Automático – PID	34
3.3.3	Tela de Eventos	35
3.3.4	Tela de Gráficos	36
3.3.5	Tela de Administração.....	37
3.4	Comunicação entre Elipse E3 e CLP.....	38

3.5	Método da Curva de Reação por Ziegler-Nichols	38
3.6	Bloco PID programado em <i>Ladder</i>	42
4	RESULTADOS	44
4.1	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA).....	44
4.2	Controlador PI programado em <i>Ladder</i>	44
4.3	Parâmetros do Controlador	44
4.4	Função de Transferência Aproximada.....	45
4.5	Comportamento do Sistema.....	45
4.5.1	Parâmetros obtidos por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols	45
5	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A humanidade, inicialmente, desconhecia os meios para se obter energia a partir da matéria e seu fornecimento se dava pelo próprio trabalho humano ou de animais. No século XVIII, o surgimento das máquinas a vapor fez com que a energia da matéria pudesse ser transformada em trabalho. Com o aumento da demanda da nova fonte de energia, percebeu-se a necessidade de desenvolvimento de técnicas e equipamentos que substituíssem o homem no esforço braçal e intelectual, surgindo, a partir dessa necessidade, o controle automático.

Desde então, o controle automático desempenha um papel fundamental no avanço da ciência e engenharia (OGATA, 2003), se tornando de grande importância e parte integrante dos modernos processos industriais e de produção. Diante das necessidades de redução de despesas e do trabalho árduo de várias rotinas de operações, melhoria contínua e aumento da produtividade e desempenho dos processos, o controle automático surge, portanto, suprimindo tais necessidades, mantendo o funcionamento do processo dentro do ponto de operação desejado mesmo com presença de distúrbios.

O controlador proporcional integral derivativo (PID) é o algoritmo de controle mais comumente utilizado na indústria atualmente. Sua popularidade pode ser atribuída parcialmente ao seu desempenho robusto sobre uma grande faixa de condições operacionais e em parte à sua simplicidade funcional (DORF, 2001).

1.1 Estado da arte

O ensino de engenharia associado à prática tem se tornado uma metodologia indispensável na motivação dos estudantes de graduação. O emprego das bancadas didáticas permite ao aluno desenvolver umas das características mais importantes do profissional de engenharia: projetar, acompanhar e executar um projeto (COCOTA JR. *et al*, 2014).

Frequentemente, em processos industriais, tanques acoplados são utilizados para várias finalidades que costumam possuir processamento de líquidos por química ou tratamento de misturas. Tal processamento requer um controle criterioso sobre o nível do fluido, assim como

regular o fluxo entre os tanques. Para alcançar a máxima eficiência na produção, usualmente são empregadas malhas e algoritmos de controle para garantir que o sistema opere explorando seus limites dentro de um padrão de utilização aceitável. O estudo e modelagem da planta de tanques acoplados e o controlador PID são de extrema importância, pois abrangem o funcionamento prático didático e proporcionam entendimento do cenário atual de muitas empresas (ALPI, 2016).

O uso do CLP tem se difundido e diversificado e atualmente é possível perceber seus usos em diversas empresas, nos mais diversos ramos de atuação. Uma aplicação interessante e bastante difundida é o controle de nível, que consiste em não permitir que sistemas tenham transbordos ou falta de material, fatos esses, que poderiam comprometer o sistema de forma geral, danificando tubulações ou sensores e outros equipamentos (PRADO, 2013).

O controle proporcional integral derivativo (PID) é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output - SISO*). Todo Controlador Lógico Programável (CLP), por mais simples que seja, possui o algoritmo PID pronto para ser usado. Existe até aqueles que possuem ferramentas de auto ajuste do PID, reduzindo-se ainda mais a necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo (GUERRA, 2009).

1.2 Objetivos gerais e específicos

1.2.1 Objetivos gerais

Neste trabalho, teve-se como objetivos estudar, implementar e explorar, em nível de simulação e em uma planta piloto, a implementação de controle de nível de dois tanques acoplados com controle proporcional integral (PI) utilizando controlador lógico programável (CLP).

1.2.2 Objetivos específicos

Neste trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- a) Realizar um estudo teórico aprofundado sobre controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID);
- b) Desenvolver um Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA);
- c) Obter os parâmetros PI por meio do Método da Curva de Reação por Ziegler-Nichols;
- d) Implementar controlador PI em um Controlador Lógico Programável (CLP), programado em *Ladder*, com os parâmetros obtidos no método da curva de reação por Ziegler-Nichols;
- e) Obter a função de transferência aproximada do sistema;
- f) Obter a curva de resposta do sistema com parâmetros PI encontrados por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols.

1.3 Justificativa do trabalho

Mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente empregam esquemas de controle PID ou PID modificado (OGATA, 2003). Portanto, por ser um dos algoritmos de controle mais utilizados e estudados, pretende-se constatar a eficácia do controlador PID aplicado ao controle de nível da planta piloto constituída por dois tanques acoplados.

Existem variações do controlador PID, podendo ser implementado e utilizado das seguintes formas: controlador proporcional (P), controlador proporcional integral (PI) e controlador proporcional derivativo (PD). No controle proporcional (P), o valor da variável manipulada é proporcional ao valor do desvio (diferença entre o *setpoint* e variável de processo). Ao incluir o controle integral ao controle proporcional, torna-se controlador proporcional integral (PI): a ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional. Ao incluir o controle derivativo ao controle proporcional, torna-se controlador proporcional derivativo (PD): a ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações da variável de processo, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

Sabendo que deve ser feito o controle de nível de dois tanques acoplados e a variável de processo não sofre grandes variações, o parâmetro derivativo não é necessário. Portanto, após análise, foi constatado que seria mais adequado o uso do controlador proporcional integral (PI).

Obter-se-á, dessa forma, uma melhor estabilidade do sistema, com baixo tempo de resposta e sinal de erro o mais minimizado possível.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2, é apresentada uma revisão de literatura, onde são explicados conceitos sobre Teoria de Controle, Controlador Lógico Programável (CLP), Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) e protocolos de comunicação de dados.

No capítulo 3, é apresentado o desenvolvimento do trabalho. Nele há a descrição da planta, informações sobre o Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado e o Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) desenvolvido. Também há uma descrição de algumas das configurações feitas para estabelecer a comunicação entre o Controlador Lógico Programável (CLP) e o *software* no qual foi desenvolvido o Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA). Além disso, o método da curva de reação por Ziegler-Nichols é apresentado, de onde são geradas as constantes do sistema. Por último, o bloco PID desenvolvido em *Ladder* é exibido.

No capítulo 4, os resultados são apresentados. Com base nas constantes do sistema encontradas no capítulo 3, os parâmetros do controlador são calculados. A função de transferência aproximada do sistema é indicada. O bloco PID desenvolvido no capítulo 3 é, então, programado com os parâmetros do controlador encontrados e a saída do sistema é observada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Teoria de Controle

2.1.1 Sistemas de Controle

Um sistema é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e produzem uma resposta desejada. O componente ou processo a ser controlado pode ser representado por um bloco, como mostrado na Figura 2.1.

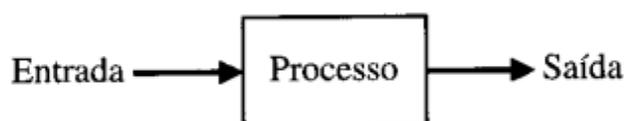


Figura 2.1 – Representação por bloco de um processo.

Fonte: DORF, 2001.

O ponto de ajuste do sistema de controle pode ser variado de acordo com o tempo pré-estabelecido desejado. O controlador, então, tem a função de manter a variável próxima ao ponto de ajuste desejado (OGATA, 2003).

A relação de entrada-saída representa uma relação de causa e efeito do processo, que, por sua vez, representa um processamento de um sinal de entrada para fornecer um sinal de saída variável, quase sempre com uma amplificação de potência (DORF, 2001).

2.1.1.1 Sistema de Controle em Malha Aberta

Em sistemas de controle em malha aberta, a saída não tem efeito na ação de controle, ou seja, não há uma comparação da saída com a entrada. Utilizam um dispositivo de atuação para controlar diretamente o processo sem usar realimentação, como mostrado na Figura 2.2.

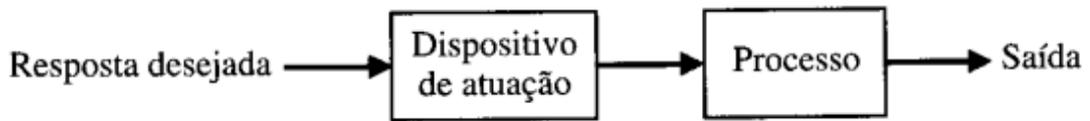


Figura 2.2 - Sistema de Controle em Malha Aberta.

Fonte: DORF, 2001.

2.1.1.2 Sistema de Controle em Malha Fechada

Sistemas de controle em malha fechada são sistemas nos quais o sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle. Há uso de ação de realimentação, onde é feita uma comparação entre a saída real e a resposta desejada, resultando em uma diferença que é usada como meio de controle. Dessa forma, reduz-se o erro e mantém a saída do sistema em um valor desejado. Um sistema de controle com realimentação em malha fechada simples é mostrado na Figura 2.3.

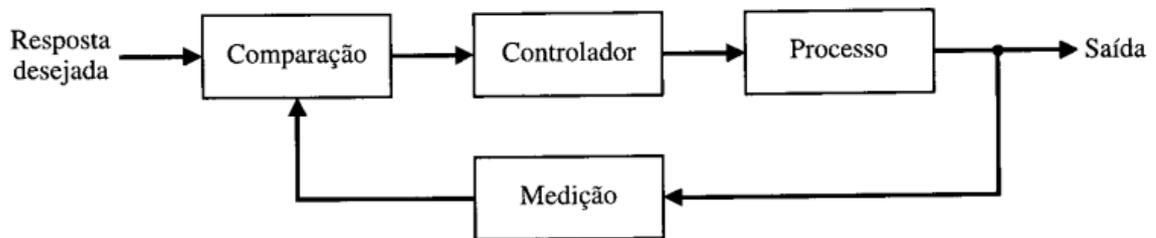


Figura 2.3 - Sistema de Controle em Malha Fechada.

Fonte: DORF, 2001.

2.1.2 Controlador ON/OFF

A ação de controle ON/OFF pode ser considerada a ação de controle mais simples e mais econômica (GOMES, 2000). Neste tipo de ação, o controlador é modelado por um relé conforme mostra a Figura 2.4.

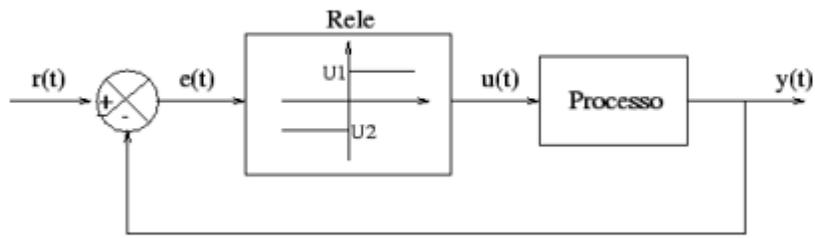


Figura 2.4 - Controle ON/OFF.

Fonte: GOMES, 2000.

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir apenas dois valores, conforme o erro seja positivo ou negativo. Este tipo de controle pode ser descrito pela Equação 2.1.

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Segundo Gomes (2000), este tipo de função pode ser implementada como um comparador ou um relé físico. Neste caso, há uma inconsistência em zero e, na presença de ruídos, chaveamentos espúrios quando o sinal $e(t)$ for próximo de zero. Para evitar este tipo de problema, utiliza-se o controlador ON/OFF com histerese, mostrado na Figura 2.5.

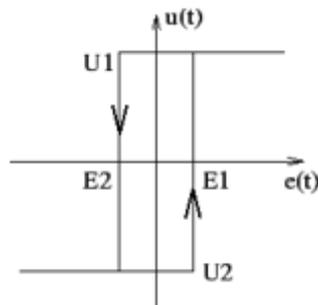


Figura 2.5 - Histerese no controle ON/OFF

Fonte: GOMES, 2000.

A Figura 2.6 mostra a curva de resposta em malha fechada e o respectivo sinal de controle para um sistema com controlador ON/OFF com histerese. Em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Este fato denota a baixa precisão obtida com este tipo de controlador.

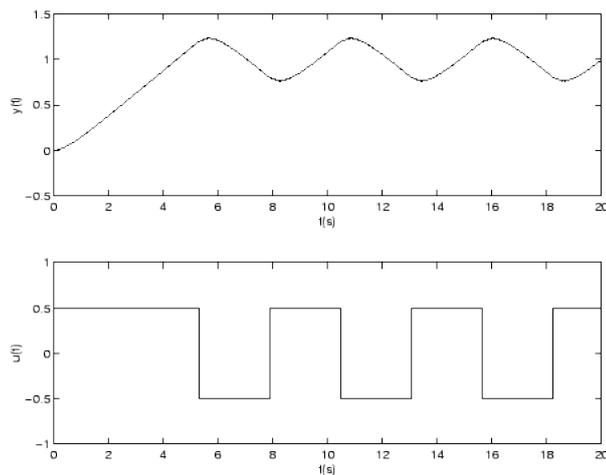


Figura 2.6 - Controle ON/OFF

Fonte: GOMES, 2000.

2.1.3 Controlador PID

O controlador PID tem uma função de transferência no domínio de Laplace conforme a Equação 2.2. A ação de controle deste controlador é gerada a partir da combinação das ações proporcional, integral e derivativa. Este controlador une as características particulares de cada uma destas ações a fim de se obter uma melhora significativa do comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado. Desta forma, têm-se três parâmetros de sintonia no controlador: o ganho proporcional K_p , o termo integral K_i e o termo derivativo K_D .

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \quad (2.2)$$

O controlador oferece um termo proporcional que reduz o tempo de acomodação; o termo de integração elimina o erro em regime permanente; e o termo derivativo aumenta a estabilidade do sistema. A tabela 2.1 resume o efeito de cada parâmetro do controlador PID em um sistema em malha fechada.

Tabela 2.1 - Efeito de cada parâmetro do Controlador PID em um Sistema de Controle em Malha Fechada.

RESPOSTA	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	Erro de estado estacionário (Steady-State Error)
K_p	Reduz	Aumenta	Pouco efeito	Reduz
K_i	Reduz	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Pouco efeito	Reduz	Reduz	Não muda

Fonte: MUNIZ, 2017.

A equação para a saída no domínio do tempo é mostrada na Equação 2.3.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

2.1.3.1 Ação Proporcional

Neste tipo de controlador, a relação entre sua saída e o sinal de erro, $e(t)$, é dada pela Equação 2.4, onde o operador (\rightarrow) significa a transformada de Laplace da função.

$$u(t) = K_p e(t) \xrightarrow{L} U(s) = K_p E(s) \quad (2.4)$$

Um controlador proporcional consiste essencialmente em um amplificador com ganho ajustável. O erro é multiplicado por um ganho K_p . Um ganho muito alto pode causar instabilidade, e um ganho muito baixo pode fazer com que o sistema demore a responder ao erro (IBRAHIM, 2006).

2.1.3.2 Ação Proporcional Integral

A principal função da ação integral é certificar-se de que a saída do processo está de acordo com o ponto de ajuste em estado estacionário. Com o controle proporcional, há normalmente um erro de controle no estado estacionário. Com a ação integral, um pequeno erro positivo vai sempre levar a um sinal de controle cada vez maior, e um erro negativo dará um decaimento no sinal de controle, não importa o quão pequeno é o erro (ÅSTRÖM, 1995).

Para este controlador, a saída é representada pela função do erro e a integral do erro, de acordo com a Equação 2.5.

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \xrightarrow{L} U(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) E(s) \quad (2.5)$$

Em que T_i (tempo integral) é o tempo necessário para a contribuição da ação integral podendo ser expresso em minutos ou segundos. A componente integral, ao adicionar um polo na origem da função de transferência do controlador, elimina o erro em regime permanente, independentemente do sistema que se pretende controlar (LOURENÇO, 1997).

2.1.3.3 Ação Proporcional Derivativa

Neste controlador, o sinal de controle $u(t)$ é proporcional ao erro e à sua taxa de variação, de acordo com a Equação 2.6.

$$u(t) = K_P e(t) + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{L} U(s) = K_P (1 + T_d s) \quad (2.6)$$

Em que T_d (tempo derivativo) é expresso em segundos ou minutos, sendo o período de tempo antecipado pela ação derivativa em relação à ação proporcional.

A adição do modo derivativo ao modo proporcional resulta num controlador altamente sensível, uma vez que aquele primeiro, ao responder a uma taxa de variação do erro, permite correções antes deste ser elevado. O modo derivativo não afeta diretamente o erro estacionário, adiciona amortecimento ao sistema (melhora a estabilidade) e assim permite o uso de valores de K_P mais elevados, o que implica em um menor erro estacionário, tendo o inconveniente de acentuar o ruído de alta frequência (LOURENÇO, 1997).

2.1.4 Métodos de Sintonia para Controladores PID

2.1.4.1 Método de Ziegler-Nichols

Neste método, obtém-se experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário. Se a planta não possui integradores nem polos complexos conjugados dominantes, então esta curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de um S, como mostra a Figura 2.7. Este método só se aplica se a curva de resposta ao degrau de entrada tiver o aspecto de um S.

A curva com o formato em S pode ser caracterizada por duas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . São determinadas ao passar uma tangente pelo ponto de inflexão da curva, como pode ser observado na Figura 2.7. Nos pontos onde a tangente intercepta o eixo das abscissas e a linha horizontal com valor K (que é o ponto onde a curva se estabiliza), obtêm-se T e L , respectivamente.

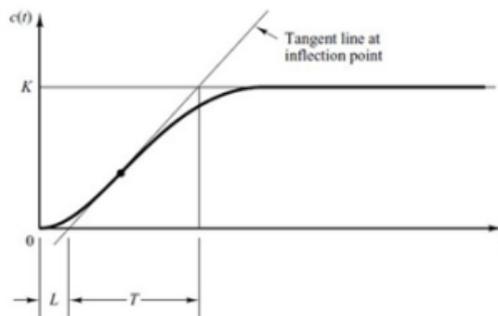


Figura 2.7 - Curva de resposta a um degrau.

Fonte: OGATA, 2003.

Uma vez obtidos os parâmetros L , T e K , recorre-se à Tabela 2.2 para determinação dos valores dos parâmetros do controlador.

Tabela 2.2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols pelo método da curva de reação.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{K_0 L}$		
PI	$\frac{0,9 T}{K_0 L}$	$3L$	
PID	$\frac{1,2 T}{K_0 L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: OGATA, 2003.

2.2 Controlador Lógico Programável (CLP)

O Controlador Lógico Programável (CLP) ou *Programmable Logic Controller* (PLC), é um equipamento projetado para comandar e monitorar máquinas ou processos industriais, onde desempenha funções de controle por meio de *softwares* desenvolvidos pelo usuário.

Um CLP pode ser representado basicamente por três partes, exibidos na Figura 2.8: módulos de entradas, a unidade de processamento (CPU) e módulos de saída.



Figura 2.8 - Esquema básico do CLP.

Fonte: NOGUEIRA, 2003.

Durante o seu funcionamento, realiza-se uma sequência de operações denominada ciclo de varredura, representado na Figura 2.9:



Figura 2.9 - Inicialização e ciclo de varredura.

Fonte: NOGUEIRA, 2003.

No processo de inicialização, realiza-se o reconhecimento dos módulos de entrada e saídas ligadas ao CLP e verifica-se se existe um programa de usuário instalado.

O ciclo de varredura realiza um ciclo repetitivo de verificação do estado das entradas e saídas, armazenando a leitura na memória e comparando-a com o programa do usuário. Após finalizada a comparação, as saídas são atualizadas.

As entradas são interfaces que permitem ao CLP receber informações sobre o processo, podendo ser digitais ou analógicas. internas ou externas. As entradas digitais recebem sinais discretos, possuindo dois valores possíveis: nível alto (1) ou nível baixo (0); as analógicas, sinais contínuos no tempo que podem assumir qualquer valor entre máximo e mínimo valor de trabalho da entrada. As entradas externas são aquelas por onde entrará o sinal enviado por um sensor ao CLP e as internas são aquelas que recebem sinal de outro componente interno ao CLP (como, por exemplo, o contato de um temporizador utilizado no programa de usuário).

As saídas são interfaces por meio das quais o CLP pode alimentar uma carga, podendo ser digitais ou analógicas. internas ou externas. As saídas digitais oferecem dois valores: nível alto (1) ou nível baixo (0); as analógicas, variam continuamente no tempo a tensão ou corrente sobre uma carga. As saídas externas são aquelas por onde se comandam sinais para acionar

componentes externos, enquanto que uma saída interna aciona, por exemplo, uma bobina de temporizador interno utilizado no programa de usuário.

2.2.1 Linguagem de Programação *Ladder*

A linguagem *Ladder* (LD) é uma linguagem de programação gráfica, muito semelhante a diagramas elétricos, por isso também é chamada de diagrama de contatos. É uma das linguagens padronizadas pelo órgão internacional denominado *International ElectroTechnical Commission* (IEC) dentro da norma IEC 61131-3, publicada em 1993, como forma para a padronização de programação de controladores lógicos programáveis (CLP).

O diagrama *Ladder* é a linguagem mais utilizada e clássica para programar CLP por ser uma linguagem fácil de ser entendida, pois é muito semelhante com as lógicas de contatos de comandos elétricos. Os elementos gráficos que representam o diagrama *Ladder* podem ser comparados com os elementos dos circuitos elétricos convencionais, pois possuem contatos do tipo normalmente aberto e fechado, linhas de energias e o elemento de atuação que vai ser controlado. Observa-se, na Tabela 2.3, três dos principais símbolos da programação *Ladder* e seus respectivos símbolos elétricos.

Tabela 2.3 - Três dos principais símbolos da programação *Ladder*.

Tipo	Símbolo	Equipamento elétrico
Contato aberto		
Contato fechado		
Saída		

Fonte: NOGUEIRA, 2003.

Os elementos gráficos da linguagem *Ladder* são instruções lógicas que quando agrupadas formam uma estrutura lógica combinacional. O resultado da operação lógica nessa estrutura é mostrado na saída do sistema. Na Figura 2.10, é possível comparar o acionamento de uma lâmpada a partir de um botão liga/desliga em um esquema elétrico convencional, em um programa em *Ladder* e por meio de ligações no CLP.

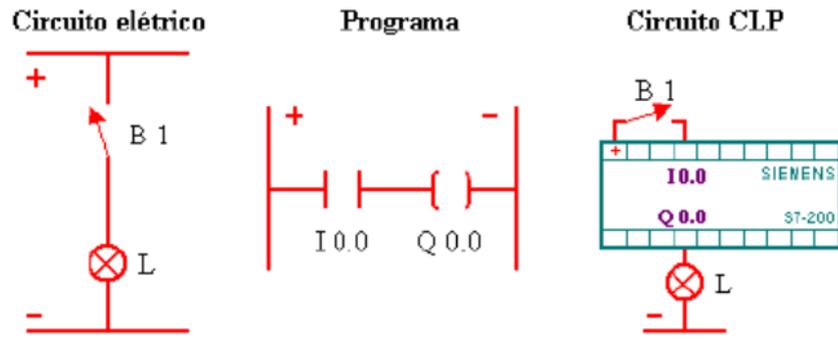


Figura 2.10 - Acionamento de uma lâmpada.

Fonte: NOGUEIRA, 2003.

2.3 Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

Um sistema supervisorio ou sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é um aplicativo que permite que sejam monitoradas e rastreadas informações do processo, podendo ser visualizadas por intermédio de quadros sinóticos animados com indicações instantâneas das variáveis de processo.

Permite que o operador controle um processo distribuído em lugares distantes, podendo alterar os estados de instrumentos, armazenar informações do processo, monitorar alarmes, dentre outras inúmeras funções.

Os seguintes itens apresentam os principais recursos encontrados em sistemas de supervisão: *tags*, telas sinóticas, alarmes, eventos, históricos e relatórios.

2.3.1 *Tags*

Tags são variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação, podendo executar funções computacionais ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo que está sendo controlado (ELIPSE, 2019).

2.3.2 Telas sinóticas

Telas sinóticas são elementos responsáveis por permitir uma representação do processo ao operador ou usuário do sistema supervisório (AUGUSTO, 2015). Há um planejamento, projeto e implementação das telas em um módulo desenvolvedor. Posteriormente, são executadas por meio do executável (*run-time*), sendo realizados, através das telas, a supervisão e operação do sistema.

2.3.3 Alarmes e Eventos

Conceito normalmente associado às *tags* e que estabelece uma relação entre o valor da *tag* e uma ou mais condições que serão apresentadas ao usuário utilizando recursos que destacarão a ocorrência ou demandarão alguma ação do usuário, como por exemplo, reconhecimento (AUGUSTO, 2015). Tem a função de avisar ao usuário do sistema quando uma variável ou condição do processo de produção está fora dos valores previstos.

2.3.4 Histórico

Elemento responsável por manter um histórico de valores de *tags*, armazenando em um local que possa ser consultado posteriormente um conjunto de valores e uma informação de data/hora associadas ao momento do registro deste conjunto.

2.3.5 Relatório

Ferramenta responsável por formatar a visualização de informações armazenadas em bancos de dados através da aplicação do supervisório ou através de outras aplicações.

Os relatórios mais comuns são:

- Relatório de Alarmes: Gera um relatório com o histórico de alarmes ocorridos durante uma faixa de tempo escolhida pelo operador do sistema.
- Relatório de Acesso: Gera um relatório com a lista de usuários que fizeram alguma modificação nos parâmetros do processo.
- Relatório de Variáveis: Gera um relatório com a lista de variáveis que foram alteradas ao decorrer de um período de tempo.

2.4 Protocolos de Comunicação de Dados

2.4.1 Modbus

O Modbus é um protocolo de requisição-resposta que utiliza um relacionamento mestre-escravo, podendo ser observado na Figura 2.11. Em um relacionamento mestre-escravo, a comunicação sempre ocorre em pares: um dispositivo deve iniciar a requisição e então aguardar por uma resposta; e o dispositivo iniciador (o mestre), é responsável por iniciar cada interação (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Tipicamente, o mestre é uma interface homem-máquina (IHM) ou sistema SCADA; e o escravo é um sensor, controlador lógico programável (CLP) ou controlador programável para automação (CPA).

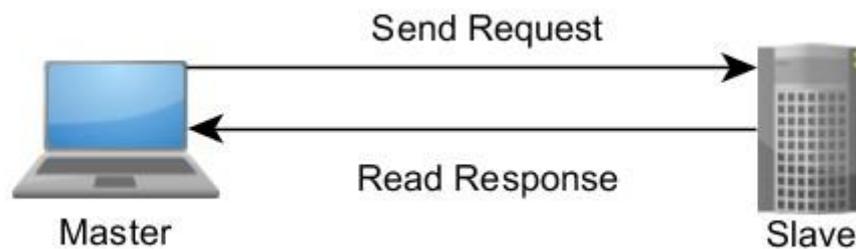


Figura 2.11 - Relacionamento de rede tipo mestre-escravo.

Fonte: National Instruments, 2019.

O Modbus é transmitido sobre redes seriais que conectam dispositivos e sua configuração mais simples seria um cabo serial conectando portas seriais de dois dispositivos (Master e Slave). Pode ser utilizado em diversos padrões de meio físico, como: i. RS-232; ii. RS-485; iii. *Ethernet TCP/IP* (MODBUS TCP). A velocidade de comunicação varia em cada um desses padrões, bem como o comprimento máximo da rede e o número máximo de dispositivos conectados.

O padrão RS-232 (*Recommendad Standart-232*) é utilizado apenas em comunicações do tipo ponto a ponto, ou seja, só admite dois dispositivos na rede. A velocidade máxima desse padrão está em torno de 115Kbps e a distância máxima entre os dispositivos da rede é aproximadamente 30m (FREITAS, 2014).

O padrão RS-485 (*Recommendad Standart-485*) é muito utilizado na indústria, permitindo trabalhar com taxas de comunicação que podem chegar a 50Mbps. Sabendo que quanto maior o comprimento da rede menor será a velocidade de comunicação, a distância máxima da rede é aproximadamente 1200m e o número máximo de dispositivos no barramento da rede é de 32 (FREITAS, 2014).

O padrão *Ethernet* no protocolo Modbus possui algumas variações, podendo chegar a 100Mbps ou até 10Gbps. A distância máxima pode variar de 100m até próximo de 200m dependendo do tipo de cabo utilizado e das condições de instalação (FREITAS, 2014).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Descrição da Planta

Para a elaboração do sistema de dois tanques acoplados, dispôs-se de dois tanques de acrílico com dimensões aproximadas de 43,7 milímetros de diâmetro interno e 250 milímetros de altura, fixados em um painel de acrílico, juntamente com um reservatório com capacidade para aproximadamente 14 litros.

Como atuador foi utilizada uma motobomba composta por um motor de corrente contínua de 12Vcc, um dissipador de calor e uma bomba de engrenagens acoplada ao eixo do motor. Esse atuador é acionado por um módulo de potência, cuja entrada é um sinal analógico de 0 a 5Vcc e saída é um sinal modulado por largura de pulsos (MLP ou PWM) de 0 a 12Vcc.

O fluxo de água da planta é regulado por esta bomba, não contendo válvulas de controle. A água é bombeada para os dois tanques, conforme a configuração apresentada na Figura 3.1. Os dois tanques deste sistema são montados de forma que o fluxo de saída do tanque superior (tanque 2) flui para dentro do tanque inferior (tanque 1) e o fluxo de saída do tanque inferior (tanque 1) flui para dentro do reservatório. Dessa forma, configura um sistema fechado, onde sua massa permanece constante durante o processo.

A medição de nível dos tanques é indireta, sendo aferida pela pressão diferencial por meio de um sensor. Este sensor é baseado no efeito piezoresistivo, sua saída é linear em uma faixa de 0 a 10kPa e possui um encapsulamento MPAK, que permite que um tubo lhe seja conectado, isolando-o do contato direto com a água.

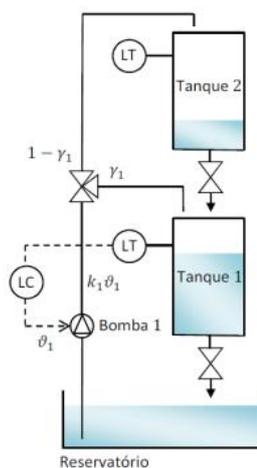


Figura 3.1 - Configuração adotada para sistema de dois tanques.

Fonte: COCOTA JR. *et al*, 2014.

3.2 Controlador Lógico Programável (CLP)

Fez-se uso do Controlador Lógico Programável (CLP) Training Box Duo TB131 da Altus, conforme ilustra a Figura 3.2.



Figura 3.2 - CLP Training Box Duo TB131 da Altus.

Fonte: ALTUS.

A Training Box Duo TB131 apresenta recursos que permitem a simulação de elementos presentes nos sistemas de automação industrial, predial e de máquinas. Montado em maleta, é composto por um Controlador Programável (CP) DU351 da Série Duo (CP com IHM integrada) como unidade central, conta com visor gráfico de 3,2” que permite visualização dos elementos programados e a interação com o processo. O CP possui E/S integradas, sendo as entradas digitais para simulação dos sinais de campo e as saídas digitais para acionamento de dispositivos. São disponibilizadas entradas e saídas analógicas de corrente e tensão, além de saídas digitais rápidas do tipo PWM (ou MLP) e PTO (ou TF) para acionamento de motor de passo e entradas rápidas para leitura de encoder permitindo a realização do posicionamento de eixos. Além disso, possui circuito dedicado que permite realizar simulações de controle e distúrbio em laços PID e tem a capacidade de ligação de até 16 CP's Duo em rede MODBUS RTU.

3.3 Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

O *software* SCADA escolhido para o projeto foi o E3 da Elipse Software, componente E3 Studio. Apresenta arquitetura amigável, que permite o rápido desenvolvimento de aplicações e grande conectividade com dispositivos e outros aplicativos, além de oferecer recursos avançados de programação para o gerenciamento, em tempo real, de processos industriais, saneamento e infraestrutura, integrando todos estes sistemas em uma arquitetura única.

Os sistemas SCADA construídos com o Elipse E3 coletam dados em tempo real dos equipamentos de controle ou aquisição de dados, e realizam a leitura e escrita dos dados destes equipamentos por meio de módulos (drivers de comunicação).

3.3.1 Tela Inicial

A tela inicial pode ser observada na Figura 3.3. Nesta tela, havia a opção de fazer login, sair ou ler sobre o projeto.



SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DE DOIS TANQUES ACOPLADOS

Aluna: Bruna Silva de Freitas
Orientadora: Regiane de Sousa e Silva Ramalho
Co-orientador: Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro



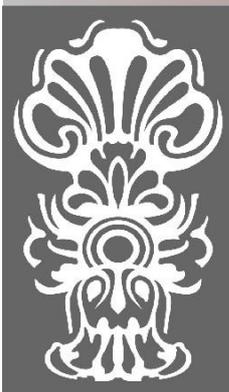
LOGIN SAIR SOBRE

(Se você não possui login, entre com "visitante" nos campos usuário e senha)

OURO PRETO
2019

Figura 3.3 - Tela Inicial do Sistema SCADA.

Ao clicar em “Login”, é necessário inserir credenciais pré-configuradas, como mostra a Figura 3.4, havendo a possibilidade de entrar como “visitante” e ter as funcionalidades e permissões reduzidas.



SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DE DOIS TANQUES ACOPLADOS

Login

Por favor, digite seu nome de usuário e senha para completar o login.

Domínio: LAPTOP-3RE9521Q

Autenticação: Windows E3

Nome do usuário:

Senha:

OK Cancelar



LOGIN SAIR SOBRE

(Se você não possui login, entre com "visitante" nos campos usuário e senha)

OURO PRETO
2019

Figura 3.4 - Tela de Login do Sistema SCADA.

3.3.2 Tela de Visão Geral

Na tela de visão geral, conforme exibe a Figura 3.5, nota-se a presença da tela de menu no quadro superior e da tela de alarmes no quadro inferior. As telas de menu e alarmes estão presentes em todas as outras.

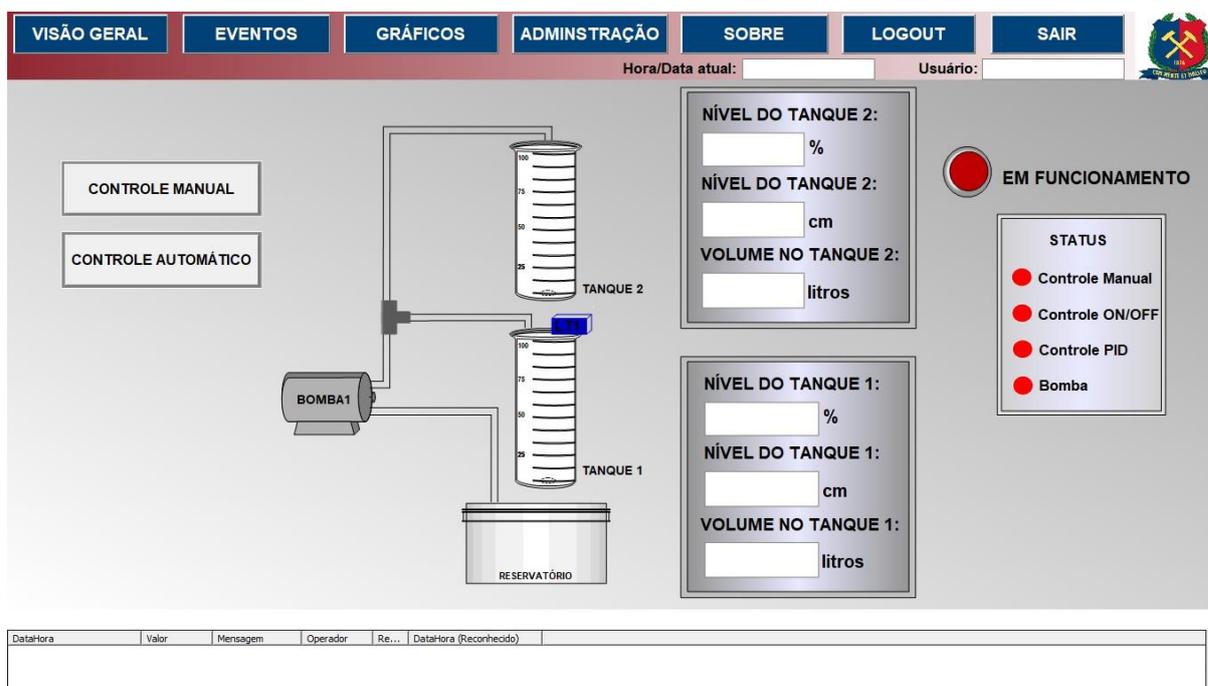


Figura 3.5 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA.

Foi feita uma animação onde o nível no tanque é simulado, de acordo com o nível detectado pelo sensor analógico. De forma análoga, os níveis eram representados em porcentagem, centímetros e litros nos indicadores da tela.

Há sinalizadores que indicam se o sistema está em funcionamento, se a bomba está operando e qual o modo de controle utilizado:

- Controle Manual;
- Controle Automático – ON/OFF;
- Controle Automático – PID.

3.3.2.1 Controle Manual

Na Tela de Visão Geral, ao clicar no botão “Controle Manual”, conforme exibe a Figura 3.6, é possível inserir a potência desejada da bomba. Foi definido o limite de 90% do nível do tanque inferior (tanque 1) para o desligamento da bomba, a fim de evitar transbordamento.

Dessa forma, os níveis dos tanques são controlados manualmente ao diminuir ou aumentar a potência da bomba e, conseqüentemente, a vazão da água.

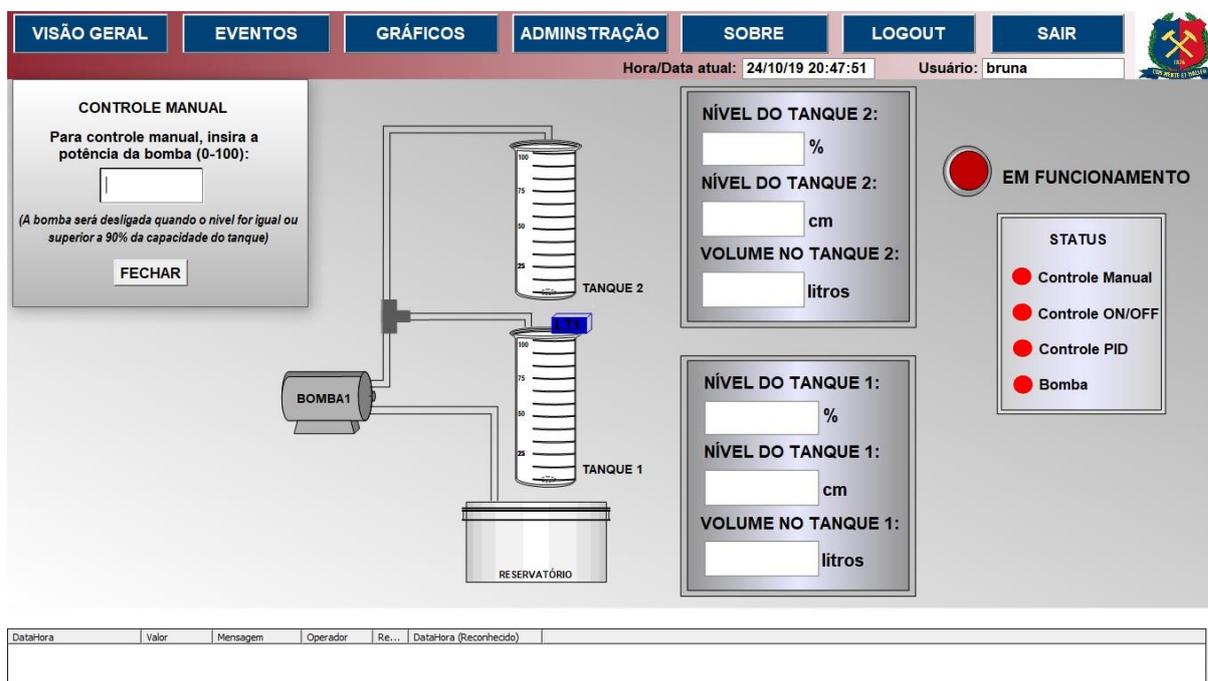


Figura 3.6 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Manual.

3.3.2.2 Controle Automático – ON/OFF

Na Tela de Visão Geral, ao clicar no botão “Controle Automático” e escolhendo a opção “ON/OFF”, conforme exibe a Figura 3.7, é possível determinar os limites superior e inferior, bem como a potência da bomba.

Dessa forma, os níveis dos tanques são controlados automaticamente, desligando a bomba sempre que atingir o nível superior e ligando-a sempre que atingir o nível inferior.

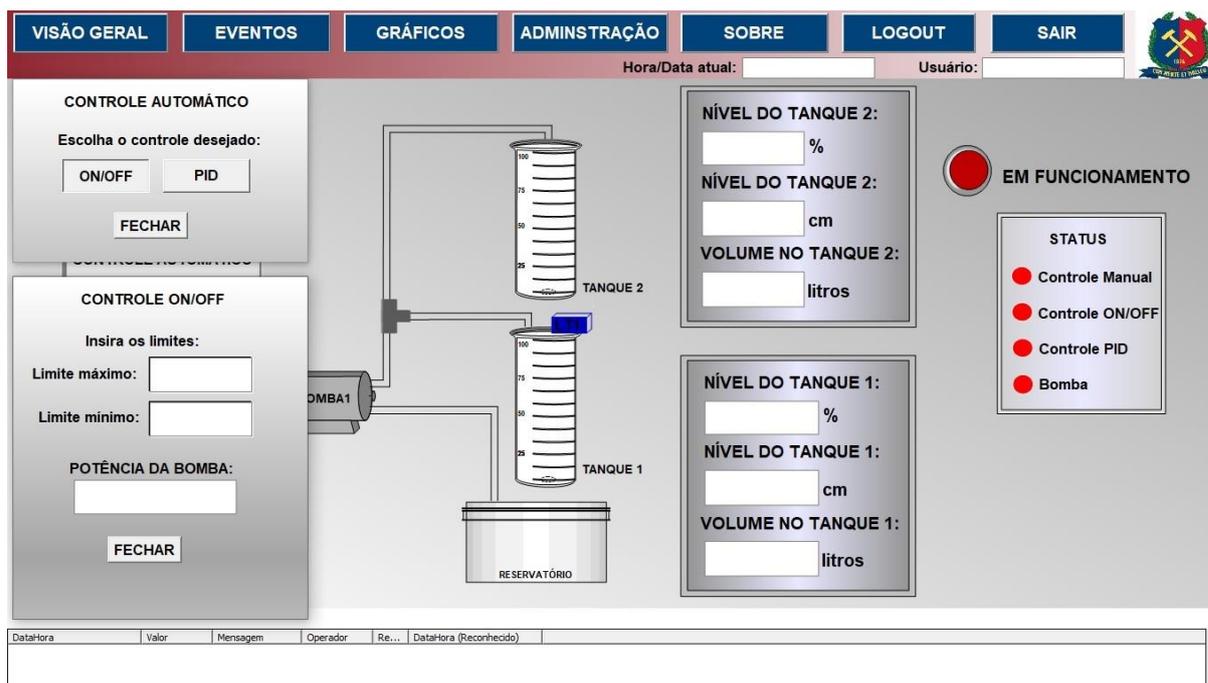


Figura 3.7 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Automático ON/OFF.

3.3.2.3 Controle Automático – PID

Na Tela de Visão Geral, ao clicar no botão “Controle Automático” e escolhendo a opção “PID”, conforme exibe a Figura 3.8, é possível determinar os limites superior e inferior, bem como a potência da bomba.

Dessa forma, os níveis dos tanques são controlados automaticamente com base nos parâmetros PID definidos no código desenvolvido em *Ladder*. Com o controle PID, evita-se que a bomba seja ligada e desligada várias vezes, como acontece no controle ON/OFF, mantendo sempre o nível do tanque entre os limites definidos.

Por motivo de segurança, os parâmetros PID não podem ser alterados no supervisório. Há a possibilidade de serem modificados no código em *Ladder*, no *software* MasterTool IEC, ou na Interface Homem-Máquina (IHM) do CLP.

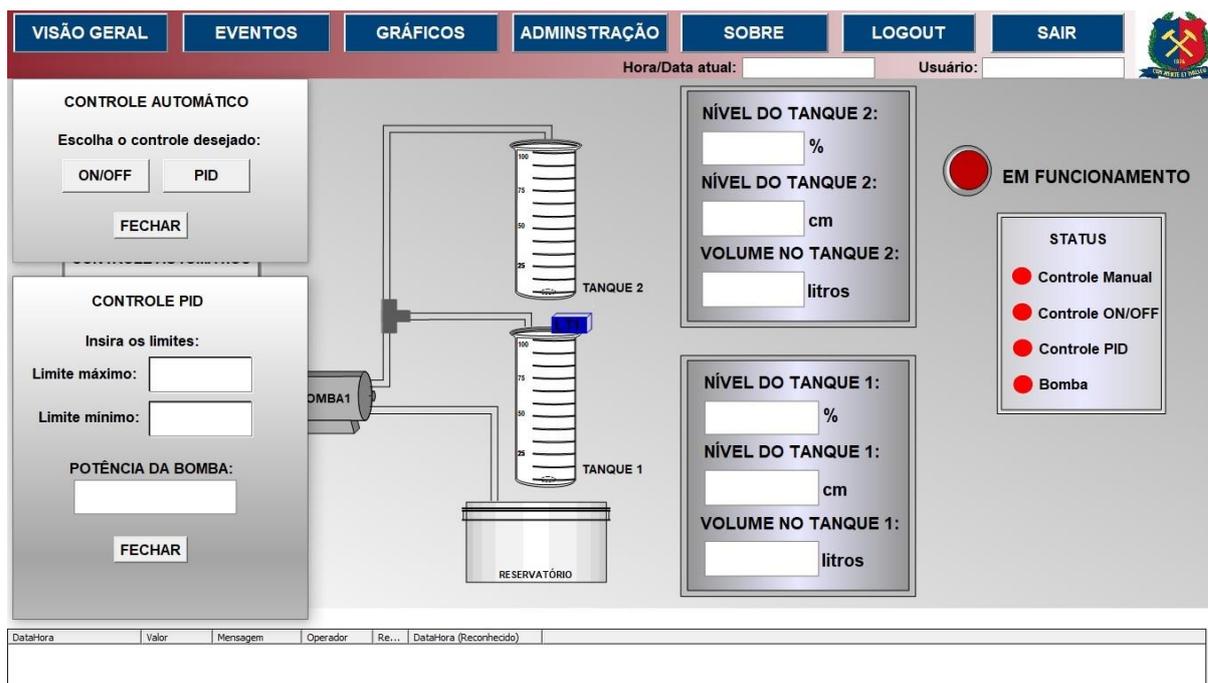


Figura 3.8 - Tela de Visão Geral do Sistema SCADA – Controle Automático PID.

3.3.3 Tela de Eventos

Na tela de eventos, conforme exibe a Figura 3.9, há a exibição resumida das ocorrências de alarmes. Na tela de alarmes, no quadro inferior, o alarme é exibido em tempo real informando a data e hora, o valor do alarme, mensagem, operador que estava acessando o sistema no momento do alarme, se o alarme foi reconhecido pelo operador e a data e hora do reconhecimento. Já na tela de eventos, há um histórico dessas informações, registrando apenas a data e hora, mensagem e valor.

Foram configurados alarmes para os limites inferior e superior, com mensagens associadas informando que o nível está baixo e alto, respectivamente.

Há o botão “Imprimir Relatório” que possibilita a impressão dos eventos em formato .pdf.



Figura 3.9 - Tela de Eventos do Sistema SCADA.

3.3.4 Tela de Gráficos

Na tela de gráficos, conforme exibe a Figura 3.10, o nível do tanque inferior é exibido em tempo real. Há ainda o recurso de exibir registros passados selecionando o intervalo de tempo do histórico, podendo escolher uma data desde quando se começou a registrar o nível do tanque inferior, com possibilidade de imprimir um relatório correspondente e exportar para vários formatos.

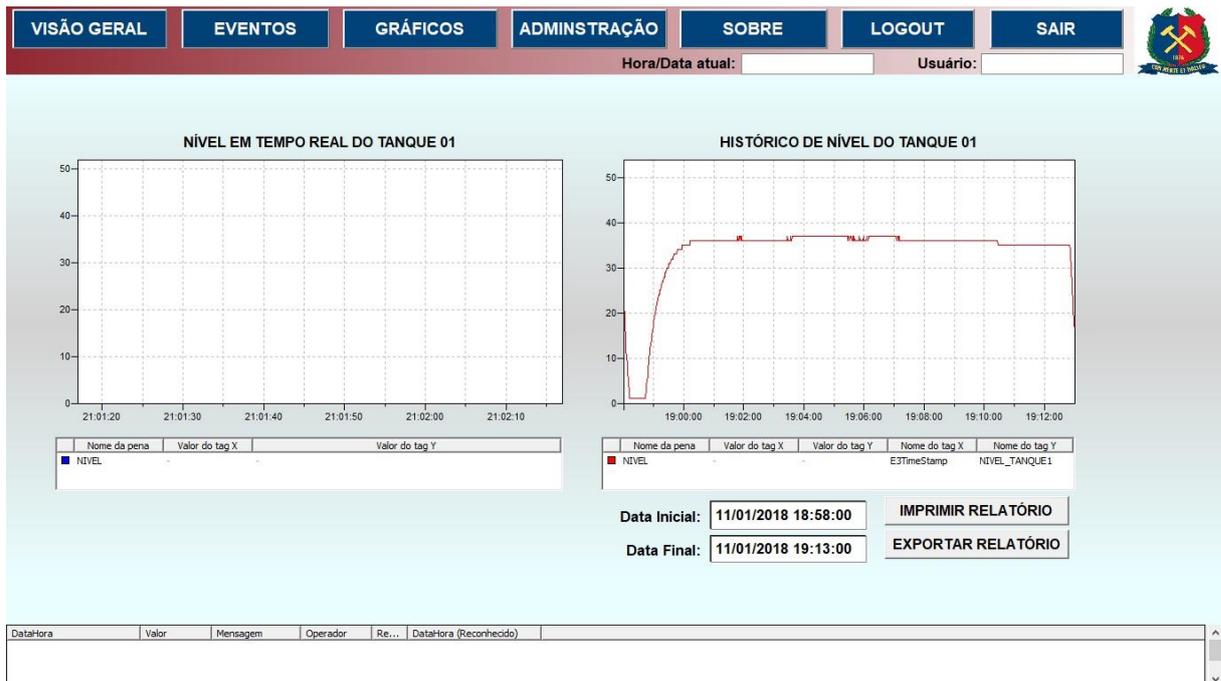


Figura 3.10 - Tela de Gráficos do Sistema SCADA.

3.3.5 Tela de Administração

Na tela de administração, conforme exibe a Figura 3.11, é possível fazer a configuração de usuários, grupos e respectivas permissões.

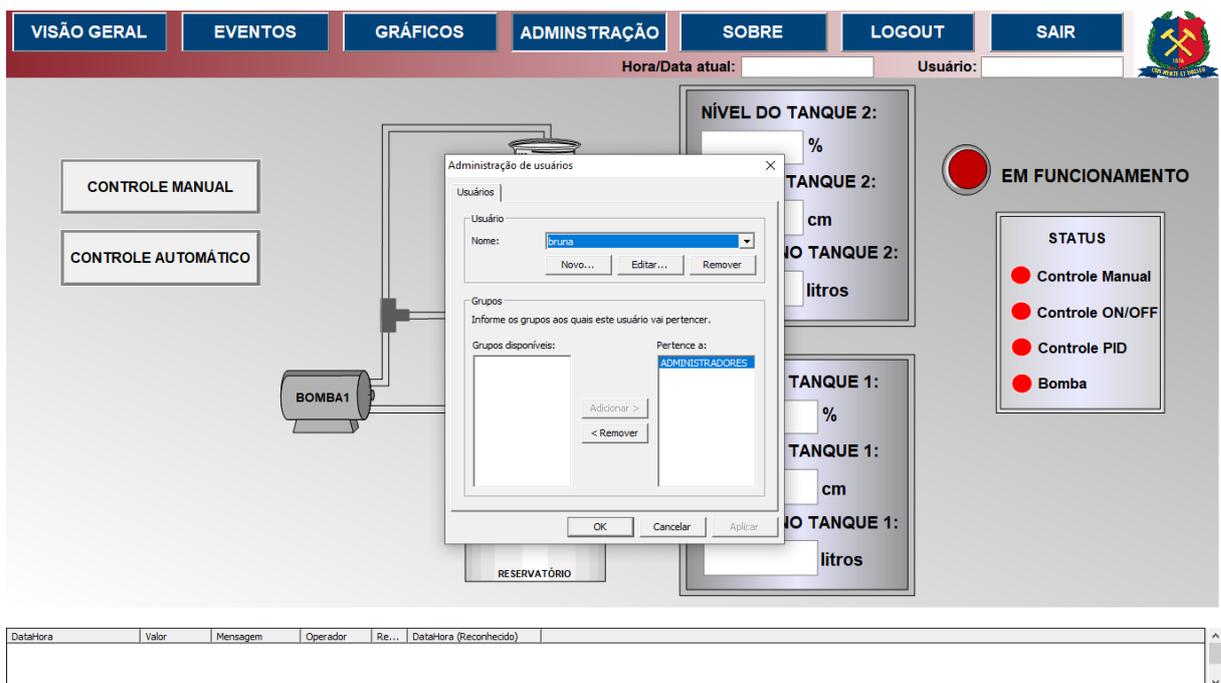


Figura 3.11 - Tela de Administração do Sistema SCADA.

3.4 Comunicação entre Elipse E3 e CLP

A comunicação entre o sistema SCADA e equipamentos de aquisição de dados, controladores, ou outro tipo de equipamento, é feita por meio de Drivers de Comunicação próprios ou Servidores OPC.

O protocolo Modbus foi escolhido por ser o único disponível no CLP Training Box Duo TB131 da Altus.

Para configuração da comunicação, foi feito o *download* do *driver* de comunicação Modbus.dll no site da Elipse *Software* e copiado para dentro da pasta do projeto do sistema SCADA. O arquivo também foi inserido em "Drivers e OPC", dentro do projeto. Nas configurações, foi selecionado o modo RTU (*Remote Terminal Unit*), que se refere ao modo de transmissão onde endereços e valores são representados em formato binário. Neste modo, para cada byte transmitido são codificados dois caracteres. Determinou-se serial como camada física e *timeout* como 4000 milissegundos, que é o tempo máximo que o sistema espera a resposta dos dados solicitados. Além disso, foi especificado *Baud rate* igual a 115200, sendo a taxa de transmissão dos dados pela porta serial, que neste caso é 115200 bits/s (bits transmitidos em um segundo).

3.5 Método da Curva de Reação por Ziegler-Nichols

Muitas plantas, em especial as encontradas nos processos industriais, podem ter sua dinâmica satisfatoriamente descrita por um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. Para plantas com essa característica, e que não possuem integradores nem polos complexos conjugados dominantes, podemos utilizar o método da curva de reação por Ziegler-Nichols para estimar os valores dos parâmetros do controlador.

Com a planta em malha aberta, colocou-se o ponto de operação manualmente, em um valor de 2,42V, por meio de comando enviado do CLP com auxílio do *software* MasterTool IEC. Após 300 segundos, com o sistema em regime permanente, foi enviado um degrau com acréscimo de 10% do valor do fundo de escala. Sabendo que o fundo de escala é 5V, foi

aplicado, portanto, 2,92V na entrada da planta. Esperou-se o sistema entrar em regime permanente para finalizar o experimento.

Sabendo um degrau seria enviado após 300 segundos, o que provocaria um aumento do nível, o ponto de operação no valor de 2,42V foi escolhido de forma que o nível ficasse em torno dos 10cm. Dessa forma, não correria risco de transbordamento no momento em que o sistema recebesse o sinal de 2,92V.

Com o auxílio do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados desenvolvido no *software* Elipse E3 e o banco de dados nele criado, conforme mostra a Figura 3.12, foi possível exportar um relatório que mostrasse os registros feitos no experimento.



Figura 3.12 - Tela do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados onde se registra os níveis em tempo real, exibe histórico e exporta relatórios.

Por meio do *software* MATLAB, foi desenvolvido um *script*, onde gerou-se gráficos que indicam os pontos de operação em cada tanque, conforme indicado na Figura 3.13.

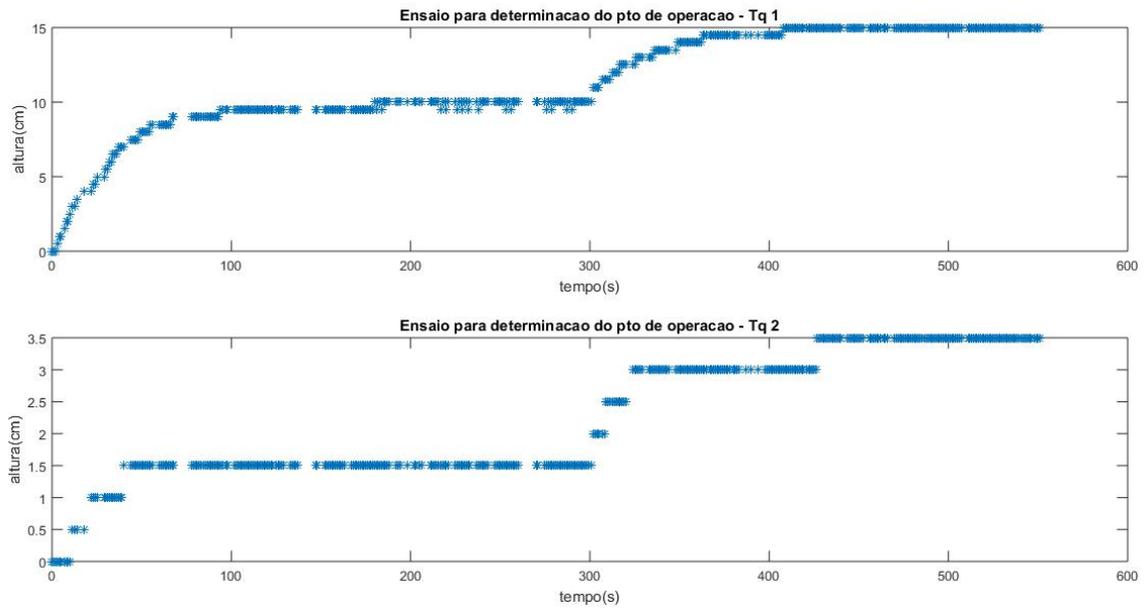


Figura 3.13 - Gráfico “Ensaio para determinação do ponto de operação do Tanque 1 e Tanque 2” gerado por um *script* no software MATLAB.

Por meio de outro *script* desenvolvido no *software* MATLAB, foi possível obter o gráfico de Cálculo do Ponto de Inflexão (Figura 3.14) e gráfico de Determinação de L e T (Figura 3.15).

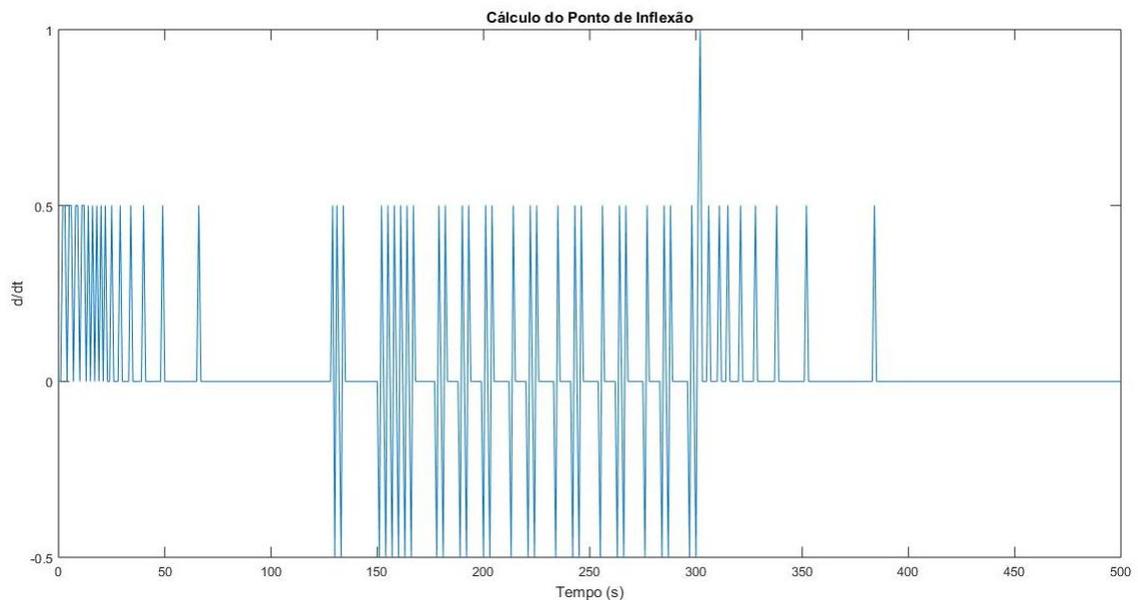


Figura 3.14 - Gráfico “Cálculo do Ponto de Inflexão” gerado por um *script* no *software* MATLAB.

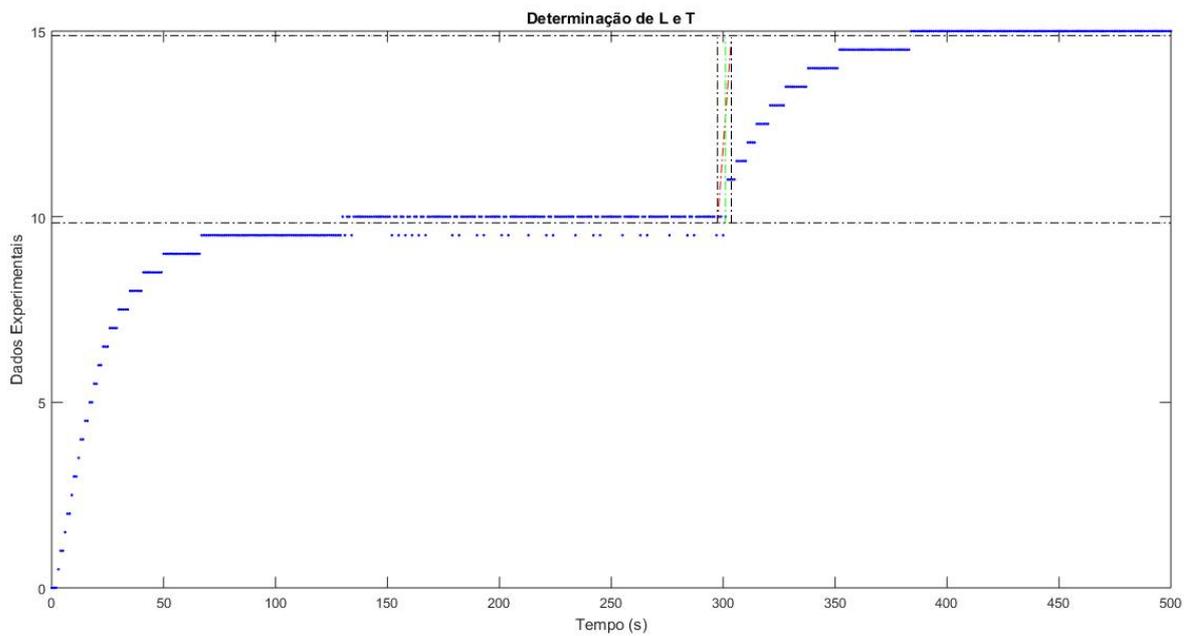


Figura 3.15 - Gráfico “Determinação de L e T” gerado por um *script* no *software* MATLAB.

Sabe-se que o degrau foi aplicado no instante $t=301s$ e que o ponto de inflexão é o ponto mais alto depois do degrau. Para melhor análise, a Figura 3.14 foi ampliada resultando na Figura 3.16, onde pode-se observar que o instante do ponto de inflexão é $t=306s$ (eixo X) e a derivada no ponto é $d/dt=0,5$ (eixo Y).

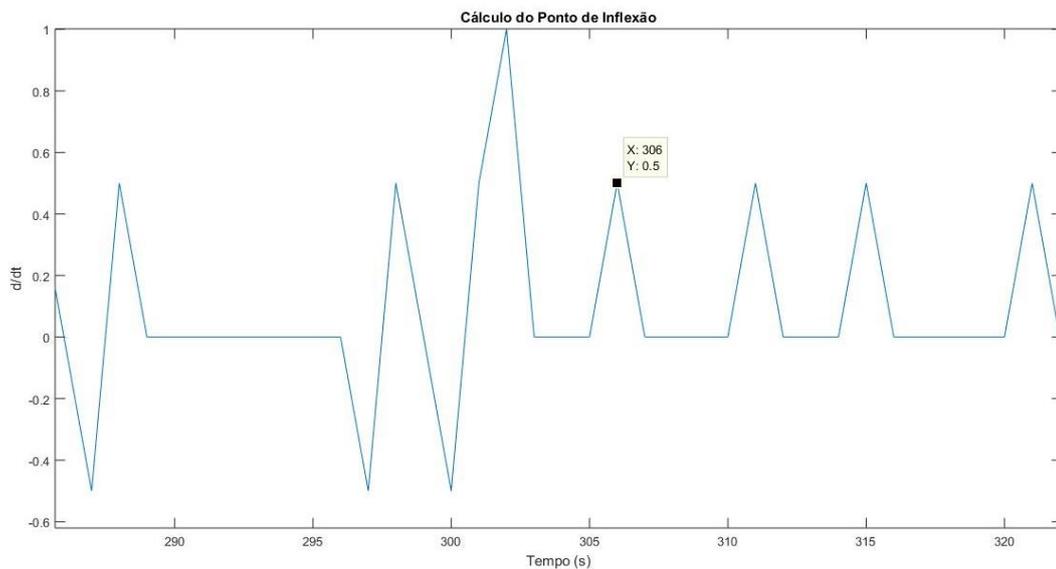


Figura 3.16 - Instante do Ponto de Inflexão e Valor da Derivada no Ponto de Inflexão.

Sabendo que o instante do ponto de inflexão é $t=306s$, analisou-se a Figura 3.15 a fim de se obter o respectivo valor da altura. Portanto, para um ponto de inflexão $t=306s$ (eixo X), encontrou-se uma altura igual a 11,5cm (eixo Y), como pode ser observado na Figura 3.17.

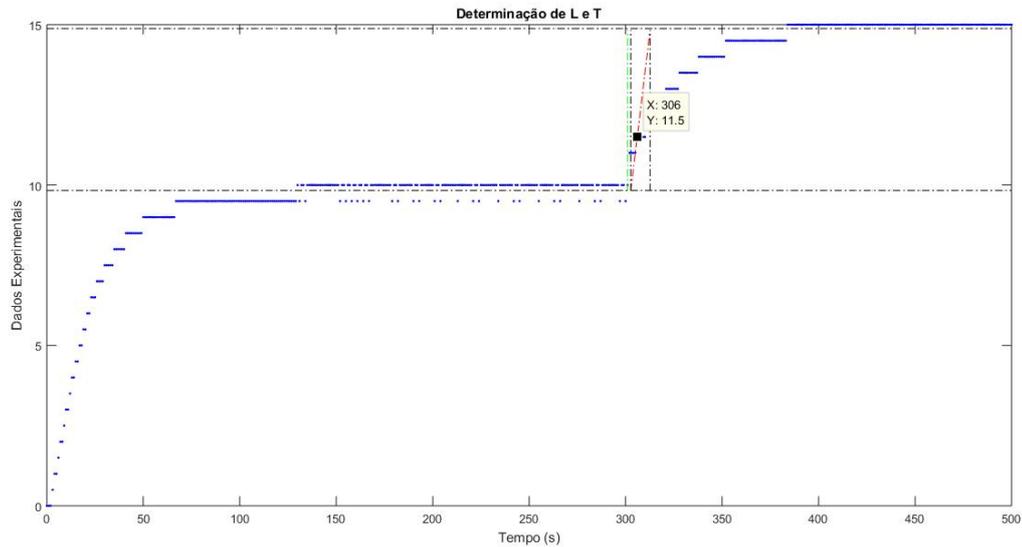


Figura 3.17 - Valor da altura no Ponto de Inflexão.

Com base na curva de reação do sistema e com auxílio de *script* desenvolvido no MATLAB, determinou-se as constantes do sistema:

- $T = 10$ segundos (constante de tempo)
- $L = 0,6596$ segundos (atraso da resposta)
- $K_0 = 2,3604$ (ganho direto do sistema)

3.6 Bloco PID programado em *Ladder*

No *software* MasterTool IEC, começou-se configurando os canais analógicos. O canal analógico de entrada foi habilitado e configurado para tipo de canal 0-10 V, enquanto o canal analógico de saída foi habilitado e configurado para tipo de canal 0-20 mA. Ambos trabalharam com fundo de escala igual a 10000.

Após demais configurações, adição de bibliotecas e programação, o bloco final do controlador PID pode ser visto na Figura 3.18.

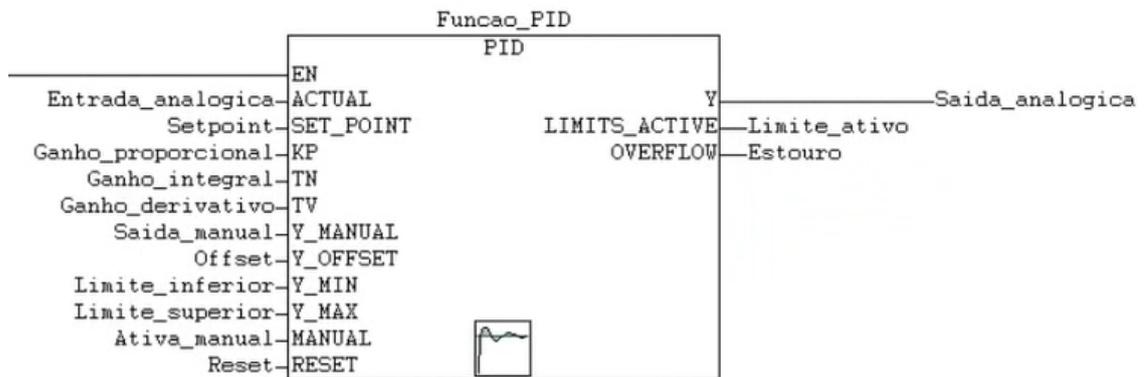


Figura 3.18 - Bloco do Controlador PID no *software* MasterTool IEC.

Os parâmetros do bloco são:

- *Entrada_analogica*: Entrada da função PID que representa a entrada analógica.
- *Setpoint*: Valor desejado.
- *Ganho_proporcional*: Ganho Proporcional K_p .
- *Ganho_integral*: Ganho Integral K_i .
- *Ganho_derivativo*: Ganho Derivativo K_d .
- *Saida_manual*: Valor da saída do PID, caso entrada MANUAL estiver habilitada.
- *Offset*: *Offset* para a saída Y.
- *Limite_inferior*: Valor mínimo assumido pela saída PID.
- *Limite_superior*: Valor máximo assumido pela saída PID.
- *Ativa_manual*: Ativa função PID para trabalhar em manual.
- *Reset*: Reseta função PID.
- *Saida_analogica*: Saída da função PID que representa a saída analógica.
- *Limite_ativo*: Indica que a saída da função passou dos limites máximo/mínimo.
- *Estouro*: Indica que ocorreu estouro da função.

A programação foi feita de modo que os parâmetros K_p , K_i e K_d pudessem ser alterados pela Interface Homem-Máquina (IHM) do Controlador Lógico Programável (CLP), eliminando a necessidade de interromper o processo para fazer a modificação.

4 RESULTADOS

Com o auxílio do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) desenvolvido e por meio do método da curva de reação de Ziegler-Nichols, foi possível encontrar as constantes K_0 , L e T . Dessa forma, pôde-se determinar os parâmetros do controlador para alcançar um amortecimento particular na resposta em malha fechada do sistema. As fórmulas para determinar os parâmetros do controlador pela regra de sintonia de Ziegler-Nichols estão apresentadas na Tabela 2.2.

Foi feita a programação do controlador PI em *Ladder*, onde os parâmetros do controlador foram inseridos e a saída do sistema pôde ser observada.

4.1 Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

Foi escolhido o *software* E3 da Elipse Software para desenvolvimento do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados. O sistema foi desenvolvido com sucesso, havendo coleta e exibição dos dados em tempo real, além de registro dos mesmos em um banco de dados, possibilitando que fossem consultados posteriormente. Havia, ainda, possibilidade de escolha do modo de controle, tela de configuração de usuários, tela de alarmes, entre outras funcionalidades que foram apresentadas no Capítulo 3.3.

4.2 Controlador PI programado em *Ladder*

O controlador PI programado em *Ladder* foi desenvolvido no *software* MasterTool IEC, conforme exibido no Capítulo 3.6.

O bloco e seus parâmetros podem ser observados na Figura 3.18.

4.3 Parâmetros do Controlador

Durante os experimentos percebeu-se que não havia necessidade do parâmetro derivativo, visto que é um sistema de dinâmica lenta. Dessa forma, com base nas constantes do sistema

encontradas através do Método da Curva de Reação por Ziegler-Nichols (Capítulo 3.5) e utilizando a Tabela 2.2, os parâmetros do controlador PI encontrados foram:

- $K_p = 5,7806$
- $K_i = 1,9787$

4.4 Função de Transferência Aproximada

A função de transferência do sistema pode ser aproximada pela função de transferência transcendental de primeira ordem:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts+1} \quad (4.1)$$

K, L e T são as constantes do sistema encontradas por meio do Método da Curva de Reação por Ziegler-Nichols (Capítulo 3.5). Logo, a função de transferência aproximada do sistema é:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2,3604 e^{-0,6596s}}{10s+1} \quad (4.2)$$

4.5 Comportamento do Sistema

4.5.1 Parâmetros obtidos por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols

Após encontrar os parâmetros do controlador PI (Capítulo 4.1), foi feita a programação do bloco PID em *Ladder* no *software* MasterTool (conforme apresentado no Capítulo 3.6).

Para uma altura desejada de 15cm, o sistema se mostrou estável, com erro próximo de zero em regime permanente e não apresentou alto valor de *overshoot*, como pode ser observado na Figura 4.1.

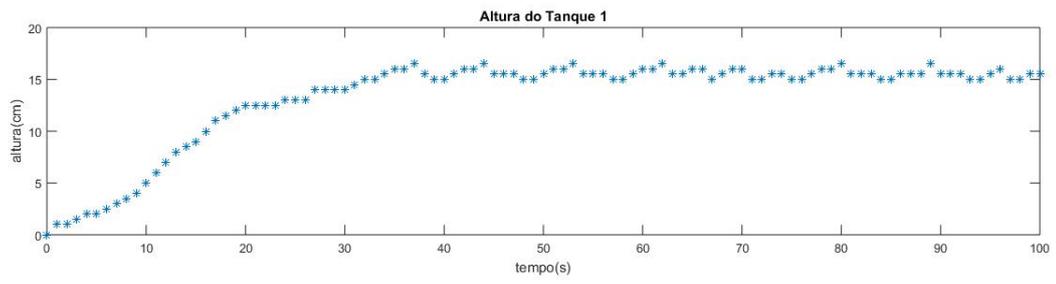


Figura 4.1 - Resposta do sistema com parâmetros PI obtidos por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que o sistema com controlador PI de parâmetros obtidos por meio do método da curva de reação por Ziegler-Nichols se mostrou estável, com erro mínimo e ausência de altos valores de *overshoot*.

Por meio das constantes T, L e K_0 (constante de tempo, atraso da resposta e ganho direto do sistema, respectivamente), a função de transferência do sistema pôde ser aproximada pela função de transferência transcendental de primeira ordem.

Diante do disposto acima, pode-se afirmar que o objetivo do projeto foi alcançado.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o estudo de diferentes métodos de sintonia dos parâmetros de controladores aplicados ao controlador programado em *Ladder*. Pode-se utilizar o método de Cohen-Coon e comparar com os resultados obtidos pelo método de Ziegler-Nichols, e também incluir algoritmos de otimização e inteligência artificial para interpretar as curvas de resposta do sistema e sugerir novos valores de parâmetros em tempo real.

REFERÊNCIAS

ALPI, L. B. **Desenvolvimento de uma Planta Didática para o Controle de Nível de Tanques Acoplados**. Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 2016.

ALTUS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO S.A. **Training Box Duo**. Disponível em: www.altus.com.br/produto/15/training-box-duo. Acesso em: 25 out. 2019.

ALTUS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO S.A. **Training Box Duo**. Disponível em: www.altus.com.br/suporte/download/baixararquivo/BgEB/2. Acesso em: 25 out. 2019.

ÅSTRÖM, K. J.; Hägglund, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2ª Ed. Carolina do Norte: Instrument Society of America, 1995

AUGUSTO, H. **Sistema Supervisório: Entenda o que é**. Disponível em: www.hitecnologia.com.br/blog/sistema-supervisorio-entenda-o-que-e. Acesso em: 30 nov. 2019.

COCOTA JR., J. A. N.; MONTEIRO, P. M. B.; SANCHEZ, M. S.; CRUZ, E. B.; D'ANGELO, T.; BRITO, R. P.; IRENO, T. **Análise de Diferentes Controladores para o Processo de Dois Tanques Acoplados**. In: COBENGE, 42, 2014, Juiz de Fora, MG. *Anais...* Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

COCOTA JR., J. A. N.; MONTEIRO, P. M. B.; VIANA, L. M.; MEIRELES, L. V.; COSTA, R. R.; PEIXOTO, A. J. **O Sistema de Controle de Nível de Tanque no Ensino de Graduação**. In: CONGRESO DE TECNOLOGIA, APRENDIZAJE Y ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA, 11, 2014, Bilbao, España. *Anais...* Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

DORF, R. C. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2001.

ELIPSE. **O que são Sistemas Supervisórios?**. Disponível em: kb.elipse.com.br/o-que-sao-sistemas-supervisorios. Acesso em: 30 nov. 2019.

FREITAS, C. M. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**. Disponível em: www.embarcados.com.br/protocolo-modbus. Acesso em: 06 nov. 2019.

GOMES, J. M. **Ação Liga-Desliga**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node20.html. Acesso em: 15 de nov. 2019.

GUERRA, W. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Monografia apresentada ao Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Especialista em Engenharia de Instrumentação. Recife, Pernambuco, Brasil. 2009.

IBRAHIM, D. **Microcontroller Based Applied Digital Control**. Chinchester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

LOURENÇO, J. **Sintonia de controladores PID**. Escola Superior de Tecnologia, 1997.

MUNIZ, S. R. **Resumo Sobre Controladores PID**. Instituto de Física de São Carlos, 2007. Disponível em: edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4132451/mod_resource/content/0/Resumo_controladores_PID.pdf. Acesso em: 23 de nov. 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O Protocolo Modbus em Detalhes**. Disponível em: www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html. Acesso em: 06 nov. 2019.

NOGUEIRA, A. E.; AQUINO, T.; MARINHO, G. **Acionamento de Máquinas Elétricas Usando CLP Siemens**. Disponível em: vdocuments.mx/plc-step-7-apostila-siemens.html. Acesso em: 27 nov. 2019.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

PRADO, V. R. **Controladores Lógicos Programáveis, Norma IEC61131-3 e suas Implicações Práticas em Projetos**. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 2013.