



CEFET-MG

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

GUILHERME DE LIMA RESENDE MARTINS

**CONTROLE DO NÍVEL DE UM TANQUE UTILIZANDO O
CONTROLADOR DF75 E O TRANSMISSOR DE PRESSÃO LD301**

ARAXÁ/MG

2023

GUILHERME DE LIMA RESENDE MARTINS

**CONTROLE DO NÍVEL DE UM TANQUE UTILIZANDO O
CONTROLADOR DF75 E O TRANSMISSOR DE PRESSÃO LD301**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar

ARAXÁ/MG

2023



ATA Nº 92 / 2023 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.060620/2023-73

Araxá-MG, 11 de dezembro de 2023.

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Automação Industrial do Aluno Guilherme de Lima Resende Martins

Às vinte horas e cinquenta minutos do dia oito de dezembro de dois mil e vinte e três, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **CONTROLE DO NÍVEL DE UM TANQUE UTILIZANDO O CONTROLADOR DF75 E O TRANSMISSOR DE PRESSÃO LD301**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Henrique José Avelar, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **Guilherme de Lima Resende Martins**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: **93/100** (noventa e três). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. O Prof. Leandro Resende Mattioli, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo candidato.

Araxá, 08 de dezembro de 2023.

Assinado eletronicamente por:

- Presidente e Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar
- Membro Titular: Prof. Dr. Frederico Duarte Fagundes
- Membro Titular: Prof. Me. Alexandre Dias Linhares
- Professor da Disciplina TCC 2: Prof. Dr. Leandro Resende Mattioli
- Aluno: Guilherme de Lima Resende Martins

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 13:27)
ALEXANDRE DIAS LINHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTMECAX (11.50.19)
Matricula: 1164526

(Assinado digitalmente em 12/12/2023 09:16)
FREDERICO DUARTE FAGUNDES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 1107165

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 10:13)
HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 392234

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 20:33)
LEANDRO RESENDE MATTIOLI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 2973183

(Assinado digitalmente em 14/12/2023 16:35)
Guilherme de Lima Resende Martins
DISCENTE
Matricula: 201714550214

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número:
92, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **11/12/2023** e o código de verificação: **f622e2d67d**

RESUMO

O uso de plantas didáticas em um curso de engenharia desempenha um papel crucial no ensino, pois possibilita ao aluno unir os conhecimentos teóricos com a prática, desenvolvendo habilidades importantes de resolução de problemas que serão valiosas em suas carreiras. Neste sentido, para agregar uma maior diversidade de processos ao laboratório, o presente trabalho buscou realizar o controle de nível de uma planta disponível no laboratório por meio de um controlador industrial, sendo também desenvolvido o *software* supervisor para o mesmo. Para tanto, fez-se um estudo a respeito dos equipamentos utilizados no trabalho e, em seguida, foi concluída a interligação entre o controlador industrial e a planta. A seguir, foram desenvolvidos os *softwares* para controle e supervisão do sistema, realizando a lógica de controle, monitoração e configuração de parâmetros. O modelo da planta foi determinado através de testes em malha aberta, a fim de determinar os parâmetros do controlador. Por fim, foram realizados testes para validação do controle do sistema.

Palavras-chave: Controle. Software. Supervisor. Configuração. Monitoração.

ABSTRACT

The use of didactic plants in an engineering course plays a crucial role in education, as it allows students to integrate theoretical knowledge with practical experience, developing important problem-solving skills that will be valuable in their careers. In this context, to incorporate a greater variety of processes into the laboratory, the present work sought to control the level of a plant available in the laboratory using an industrial controller, with supervisory software also being developed for it. To achieve this, a study was conducted on the equipment used in the work, followed by the interconnection between the industrial controller and the plant. Subsequently, software was developed for system control and supervision, implementing control logic, monitoring, and parameter configuration. The plant model was determined through open-loop tests to establish controller parameters. Finally, tests were conducted to validate the system control.

Keywords: Control. Software. Supervisory. Configuration. Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do conceito de pressão.....	15
Figura 2 - Tanque com pressão diferencial	16
Figura 3 - Agarramento de uma válvula	18
Figura 4 - Inicialização e ciclo de varredura	19
Figura 5 - Diagrama esquemático do PID: (a) paralelo; (b) série	21
Figura 6 - IHM de um tanque de aquecimento	22
Figura 7 - Diagrama de ligação do LD301 com o tanque da planta CRL	23
Figura 8 - Visão geral da célula capacitiva do transmissor	24
Figura 9 - Módulos do DemoKit.....	26
Figura 10 - Módulo DF44.....	27
Figura 11 – Resistor <i>shunt</i> interno do DF44.....	27
Figura 12 - Ligação do módulo DF44 com o LD301	28
Figura 13 - Módulo DF46.....	29
Figura 14 – Procedimento de segurança para conexão do DF46 à planta CRL	30
Figura 15 – Conexão completa do DF46 à planta CRL.....	30
Figura 16 – Conexão física dos equipamentos	32
Figura 17 - Configuração do endereço IP do CLP no System302.....	32
Figura 18 - Endereço IP do computador	33
Figura 19 - Criação de áreas no System302.....	34
Figura 20 - Criação do novo projeto no Syscon	34
Figura 21 – Configuração dos módulos e Racks no LogicView.....	35
Figura 22 - Parâmetros de configuração do DF44	36
Figura 23 - Parâmetros de configuração do DF46	36
Figura 24 - Bloco Funcional MAI	37
Figura 25 - Bloco PID em série com o bloco funcional MAO.....	39
Figura 26 - Lista de <i>Tags</i> do projeto.....	39
Figura 27 - Atribuição da <i>tag</i> de nível ao seu respectivo objeto.....	40
Figura 28 - Tela do processo.....	41
Figura 29 – Grupo de telas iniciais	41
Figura 30 - Tela principal com ativação do alarme.....	42
Figura 31 - Gráfico de tendências	43

Figura 32 – Tela de parâmetros do PID	43
Figura 33 - Atualização dos parâmetros internos das funções.....	44
Figura 34 - Planilha de <i>tags</i> do servidor OPC DA	44
Figura 35 - Teste inicial em malha aberta	45
Figura 36 - Segundo teste de malha aberta	46
Figura 37 - Teste PI na planta CRL.....	50
Figura 38 - Teste PI na planta DemoKit	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET/MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CRL	Controle e Regulação de Nível
PID	Proporcional Integral Derivativo
PI	Proporcional Integral
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
IHM	Interfaces Homem-Máquina
CPU	Unidade Central de Processamento
ST	<i>Structured Text</i>
IL	<i>Instruction List</i>
DL	Diagrama <i>Ladder</i>
FBD	<i>Function Block Diagram</i>
SFC	<i>Sequential Function Chart</i>
PH	Lado de alta pressão
PL	Lado de baixa pressão
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
SP	<i>Setpoint</i>
PV	Váriavel do processo
MV	Variável Manipulada
HSE	<i>High Speed Ethernet</i>
E/S	Entradas/Saídas
CLP	Controlador Lógico Programável
OPC	OLE for Process Control
OLE	Object Linking and Embedding
OPC DA	<i>Open Platform Communications – Data Access</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
MAI	Múltiplas Entradas Analógicas
MAO	Múltiplas saídas Analógicas
KP	Ganho Proporcional

TR	Tempo integrativo
TD	Termo constante Derivativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Medição do nível de um tanque por meio da pressão	15
2.2	Elemento final de controle	17
2.3	Controladores Lógicos Programáveis	18
2.3.1	Diagrama <i>Ladder</i> e blocos funcionais	20
2.4	Controle PID	20
2.5	Sistemas supervisórios	21
2.6	Servidores OPC	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	Sistema de controle de nível utilizando o DemoKit – SMAR	23
3.1.1	Uso do LD301 para medição de nível	24
3.1.2	Configuração do LD301	25
3.1.3	Demokit – SMAR	25
3.1.4	Controlador DF75	26
3.1.5	Módulo DF44	26
3.1.6	Módulo DF46	28
3.2	Controle e supervisor da planta CRL	30
3.2.1	Comunicação física e configuração de rede dos equipamentos	31
3.2.2	Syscon	33
3.2.3	LogicView	35
3.2.4	Indusoft	39
3.3	Modelagem do sistema	45
3.3.1	Ganhos do controlador PI	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5	CONCLUSÃO	52

6	REFERÊNCIAS.....	53
---	------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Um curso de engenharia tem como objetivos, promover o aprendizado, despertar a capacidade criativa do discente e fornecer ferramental básico, com o intuito de prepará-lo diante dos possíveis desafios técnicos que possam ser encontrados na atuação da profissão, além de estimular a adotar uma postura crítica e consciente (WALTER ANTÔNIO BAZZO, 2006).

Para atingir estes objetivos, é imprescindível que o corpo docente complemente o conteúdo teórico apresentado em sala de aula com outras formas didáticas de aprendizado, tais como as aulas de laboratório, que possibilitam ao aluno o contato direto com instrumentos e sistemas similares aos encontrados na indústria, integrando-o ao máximo com um ambiente equivalente ao vivenciado nas empresas, de tal forma que proporcione uma maior versatilidade e discernimento. Segundo Silva et al (2011), a planta didática industrial pode ser considerada um objeto educacional complementar nos cursos de engenharia, podendo ser usado para consolidação do conhecimento.

A operação de plantas didáticas que trabalham com componentes industriais pode suprir no estudante de engenharia, a demanda do mercado por egressos com conhecimento prático aliado à teoria aprendida na graduação, além de maior intimidade do estudante com processos industriais, tornando-se apto a detectar erros e realizar processos de otimização das plantas industriais (OLIVEIRA, TEIXEIRA, *et al.*, 2012)

Dada a importância que as plantas didáticas apresentam para os estudantes de engenharia, este trabalho teve como finalidade o controle e medição do nível de uma planta presente no Laboratório de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais campus Araxá (CEFET/MG).

A lógica de controle foi feita por meio de blocos funcionais e linguagem *ladder*, o projeto também contou com um sistema supervisor, possibilitando ao usuário monitorar dados relevantes do processo, assim como realizar a modificação dos parâmetros de operação. Sendo assim, este trabalho se caracteriza pela utilização de um CLP (Controlador Lógico Programável), parte integrante do DemoKit – SMAR, para realizar o controle de nível da planta CRL (Controle e Regulação de Nível) da DIDACTA, permitindo aos alunos do curso a familiarização com instrumentos reais que possam se deparar futuramente, no âmbito profissional.

A escolha deste trabalho teve como foco auxiliar os professores da instituição em suas aulas práticas. Com esta implementação, é possível aumentar a diversidade de processos a serem demonstrados aos alunos do curso. Para isso, foi fundamental compreender os instrumentos da planta CRL e do DemoKit – SMAR, para fazer a integração entre ambos e, a configuração de um PID no controlador DF75 para controlar o nível da planta CRL, o qual foi monitorado por meio de um sistema supervisão elaborado no Indusoft Web Studio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção tem como objetivo abordar sobre os principais temas relacionados ao projeto em questão, elucidando a respeito das teorias e conceitos que foram necessários para a sua implementação.

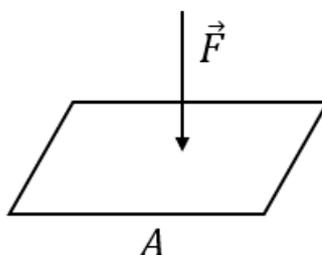
2.1 Medição do nível de um tanque por meio da pressão

Nível pode ser definido como a altura que um certo líquido ou sólido ocupa em um recipiente com relação a um certo ponto de referência. A sua medição pode ser efetuada de forma direta ou indireta.

Na medição de forma direta, o elemento utilizado para a medição possui contato direto com a matéria que está sendo medida, tais como: medição por visor de nível, boia, réguas ou gabarito. Na medição de forma indireta, os níveis são obtidos por meio de grandezas físicas como pressão, empuxo, ultrassom, entre outros (CASTELETTI, 2013).

Na fluidestática, quando o fluido está submetido a uma carga por um êmbolo móvel, a pressão pode ser conceituada como a força por unidade de área que está sendo aplicada perpendicularmente a uma certa superfície (RAMIELLI, 2021), conforme demonstrado na Figura 1 e na Equação 1.

Figura 1 - Ilustração do conceito de pressão



Fonte: Adaptado de Ramielli (2021)

A pressão pode ser definida através da seguinte equação:

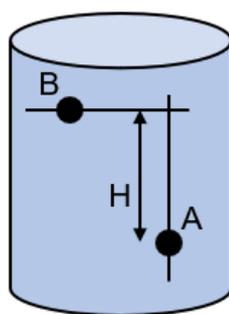
$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

- F – Força perpendicular à área (N);
- A – Área em que a força está sendo aplicada (m²);
- P – Pressão (N/m²), também chamado de Pascal (Pa) pelo Sistema Internacional de Unidades (SI).

Também na fluidestática, quando o fluido não está submetido à pressão de um êmbolo móvel, a pressão pode ser definida com o teorema de Stevin. De acordo com o teorema de Stevin, a diferença entre as pressões de dois pontos distintos de um mesmo líquido em equilíbrio é igual ao produto do peso específico do líquido e a profundidade dos dois pontos, independentemente de sua posição no eixo horizontal (RAMIELLI, 2021). Desta forma, para determinar a altura H de um tanque, basta pegar a diferença entre a pressão B e A, observado na Figura 2, e dividir pelo peso específico (γ) do líquido, como demonstrado na Equação 2.

Figura 2 - Tanque com pressão diferencial



Fonte: Adaptado de Ramielli (2021)

$$H = \frac{P_A - P_B}{\gamma} \quad (2)$$

Onde:

- P_A e P_B (Pa);
- H (m);

- γ (N/m^3) consiste no produto da massa específica pela aceleração da gravidade.

Uma das formas de realizar a medição do nível de um certo recipiente, é por meio da pressão diferencial, que é a diferença entre duas pressões distintas $\Delta P = P_1 - P_2$. Caso P_1 seja a pressão absoluta e P_2 seja a pressão atmosférica, a diferença entre ambas as pressões é denominado pressão manométrica (AGUIRRE, 2013), como demonstrado na Equação 3.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad (3)$$

Na fluidodinâmica (quando o fluido está em movimento), a pressão é definida como a resistência oferecida ao escoamento desse fluido. No presente trabalho será utilizado um sensor de pressão diferencial manométrico para medir o nível do reservatório da planta CRL.

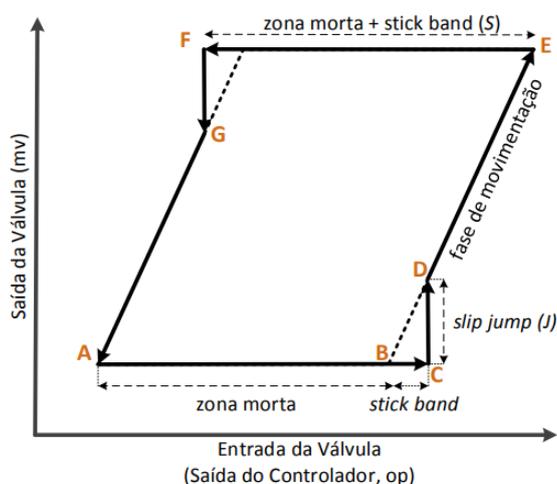
2.2 Elemento final de controle

As válvulas de controle são frequentemente utilizadas como elementos finais de controle em sistemas industriais. Sendo compostas por três partes principais. O corpo, responsável pela passagem do fluido. O castelo, encarregado de realizar a ligação do corpo ao atuador. Por fim, o atuador, responsável por receber o sinal do sistema de controle, seja ele manual, pneumático, elétrico ou hidráulico, e converter esta informação na abertura da válvula. Desempenham uma função crucial nos processos industriais, sendo responsáveis por regular o fluxo de fluidos e garantir o correto funcionamento do sistema. (ATTOLINI, 2014).

O seu mau funcionamento pode prejudicar o desempenho dos processos industriais, levando a perdas desnecessárias. Devido a sua importância, as identificações dessas falhas são essenciais para a melhoria do sistema. Entre os principais problemas relacionados às válvulas em um processo industrial o agarramento é o mais frequente (ATTOLINI, 2014).

O agarramento consiste na dificuldade de uma válvula para iniciar seu movimento, resultando assim na obstrução parcial da passagem do fluxo de forma não intencional, isto acontece quando a válvula não consegue superar seu atrito estático (SHOUKAT CHOUDHURY, THORNHILL e SHAH, 2005). Conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Agarramento de uma válvula



Fonte: Choudhury (2005)

Quando a válvula inicia o seu movimento representado pela letra A, pode ficar emperrada caso não consiga superar a força de atrito estático. A zona morta e *stick band* correspondem à faixa que o controle varia sem que seja notada a variação de sua abertura, assim, o ganho integrador aumenta até que seja notada a sua variação, causando uma mudança abrupta na válvula, representado pelo *slip jump*, e volta à sua fase de movimentação normal, até que mude de direção ou sua velocidade fique próxima a zero.

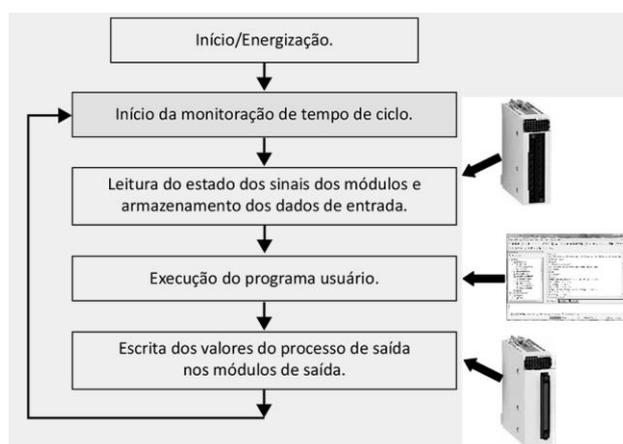
2.3 Controladores Lógicos Programáveis

Os Controladores Lógicos Programáveis são dispositivos eletrônicos amplamente utilizados para automatizar processos industriais. O CLP pode ser considerado como um computador industrial que pode ser programado para desempenhar ações de controle e possui múltiplas entradas e saídas, que suportem o trabalho em um

ambiente sujeito a ruídos, temperaturas altas, vibração, impacto entre outras avarias que podem ser presenciadas em um ambiente industrial (PETRUZELLA, 2014).

Podemos descrever o CLP como sendo constituído por três partes: módulos de entradas, Unidade Central de Processamento (CPU) e módulos de saída. Durante seu funcionamento, o CLP realiza uma sequência de operações chamada ciclo de varredura. Inicialmente é lido o valor de cada uma das entradas e seus dados são armazenados quando o programa é executado. A CPU verifica os valores de entrada armazenados e atualiza a saída, com base nas configurações pré-definidas pelo usuário na lógica de controle (DA SILVA, 2016), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Inicialização e ciclo de varredura



Fonte: Silva (2016)

De acordo com a norma IEC 61131-3, existem cinco tipos básicos de linguagem padronizados para Controladores Lógicos Programáveis:

- Texto Estruturado (*Structured Text – ST*);
- Lista de instruções (*Instruction List – IL*);
- Diagrama *Ladder* (LD);
- Diagrama de Blocos Funcionais (*Function Block Diagram – FBD*);
- Sequenciamento Gráfico de Funções (*Sequential Function Chart – SCF*).

Dentre as várias linguagens utilizadas na programação de um CLP, a mais difundida é o Diagrama *Ladder* (DA SILVA, 2016).

2.3.1 Diagrama *Ladder* e blocos funcionais

A linguagem *Ladder* foi a primeira utilizada pelos fabricantes, e se consolidou devido à praticidade de programação, pois é uma linguagem gráfica semelhante aos diagramas de comandos elétricos, estando presente em grande parte dos CLPs.

Porém, ela ainda apresenta algumas limitações, por isso, é comum ser utilizado em conjunto outros tipos de linguagens, para processos mais complexos, como por exemplo, os blocos funcionais (DA SILVA, 2016). Cada bloco possui uma funcionalidade específica e pode ser configurado de acordo com a necessidade do projeto, tal como o bloco funcional PID (Proporcional, Integral e Derivativo), que realiza os cálculos para obter o sinal de controle apropriado.

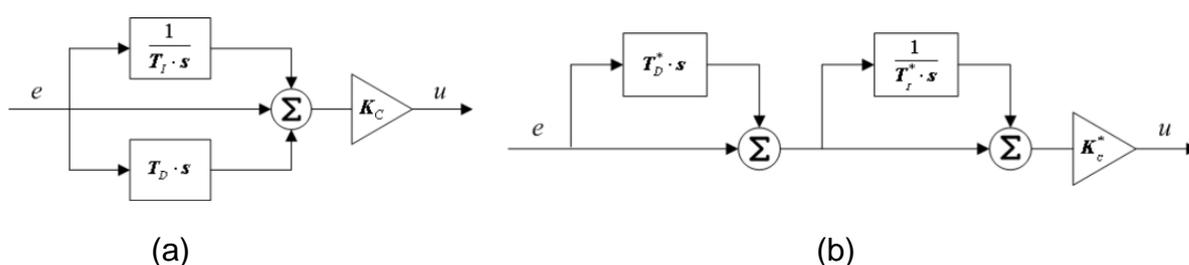
2.4 Controle PID

O controle PID é um dos métodos mais utilizados no âmbito de controle, é amplamente consolidado para manter variáveis como pressão, temperatura, velocidade, entre outras, o mais próximo possível do valor desejado, chamado de *setpoint* (FACCIN, 2004). Este método é baseado em três componentes principais, o Proporcional, o Integral e o Derivativo, onde cada componente tem uma função dentro do sistema.

O modo Proporcional gera um sinal de controle diretamente proporcional ao erro entre a variável do processo (PV) e o *setpoint* (SP), portanto, este modo é apenas um amplificador com um ganho constante, proporcionando uma correção rápida da variável manipulada (MV), porém, ele apresenta um erro em regime permanente. O modo Integral depende do histórico de erro do processo, ou seja, ele analisa os erros anteriores e realiza a correção proporcional à soma desses erros, isto permite corrigir o erro em regime permanente, que o modo proporcional não consegue suprir, porém reduz a estabilidade da malha de controle. O modo Derivativo considera a taxa de variação do erro, sendo a sua derivada no tempo, ou da variação da PV. Ele é utilizado para prever erros futuros com base na detecção das oscilações do sinal de erro, melhorando a estabilidade do sistema, este modo não pode ser utilizado sozinho, pois caso o erro seja constante, o sistema não conseguirá detectá-lo (OGATA, 2011).

O controle PID é formado da união entre os três modos, porém a forma como é feita a sua combinação pode variar, impactando também no desempenho do controle, podendo ser feito de forma paralela ou em série (FACCIN, 2004). Uma representação esquemática do diagrama de ligação do PID em paralelo e em série pode ser observada na Figura 5, respectivamente.

Figura 5 - Diagrama esquemático do PID: (a) paralelo; (b) série

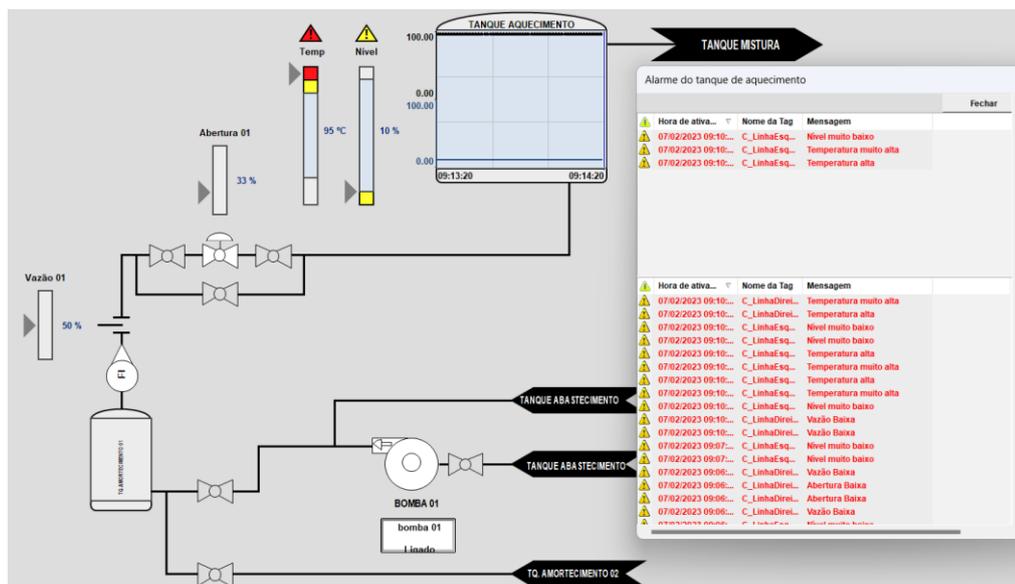


Fonte: Faccin (2004)

2.5 Sistemas supervisórios

Os sistemas supervisórios, conhecidos também como SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*), foram desenvolvidos com o intuito de proporcionar um maior controle sobre os processos industriais, buscando uma maior produtividade, qualidade e competitividade. Para tal, as informações do processo são coletadas por meio de aquisição de dados, manipuladas, analisadas e posteriormente armazenadas, para serem apresentadas ao usuário informações em tempo real sobre os eventos da planta considerados importantes. Estas informações podem ser disponibilizadas por meio de telas, gráficos, alarmes e relatórios, de forma amigável, através de Interfaces Homem-Máquina (IHM) (PINHEIRO, 2006). Como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - IHM de um tanque de aquecimento



Fonte: Autoria própria

Além do monitoramento, um sistema SCADA também possibilita ao usuário recursos de controle, permitindo que os operadores enviem comandos para ajustar parâmetros, definir pontos de referência ou iniciar/finalizar processos. Esses comandos são transmitidos aos dispositivos de campo por meio de CLPs ou outros dispositivos com funções de controle (SANTOS e MARINATO, 2021).

2.6 Servidores OPC

O OPC (*OLE for Process Control*) foi criado com base na tecnologia (*Object Linking and Embedding*) da *Microsoft*, atualmente chamado de (*Open Platform Communications*). O servidor OPC é um padrão de comunicação aberto amplamente utilizado nos setores de automação, pois garante uma interoperabilidade para troca de dados de forma segura e confiável entre dispositivos (OPC FOUNDATION, 2023).

Existem diferentes especificações para os servidores OPC, como o OPC DA (*Data Access*). Os clientes OPC DA determinam as variáveis que desejam ler, escrever ou monitorar no servidor, geralmente realizado por meio de um objeto *ServidorOPC*. É amplamente utilizado na indústria, para processos em que se deseja comunicar um CLP com IHMs, realizando a transferência de dados de forma padronizada, segura e eficiente (SILVA, 2019).

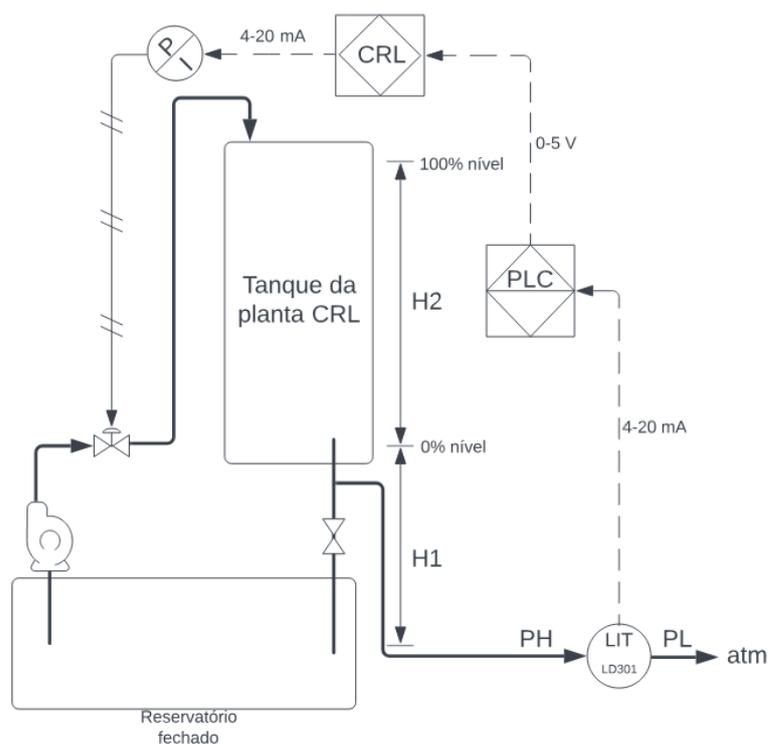
3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar as etapas necessárias para a execução do projeto, inicialmente é abordada sobre a parte de *Hardware* do sistema, detalhando como realizou-se a conexão entre o DemoKit – SMAR e o tanque da planta CRL, assim como a funcionalidade de cada equipamento, em seguida, são apresentados os *softwares* utilizados, tanto para a criação da lógica de controle, quanto para o supervisor.

3.1 Sistema de controle de nível utilizando o DemoKit – SMAR

Um diagrama de ligação entre a planta CRL e o DemoKit – SMAR é apresentado na Figura 7, onde pode-se identificar os componentes necessários para a implementação do controle. A leitura do nível do tanque da planta CRL é realizada por meio do transmissor inteligente de pressão LD301, conectado à parte inferior do tanque pelo lado de pressão alta (PH) do instrumento.

Figura 7 - Diagrama de ligação do LD301 com o tanque da planta CRL



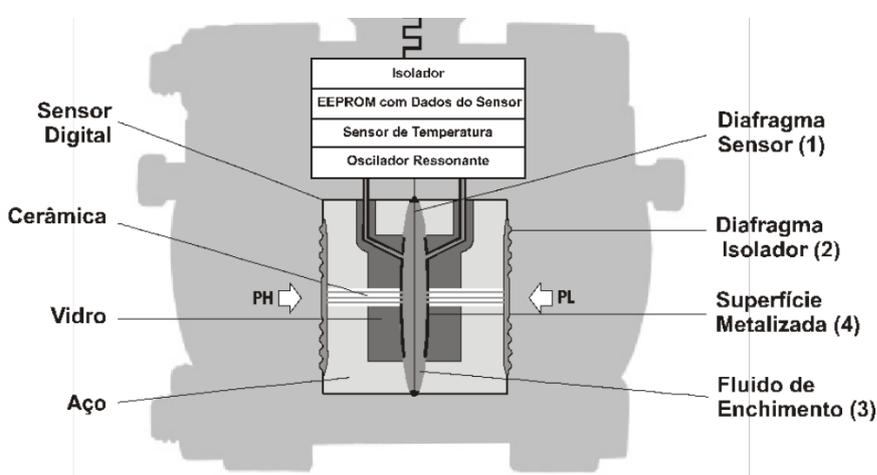
Fonte: Autoria própria

3.1.1 Uso do LD301 para medição de nível

O LD301 efetua a medição da pressão do tanque por pressão manométrica, no qual o lado de alta pressão do transmissor (PH) é conectado à base do tanque d'água, enquanto o lado de baixa pressão do transmissor (PL) fica aberto para a atmosfera. Desta forma, o diafragma do sensor é submetido à pressão diferencial entre os dois lados do sensor, a qual corresponde apenas à pressão da coluna d'água. Como o lado de alta pressão do LD301 está posicionado abaixo do nível inferior do tanque, ocorrerá a supressão de zero, ou seja, o transmissor indicará um valor superior ao nível real, para corrigir este problema, foi necessário compensar a coluna de água H1, conforme ilustrado na Figura 7. Portanto, o nível inferior do tanque será proporcional à pressão medida na altura H1, enquanto o nível superior, será correspondente à pressão medida na altura H2, somada com a altura de H1.

O transmissor de pressão diferencial LD301 é constituído por uma célula capacitiva composta por duas placas fixas (diafragmas isoladores), e uma placa móvel (diafragma sensor), a pressão em cada diafragma isolador é transferida por meio do fluido de enchimento para o diafragma sensor, ocasionando assim sua deflexão, conforme pode ser observado na Figura 8. Quando ocorre a deflexão do diafragma sensor, verifica-se uma variação entre a capacitância dos eletrodos fixos e móveis, esta variação é lida pelo oscilador ressonante, gerando assim sinal proporcional à pressão diferencial medida, equivalente à variação da capacitância detectada (SMAR, 2022).

Figura 8 - Visão geral da célula capacitiva do transmissor



Fonte: Manual de instruções SMAR – LD301

O nível do tanque é convertido em um sinal proporcional de corrente entre 4 a 20 mA, que será transmitido ao DF75, para o controle da planta CRL.

3.1.2 Configuração do LD301

Para executar as etapas de medição e controle do projeto, efetuou-se a configuração do LD301 para se adequar aos parâmetros já estabelecidos do tanque da planta CRL, evitando-se assim possíveis erros devido à parametrização inadequada. Para ajustar estas configurações, foi utilizado o configurador HART (Highway Addressable Remote Transducer) portátil MTL611, disponível no CEFET/MG, que tem como finalidade efetuar as configurações dos instrumentos de campo sem a necessidade de uma chave magnética, simplificando e agilizando este processo, além de permitir ao operador visualizar os dados recebidos pelo instrumento de medição.

O transmissor foi ajustado para trabalhar como rede ponto a ponto, alocando o endereço do equipamento na posição "0", de modo que a corrente de saída seja de 4 a 20 mA, onde o quatro corresponde a 0% da variável do processo sendo o valor inferior de pressão medido da planta CRL, e vinte, referente ao valor superior, correspondente a 100% da PV, também foi realizada a compensação de altura descrita na seção 3.1.1.

3.1.3 Demokit – SMAR

Esta planta consiste em um suporte de pedestal com um *backplane* acoplado e conectado a um trilho DIN, responsável por unir os demais módulos do DemoKit – SMAR, que será denominado como Demokit ao longo do trabalho. Dentre os módulos presentes na planta didática, foram utilizados no projeto o DF50, sendo a fonte responsável pela alimentação do *backplane*, o controlador lógico DF75, o módulo de entradas analógicas DF44 e o módulo de saídas analógicas DF46. Com relação aos instrumentos de medição, foi utilizado um transmissor de pressão diferencial LD301 semelhante ao já instalado no DemoKit, que está presente no Laboratório de Automação. Esta substituição dos transmissores teve por finalidade facilitar a conexão entre o LD301 e a planta CRL.

3.1.4 Controlador DF75

O DF75 é um controlador lógico HSE (*High Speed Ethernet*) responsável por realizar o controle e supervisão dos processos da planta CRL através dos cartões de Entradas/Saídas (E/S) como os módulos DF44 e DF46, por meio da lógica *ladder* e dos blocos funcionais programados no LogicView. O controlador, assim como seus módulos de E/S podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - Módulos do DemoKit

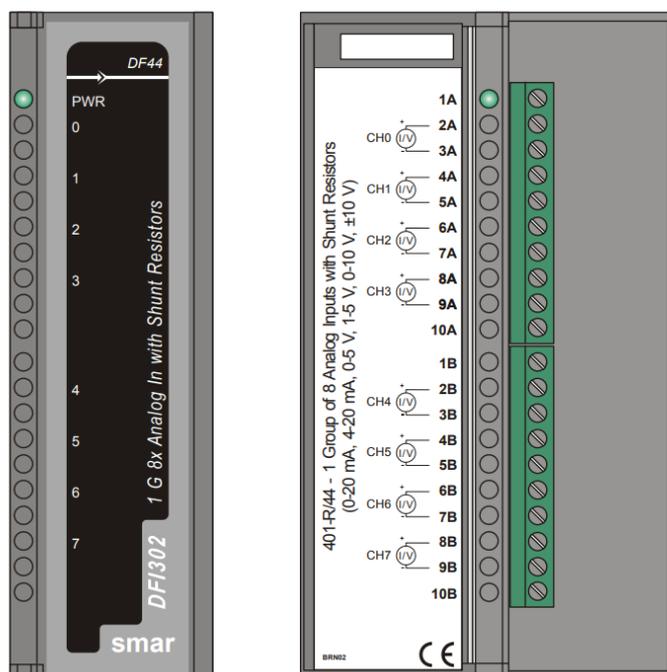


Fonte: Autoria própria

3.1.5 Módulo DF44

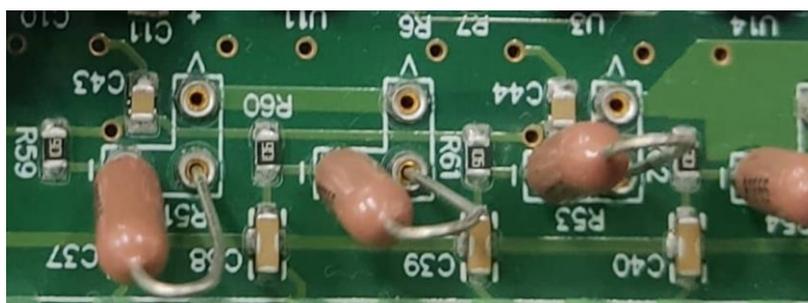
O DF44 é um módulo de entradas analógicas do DF75, que possui um grupo de oito entradas de tensão ou corrente, com resistores *shunt* internos que podem ser individualmente configurados. Um desenho ilustrativo do módulo pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Módulo DF44



Fonte: Manual de instruções SMAR – Módulos E/S

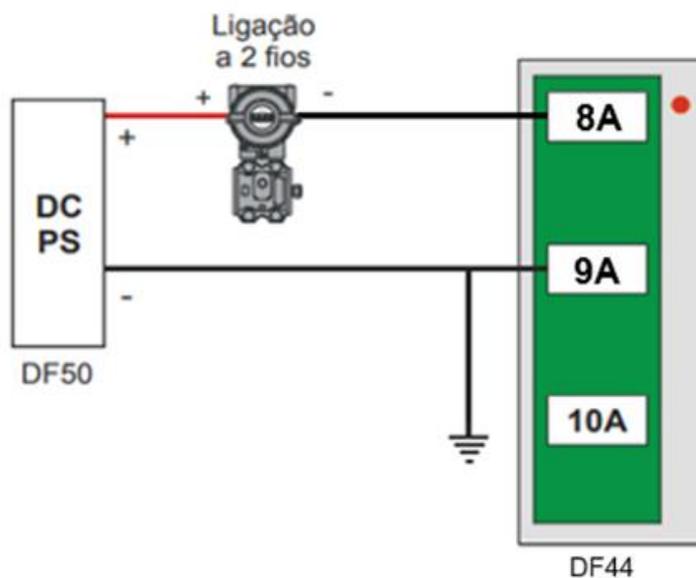
Para a execução deste projeto o DF44 foi ajustado para ler de 4 a 20 mA. Esta configuração foi feita alterando a posição do resistor *shunt* interno para a posição “1”, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Resistor *shunt* interno do DF44

Fonte: Autoria própria

Na Figura 12 pode ser visto um diagrama da ligação entre o transmissor LD301 e o módulo DF44.

Figura 12 - Ligação do módulo DF44 com o LD301

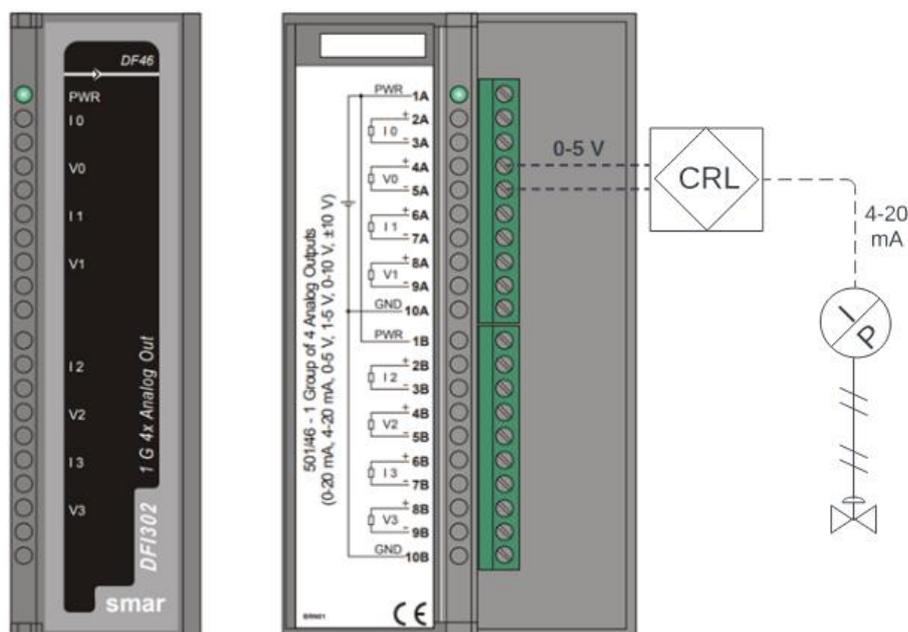


Fonte: Manual de instruções SMAR – Módulos E/S (Adaptado pelo autor)

3.1.6 Módulo DF46

O DF46 é um módulo de saídas analógicas do DF75 que possui um grupo de quatro saídas, no qual cada par possui uma saída de corrente e uma de tensão, quando uma saída é acionada, seu par equivalente é acionado ao mesmo tempo. Uma representação do módulo pode ser visualizada na Figura 13.

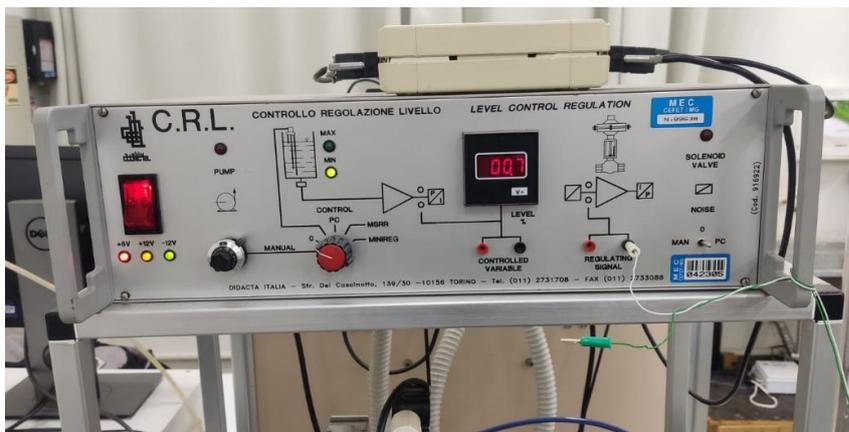
Figura 13 - Módulo DF46



Fonte: Manual de instruções SMAR – Módulos E/S (Adaptado pelo autor)

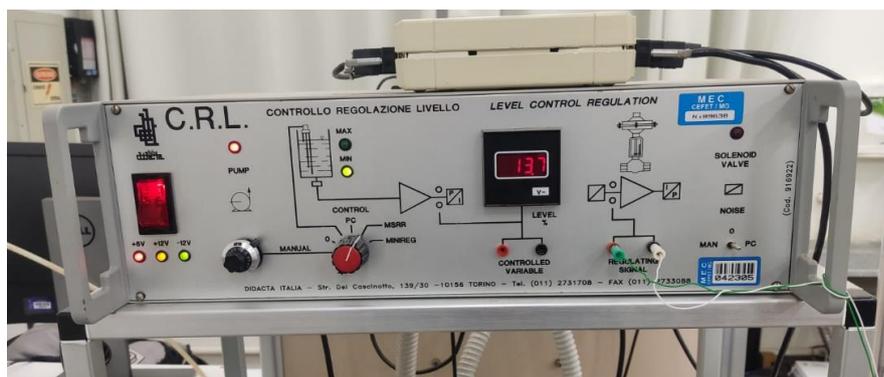
Para este projeto, foi utilizado a saída de tensão de 0 a 5 V do DF46, pois o circuito eletrônico de condicionamento de sinais da planta CRL necessita de um sinal de 0 a 5 V para controle da válvula pneumática, onde 0 V corresponde à válvula totalmente fechada e 5 V corresponde à válvula totalmente aberta. Ao realizar a conexão do DF46 ao circuito eletrônico da planta CRL, foi necessário tomar alguns cuidados. Inicialmente o botão de seleção de tipo de controle do CRL foi colocado na posição “0”, em seguida foi conectado o canal 5A do módulo DF46 à entrada de sinal de comando da planta CRL, logo após, o botão de seleção de controle foi alterado para “MSRR” e, somente depois, o canal 4A do módulo DF46 foi conectado. Esta precaução se deu, pois, ao mudar o controle da posição “0” para “MSRR”, referente ao controlador eletrônico externo opcional, é passado pela posição “CONTROL PC”, onde é emitido um sinal de tensão que poderia passar para o CLP. O procedimento pode ser visualizado na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Procedimento de segurança para conexão do DF46 à planta CRL



Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Conexão completa do DF46 à planta CRL



Fonte: Autoria própria

3.2 Controle e supervisão da planta CRL

O *software* utilizado para a confecção do controle da planta CRL é o System302, um ambiente integrado que inclui uma ampla variedade de *softwares*, empregados nos diversos sistemas de controle de processos, atuando de forma independente, por exemplo o Syscon, LogicView, entre outros (SMAR, 2022). O Syscon é o *software* responsável por realizar a configuração e monitoramento dos equipamentos da SMAR, no qual a comunicação é feita por meio dos controladores, como o DF75. O LogicView, integrado ao Syscon, é utilizado para a criação de lógicas de controle em linguagem *ladder*, seguindo a norma IEC61131-3, e permite a inclusão de blocos

funcionais, os quais contém funções específicas de controle, tais como o PID (SMAR, 2022).

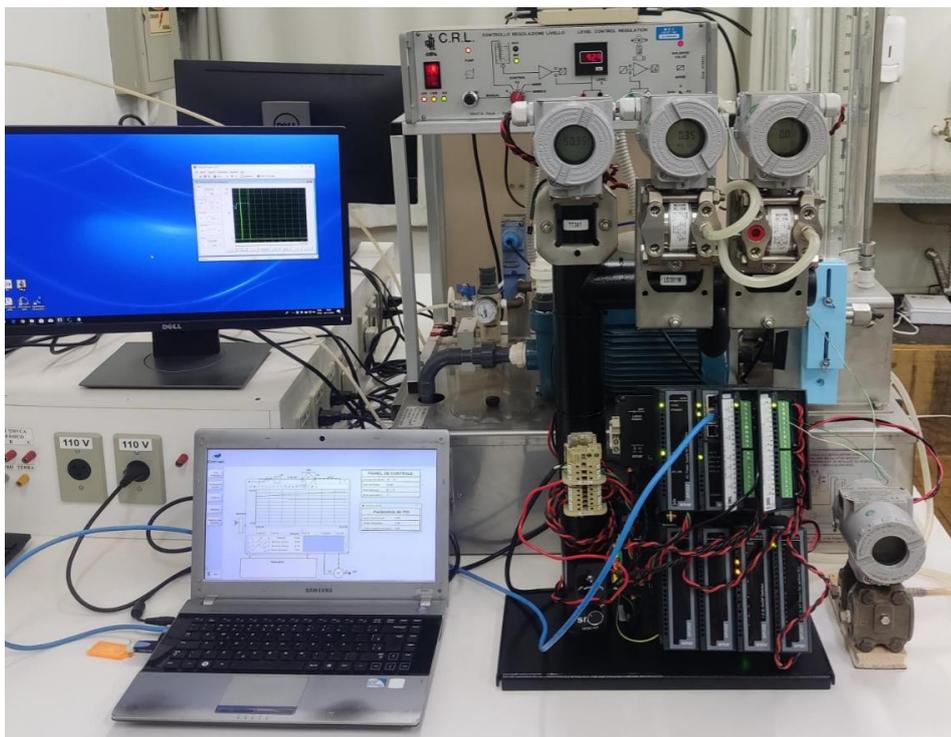
Para usufruir de todas as funcionalidades que o System302 oferece ao usuário, é utilizada, juntamente com a planta DemoKit, a HardKey do *software* para o sistema operacional Windows 7. Devido a esta limitação da licença, o ex-aluno do curso de Automação Industrial José Maria de Melo, disponibilizou um computador com sistema operacional Windows 7, o qual foi empregado para a confecção do controle e supervisor do projeto.

Para complementar o supervisor da planta, foi utilizado juntamente com os *softwares* de controle, o Indusoft Web Studio, da empresa AVEVA Group Limited, com uma licença educacional disponibilizada gratuitamente em seu respectivo site. A escolha deste *software* se deu devido à sua Interoperabilidade e mobilidade, permitindo ao operador da planta monitorar e controlar os processos por meio do computador, sem a necessidade do contato direto com os equipamentos, além de possuir uma interface amigável e intuitiva para o usuário. Esta interface é encarregada de receber os dados passados pelo usuário e, por meio de um servidor OPC DA, enviá-los ao controlador.

3.2.1 Comunicação física e configuração de rede dos equipamentos

Para realizar a comunicação física entre o computador e a planta Demokit, foi utilizado um cabo de rede *High-Speed Ethernet Crossover*, incumbido de efetuar a transmissão de dados entre os equipamentos. Além disso, a HardKey do System302 foi conectada à porta USB (*Universal Serial Bus*) do computador, como é possível observar na Figura 16.

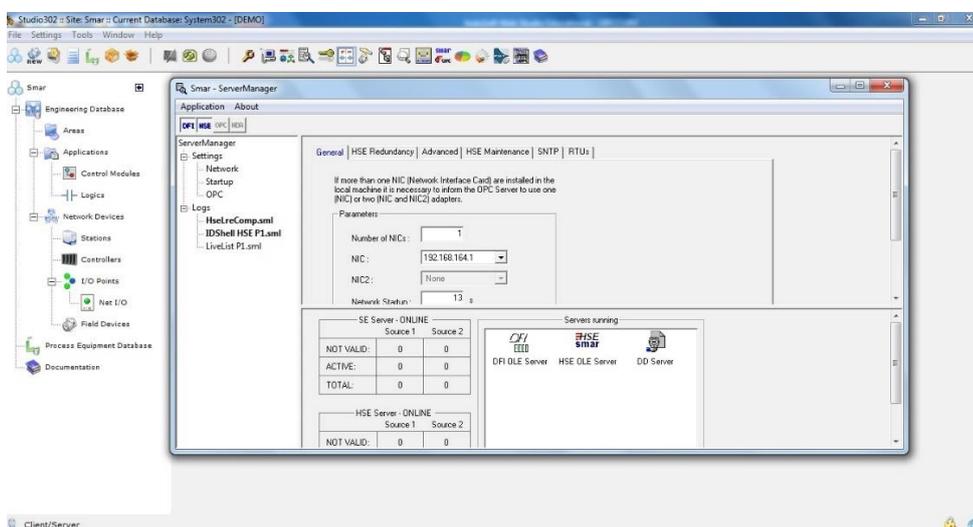
Figura 16 – Conexão física dos equipamentos



Fonte: Autoria própria

Após finalizar a conexão física entre o CLP e a planta DemoKit, foi realizada a configuração de rede dos equipamentos. Inicialmente, foi definido o Protocolo de Rede (*Internet Protocol – IP*) do CLP por meio do System302, como constatado na Figura 17.

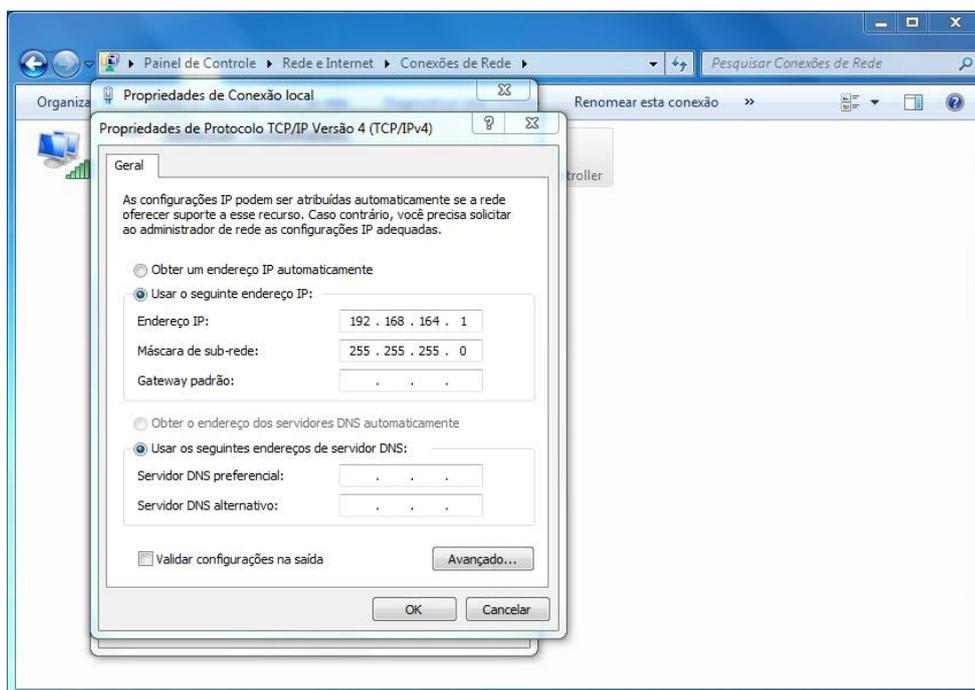
Figura 17 - Configuração do endereço IP do CLP no System302



Fonte: Autoria própria

Conseqüentemente, foi realizada a configuração do endereço IP do computador, salientando-se que este endereço deve estar na mesma sub-rede do CLP, como demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Endereço IP do computador

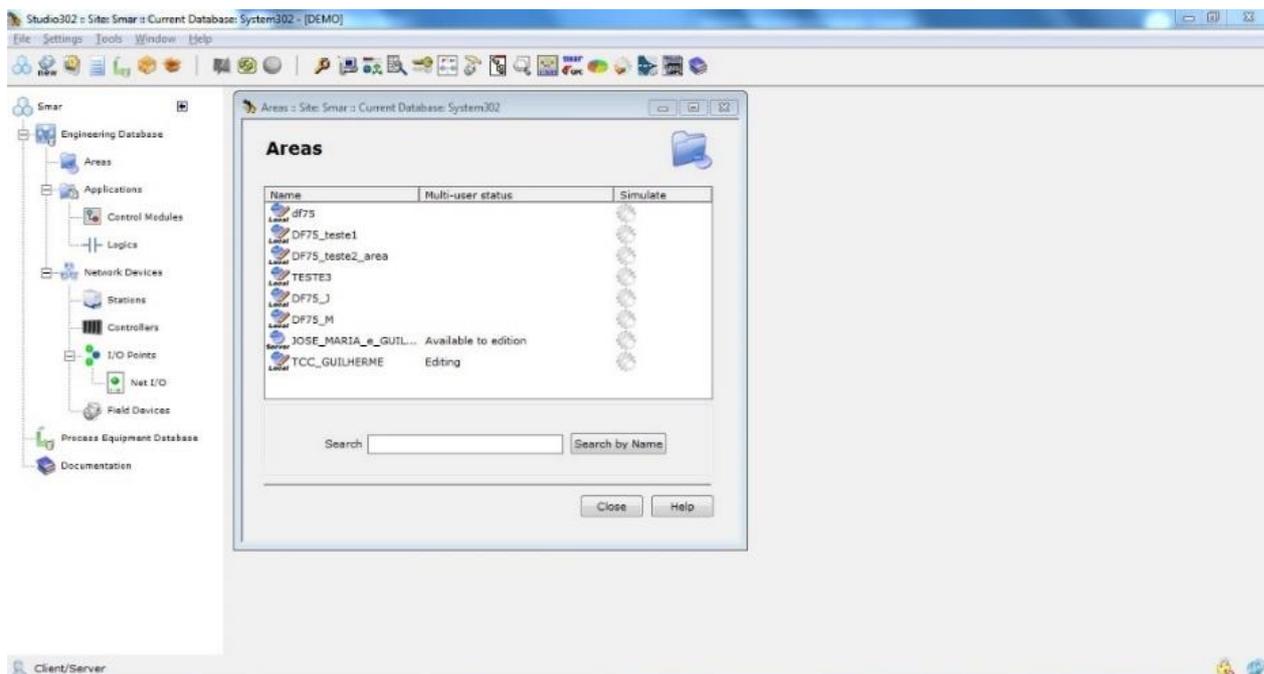


Fonte: Autoria própria

3.2.2 Syscon

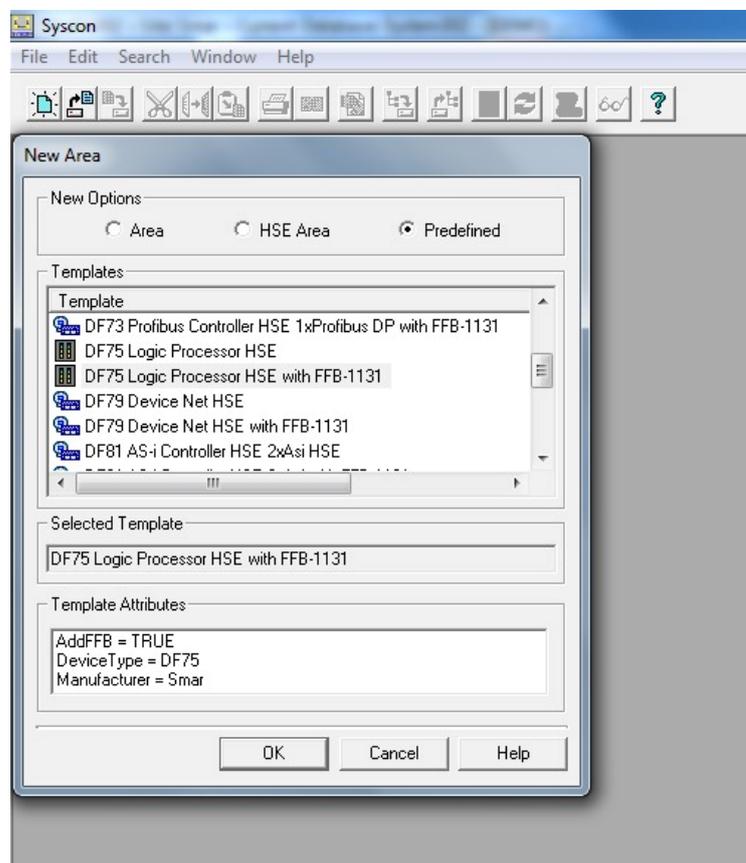
Após efetuar a configuração de rede dos equipamentos, deu-se início à etapa de ajuste dos softwares de controle. Inicialmente, procedeu-se à abertura do System302 e à criação de uma nova área, conforme ilustrado na Figura 19, ao criar essa nova área, ocorreu um redirecionamento automático para o Syscon, onde foi configurado o novo projeto, conforme exemplificado na Figura 20.

Figura 19 - Criação de áreas no System302



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Criação do novo projeto no Syscon

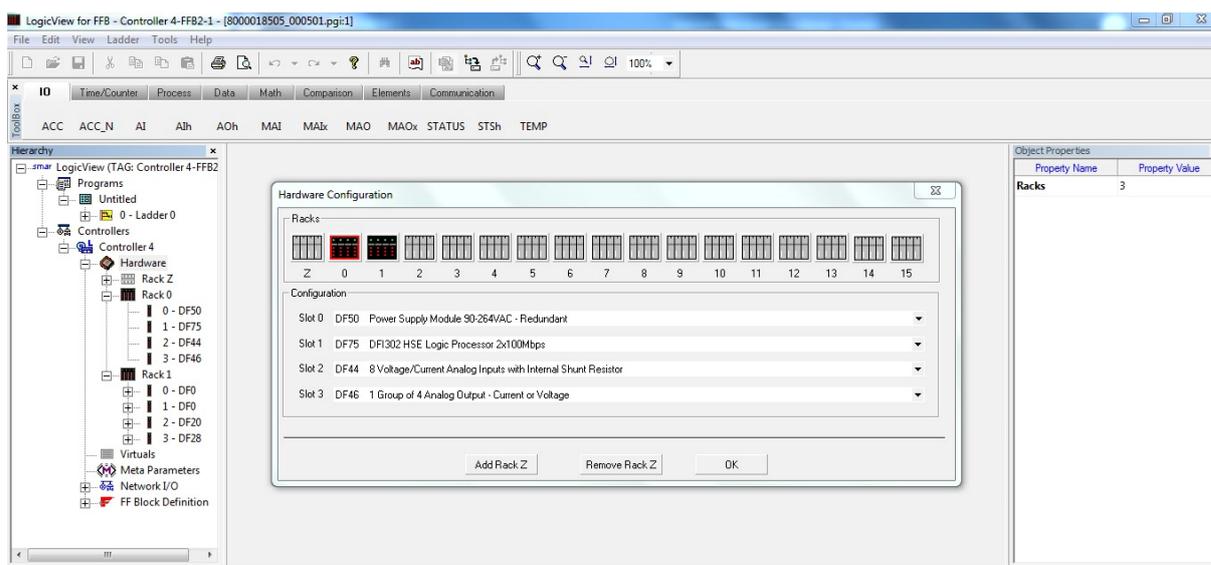


Fonte: Autoria própria

3.2.3 LogicView

Após a criação da nova área no Syscon, foi acessada a lógica ladder deste projeto por meio do System302 na aba “Logics”, conforme evidenciado na Figura 19. Inicialmente foi realizada a configuração dos módulos e *Racks* que estão conectados ao *Backplane* da planta Demokit. Este procedimento foi feito acessando a aba “Hardware” na lateral esquerda do LogicView com o botão direito e selecionando a opção “Hardware Configuration”, como visualizado na Figura 21. O *Rack 0* corresponde à parte superior da planta Demokit, enquanto o *Rack 1* à parte inferior, cada *Rack* possui quatro módulos alocados em seus *slots*, partindo do *slot* zero até o *slot* três.

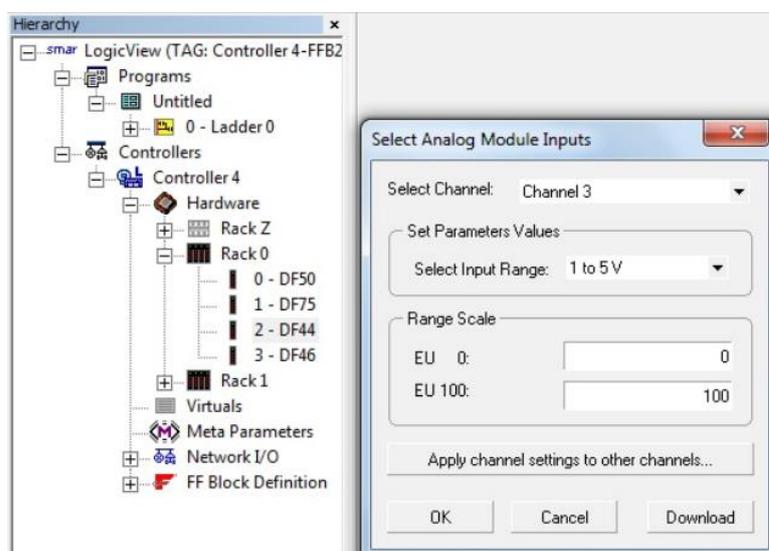
Figura 21 – Configuração dos módulos e Racks no LogicView



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foram configurados os parâmetros dos módulos DF44 e DF46, respectivamente. O DF44 recebe um sinal de corrente de 4 a 20 mA do LD301 e converte este sinal para uma tensão de 1 a 5V para o DF75, após, foi ajustada a escala de intervalo destes valores e, para finalizar esta configuração, foi selecionado o canal que irá receber estes dados do transmissor de pressão. Na Figura 22 é possível visualizar todos os parâmetros determinados.

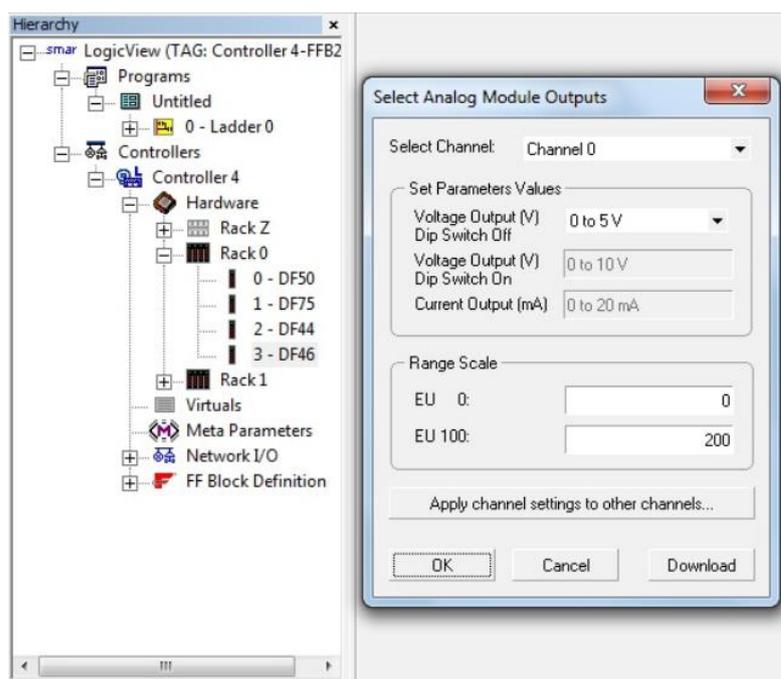
Figura 22 - Parâmetros de configuração do DF44



Fonte: Autoria própria

Os mesmos procedimentos foram realizados para o DF46. Estabelecendo um sinal de tensão de saída de 0 a 5 V, responsável pelo controle da válvula pneumática, como citado na seção 3.1.6, e os demais parâmetros determinados são demonstrados na Figura 23.

Figura 23 - Parâmetros de configuração do DF46



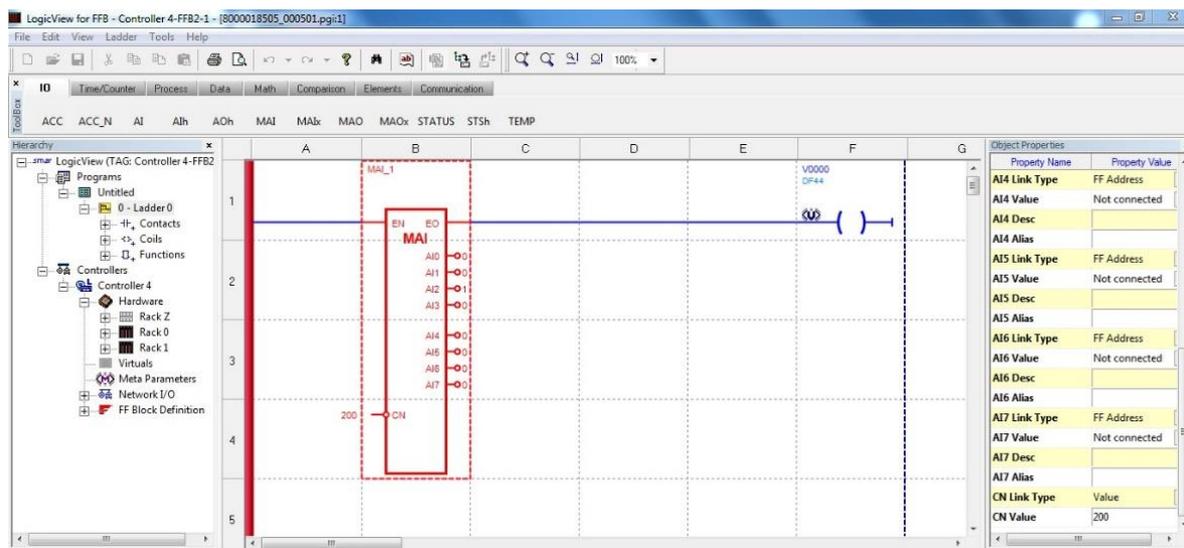
Fonte: Autoria própria

Após a conclusão de todos os parâmetros dos módulos de entradas e saídas, efetuou-se a criação da lógica *ladder*, seguindo o manual de instrução do LogicView para realizar as configurações de todos os blocos descritos nesta seção.

A princípio, foi inserido o bloco funcional de múltiplas entradas analógicas (MAI) em série com uma bobina virtual. Esta bobina foi utilizada somente para finalizar a linha da lógica, tornando a entrada (EN) e a saída (EO) do bloco como verdadeiras, possibilitando ao bloco executar sua função. O bloco MAI pode ser observado na Figura 24, coluna B e a bobina virtual na coluna F.

Este bloco tem como função ler os valores do módulo de entradas analógicas, que está acoplado ao *BackPlane* e atribuir estes dados à sua respectiva saída. Esta identificação é feita de acordo com o endereço definido pelo canal (CN). A regra para o preenchimento do canal CN são os dois primeiros números correspondente ao Rack no qual o módulo está conectado, o terceiro referente ao slot, e os dois últimos são zeros, portanto, como o módulo DF44 está acoplado ao *BackPlane* no *Rack 0, slot 2*, o valor de CN definido para o bloco MAI receber os valores deste módulo correspondem a 00200, as demais propriedades do bloco não foram alteradas. Como o transmissor de pressão está conectado na entrada (CH3) do módulo DF44, a saída (AI3) é a sua equivalente no bloco funcional.

Figura 24 - Bloco Funcional MAI



Fonte: Autoria própria

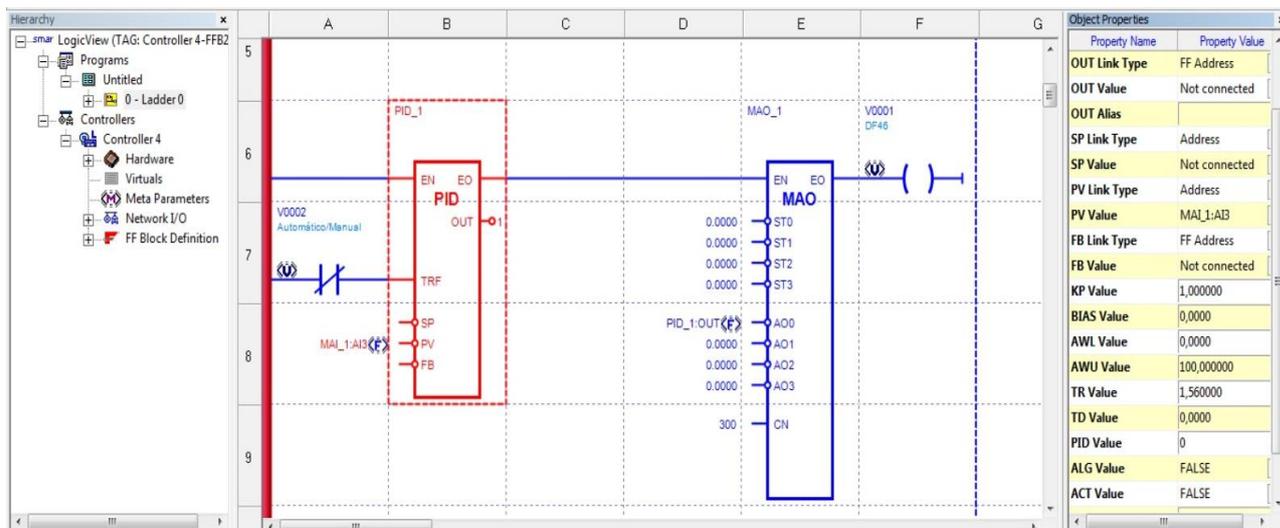
Em seguida, incorporou-se à lógica *ladder* o bloco PID em série com o bloco de múltiplas saídas analógicas (MAO), finalizando o circuito com uma bobina virtual, com a mesma finalidade da bobina mencionada anteriormente. Por fim, foi adicionado um contato virtual normalmente fechado na entrada TRF, responsável por definir o estado do bloco PID. Quando o contato está fechado, a entrada TRF recebe um valor verdadeiro, fazendo o bloco PID atuar de forma manual, ao abrir o contato, a entrada TRF recebe um sinal falso, mudando para controle automático. Esta parte do circuito pode ser observada na Figura 25.

Primeiramente foram configurados os parâmetros internos do bloco PID. O *PERC Value* encarregado de moldar o formato das entradas e saídas do bloco, foi configurado como falso para expressar os valores em porcentagem (0-100%). A fim de selecionar o tipo de algoritmo do PID como paralelo, o *ALG Value* foi configurado como falso. Dado que o sistema atua de forma direta, ou seja, a saída aumenta com o aumento da PV, o parâmetro *ACT Value* recebeu valor falso. Determinando o *TRS Value* para um, ao mudar o bloco PID de manual para automático, os cálculos iniciais são realizados partindo do último valor definido em manual, evitando assim um salto na saída deste bloco. Os parâmetros *AWL Value* e *AWU Value* são responsáveis por parar a contribuição do modo integral automaticamente quando o sinal de saída atinge os limites mínimos ou máximos, que foram designados respectivamente como 0% e 100%, evitando possíveis *overshoots*.

A entrada SP corresponde ao *setpoint* do controlador PID. O PV é referente à variável do processo, portanto, foi atribuído ao seu valor, o endereço MAI_1:AI3, que é a saída AI3 do bloco MAI. O KP corresponde ao ganho proporcional, o TR ao tempo integral e o TD equivale ao tempo derivativo. Quando este bloco está em modo automático, realiza os cálculos de controle PID e apresenta este valor da saída OUT, ao realizar a passagem de automático para manual, o valor lido pela saída OUT do PID será correspondente ao indicado na entrada FB.

Para a configuração do bloco MAO, as únicas alterações foram na entrada (AO0), atribuindo o valor do endereço PID_1:OUT, sendo esta entrada equivalente à saída (V0) do módulo DF46. A configuração do valor de CN do bloco MAO se deu da mesma forma do bloco MAI, sendo que a posição do bloco MAO no *BackPlane* se dá no *Rack 0, slot 3*.

Figura 25 - Bloco PID em série com o bloco funcional MAO



Fonte: Autoria própria

3.2.4 Indusoft

Para a implementação da IHM, inicialmente foram criadas as *tags* do processo e declarado o seu tipo, sendo real, inteira ou booleana. As *tags* são identificadores associados a variáveis ou objetos que armazenam os dados do processo que está sendo monitorado, possuem finalidade de coletar, armazenar e exibir as informações em tempo real, cada *tag* está associada a uma informação específica, como nível, *setpoint*, entre outros. Na Figura 26 é possível visualizar as *tags* criadas para a implementação deste projeto.

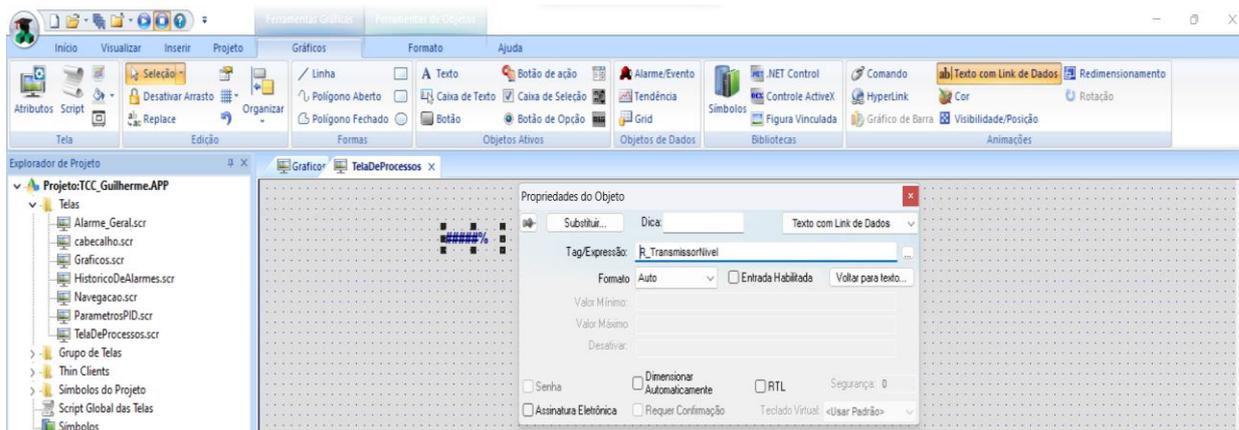
Figura 26 - Lista de Tags do projeto

Nome	Vetor	Tipo	Descrição	Escopo
1	0	Real		Servidor
2	0	Inteira		Servidor
3	0	Booleana		Servidor
4	0	Inteira		Servidor
5	0	Real		Servidor
6	0	Real		Servidor
7	0	Real		Servidor
8	0	Inteira		Servidor
*		Inteira		Servidor
*		Inteira		Servidor
*		Inteira		Servidor
*		Inteira		Servidor
*		Inteira		Servidor

Fonte: Autoria própria

A criação das telas se deu por meio das formas, objetos ativos e animações, enquanto o armazenamento dessas informações é feito pelas *tags* vinculadas a eles, na Figura 27 é apresentado um exemplo de como é feita a vinculação das *tags* aos objetos.

Figura 27 - Atribuição da *tag* de nível ao seu respectivo objeto

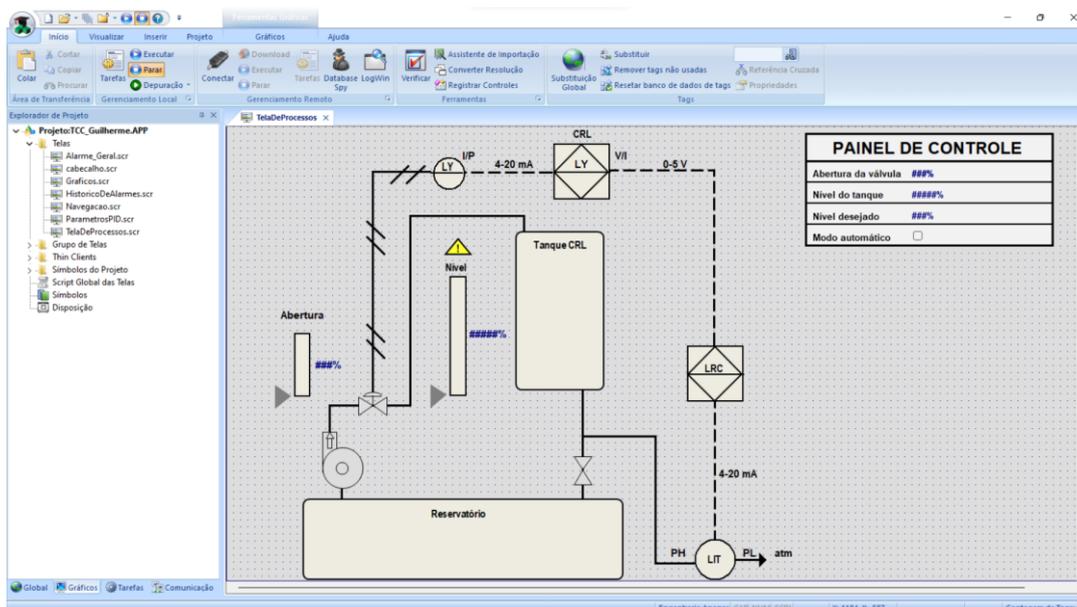


Fonte: Autoria própria

A tela de processos da IHM observada na Figura 28, contém o diagrama de ligação do LD301 com o tanque da planta CRL e sua respectiva válvula pneumática, um objeto de alarme e um painel de controle que permite ao usuário monitorar e administrar os processos.

O painel de controle permite a seleção de modo automático ou manual. Em modo manual, o usuário pode controlar diretamente a abertura da válvula da planta CRL e o sistema PID não atua nesta configuração. No modo automático, o operador somente pode definir o *setpoint* do processo, enquanto a abertura da válvula é controlada pelo bloco funcional PID descrito na seção 3.2.3, com base no nível atual do tanque lido pelo transmissor de pressão e o *setpoint* definido.

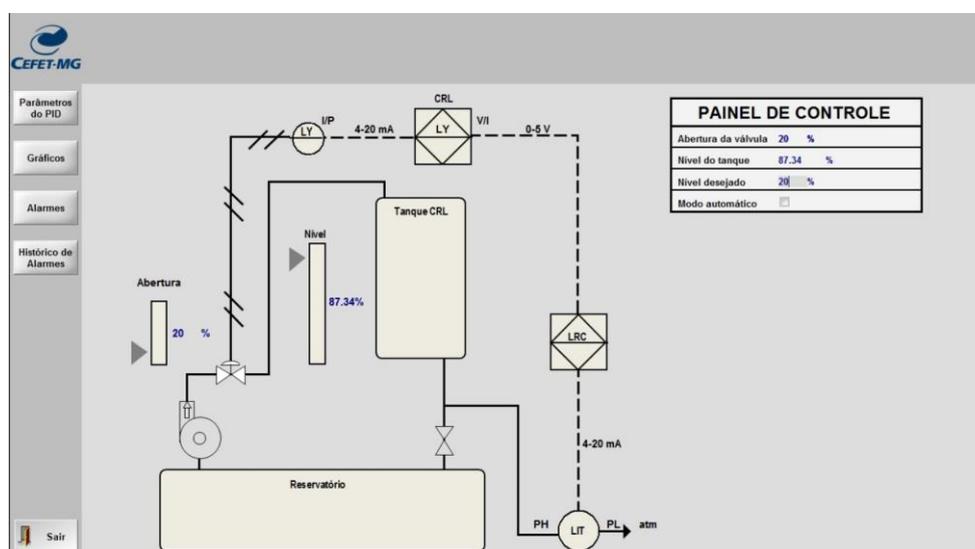
Figura 28 - Tela do processo



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foi criada uma tela de cabeçalho contendo a logo do CEFET, visualizada na parte superior da Figura 29, e uma tela de navegação, com botões que permitem ao usuário acessar telas secundárias em formato de *pop-up*, como parâmetros do PID, gráficos, alarmes, ou finalizar a execução do programa, localizada à esquerda da Figura 29. Este grupo de telas foram configuradas para abrir simultaneamente ao inicializar o programa.

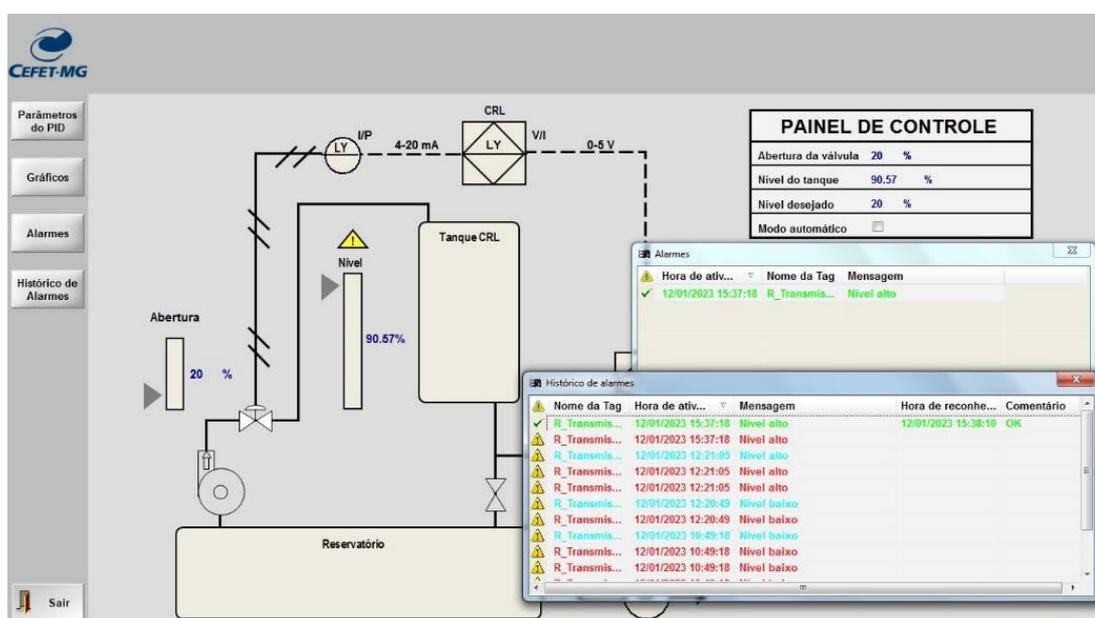
Figura 29 – Grupo de telas iniciais



Fonte: Autoria própria

Note que na Figura 29, o objeto de alarme está invisível para o usuário, devido a uma condição ajustada para que só se torne visível quando o nível apresentar uma leitura inferior a 10%, ou superior a 90%. Quando o alarme for ativado, é possível que o operador clique em cima do objeto para abrir a tela de alarmes, na qual contém a hora que o alarme foi ativado, assim como a mensagem de aviso e a *tag* à qual o objeto está vinculado, o operador também possui a opção de adicionar um comentário no alarme. Caso o alarme seja ativado e o nível do tanque volte para a sua condição normal de operação, o objeto de alarme ficará invisível novamente, porém é possível visualizar o histórico de alarmes através da tela de navegação, conforme se nota na Figura 30.

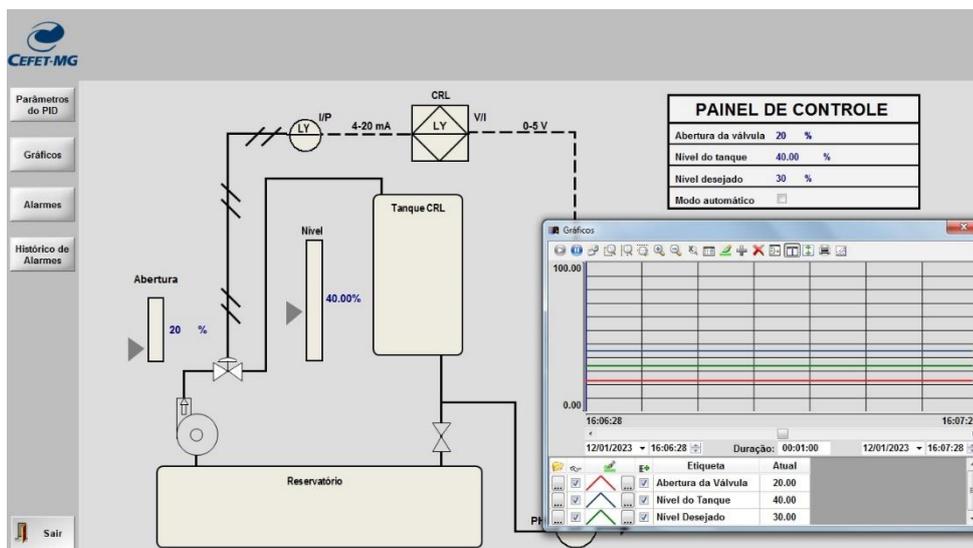
Figura 30 - Tela principal com ativação do alarme



Fonte: Autoria própria

Em seguida foi criado um gráfico de tendências para mostrar como os indicadores de nível, *setpoint* e abertura da válvula se comportam ao longo do tempo, como se pode perceber na Figura 31, este gráfico também armazena os dados que estão sendo lidos, podendo acessar estas informações posteriormente.

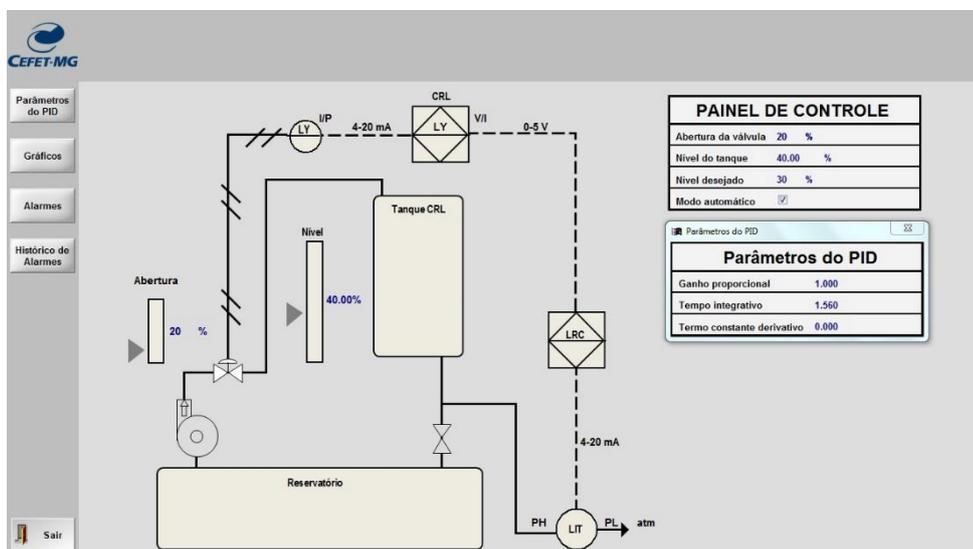
Figura 31 - Gráfico de tendências



Fonte: Autoria própria

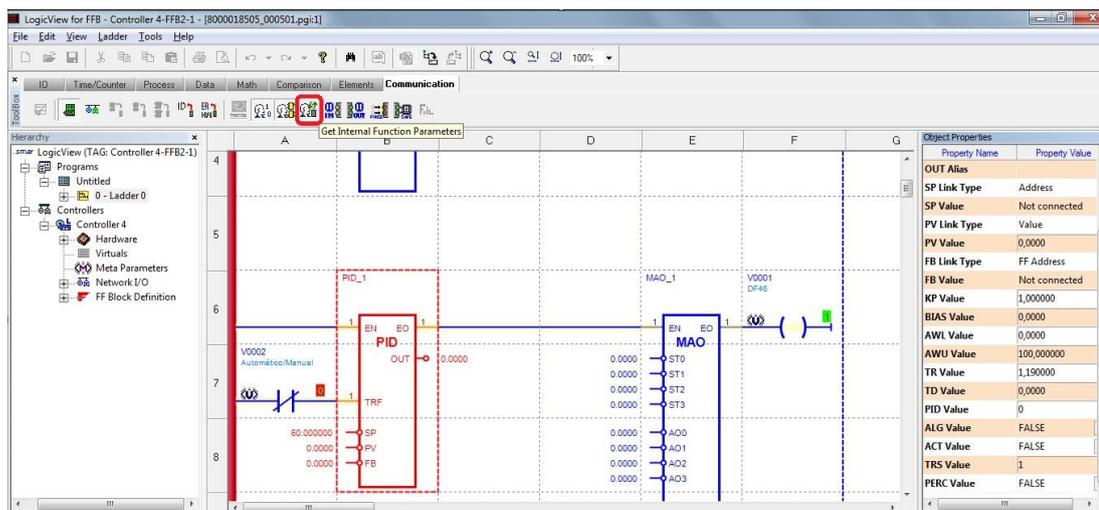
Subsequentemente, foi criada a tela dos parâmetros do PID, conforme ilustrado na Figura 32, a qual possibilita ao usuário alterar os valores do ganho proporcional (KP), tempo integrativo (TR) e termo constante derivativo (TD), porém, diferentemente dos outros dados citados anteriormente, que ao ser alterado na IHM, alteram imediatamente no circuito *ladder* do LogicView, os parâmetros do PID necessitam que faça um *upload* dos parâmetros internos das funções, para que os valores sejam atualizados no circuito lógico, tal como retratado em destaque na Figura 33.

Figura 32 – Tela de parâmetros do PID



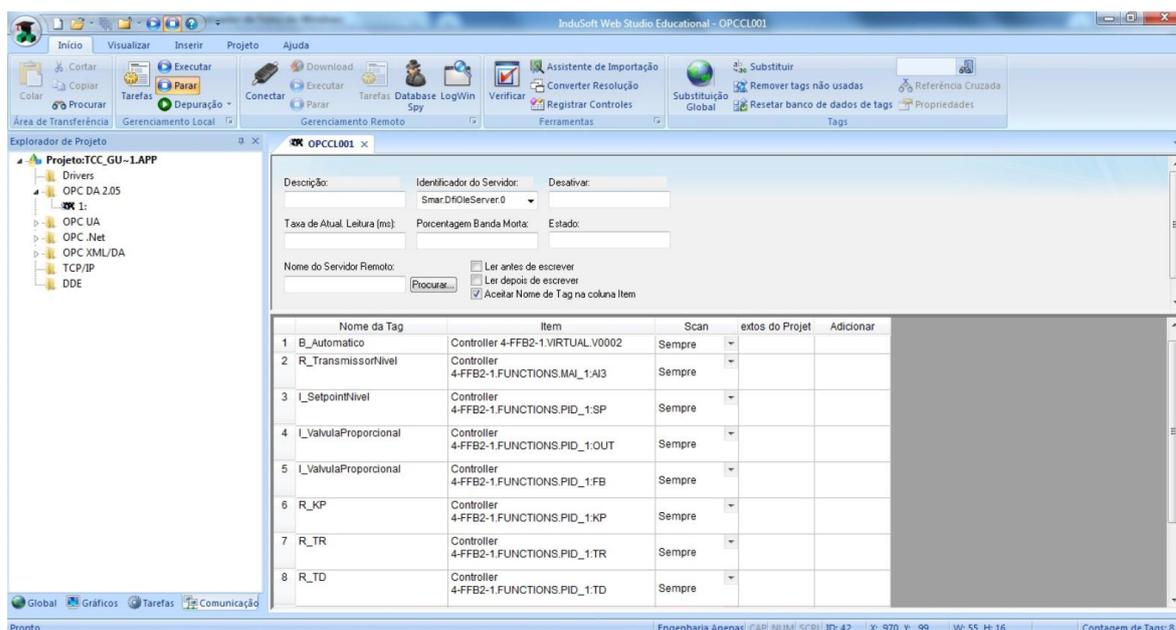
Fonte: Autoria própria

Figura 33 - Atualização dos parâmetros internos das funções



Fonte: Autoria própria

Para realizar a comunicação entre o Indusoft e o LogicView, a fim de facilitar as alterações dos parâmetros e visualização dos processos, foi criada uma nova conexão OPC DA e identificado dentro da lista de servidores, qual corresponde ao do LogicView, após este procedimento, foram vinculadas as *tags* de ambos os *softwares*, como evidenciado na Figura 34.

Figura 34 - Planilha de *tags* do servidor OPC DA

Fonte: Autoria própria

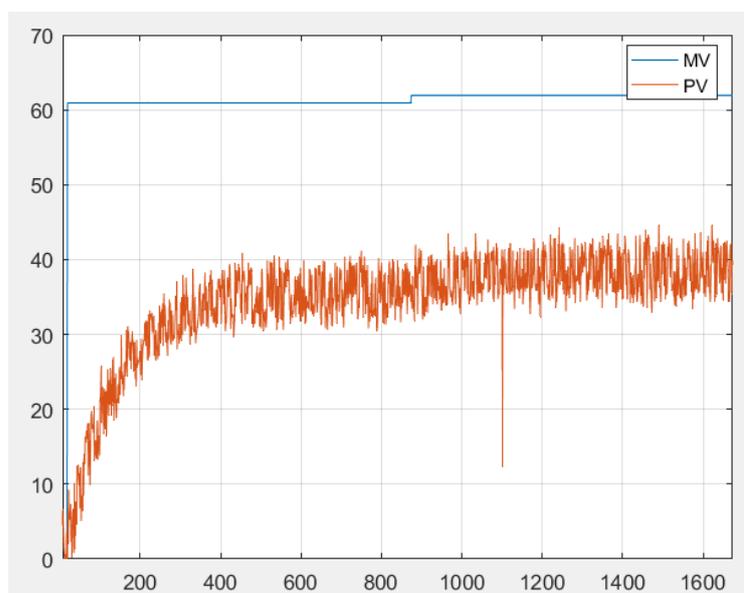
3.3 Modelagem do sistema

Para realizar o modelamento do sistema do projeto foi utilizada a planta CRL para coleta dos dados e, posteriormente foi criado um código no Octave¹ para realizar o tratamento e análise das informações. No primeiro teste, foi feito o ajuste da planta para operar em malha aberta, com a abertura da válvula (MV) em 61%. Foi observado que o sistema entrava em equilíbrio com 35% da PV, que equivale ao nível do tanque. Em seguida, aumentou-se a abertura da válvula para 62% e notou-se que o sistema quase não apresentou alterações no valor da PV, conforme ilustrado na Figura 35.

Após alguns estudos e análises, chegou-se à conclusão que o motivo da PV praticamente não sofrer alteração deve-se a um efeito que ocorre na válvula pneumática denominado agarramento, conforme elucidado na seção 2.2.

Devido a esse efeito, conduziu-se um segundo teste em malha aberta, ajustando a MV para 63%, onde alcançou o equilíbrio em 48% da PV. Em seguida, foi aplicado um degrau de 2% na MV, elevando a abertura para 65%, enquanto a PV estabilizou-se em 66%, como demonstrado na Figura 36.

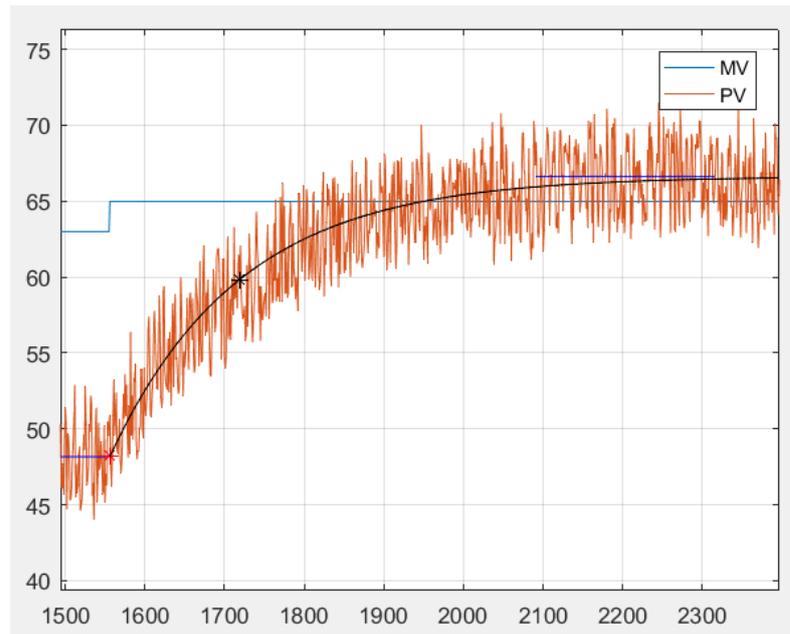
Figura 35 - Teste inicial em malha aberta



Fonte: Autoria própria

¹ O Octave é um software de código aberto que proporciona uma linguagem de programação orientada para a matemática, juntamente com uma ampla variedade de ferramentas integradas de plotagem e visualização.

Figura 36 - Segundo teste de malha aberta



Fonte: Autoria própria

Para determinar a função de transferência do sistema, foram utilizados os dados referentes à elevação do nível do tanque ao longo do tempo, em função do deslocamento da válvula de 63% para 65%. Levando em conta que o sistema deste processo é de primeira ordem, segundo Nise (2011), temos que:

$$G_p = \frac{A}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Onde:

- G_p – Função de transferência da planta;
- A – Variação da PV pela MV;
- τ – Constante de tempo;
- s – Variável complexa da frequência.

Com o auxílio do Octave para execução dos cálculos, a função de transferência da planta é representada na Equação 5.

$$G_p = \frac{9.235}{163s + 1} \quad (5)$$

3.3.1 Ganhos do controlador PI

Para calcular os ganhos do controlador PI do sistema, em algoritmo paralelo, temos que:

$$G_c = K_p + \frac{1}{T_R s} \quad (6)$$

Onde G_c corresponde à função de transferência do controlador PI, desta forma:

$$G_c = \frac{K_p s + \frac{1}{T_R}}{s} \quad (7)$$

Sabendo que a função em malha aberta (G_{ma}) de um sistema é o produto da função de transferência da planta pelo ganho do controlador, temos que:

$$G_{ma} = G_p * G_c = \frac{A}{\tau s + 1} * \frac{K_p s + \frac{1}{T_R}}{s} \quad (8)$$

A Equação 9 permite calcular a função de transferência do sistema em malha fechada:

$$G_{mf} = \frac{G_{ma}}{1 + G_{ma}} \quad (9)$$

Portanto, tem-se:

$$G_{mf} = \frac{AK_p s + \frac{A}{T_R}}{\tau s^2 + s + AK_p s + \frac{A}{T_R}} \quad (10)$$

Dividindo o numerador e denominador por τ , chegamos à seguinte equação:

$$G_{mf} = \frac{\frac{AK_p s}{\tau} + \frac{A}{\tau T_R}}{s^2 + \frac{(1 + AK_p)s}{\tau} + \frac{A}{\tau T_R}} \quad (11)$$

De acordo com Nise (2011), a equação geral de uma função de transferência de segunda ordem apresenta a forma:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

Onde:

- ω_n – Frequência natural;
- ζ – Fator de amortecimento;

Considerando o sistema criticamente amortecido, com as seguintes especificações:

- $\zeta = 1$;
- $T_a = \tau$;

Onde T_a representa o tempo de acomodação do sistema e, sabendo que, para o sistema acomodar dentro de uma faixa de valores de 2%, temos:

$$T_a = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (13)$$

Visto que o coeficiente de amortecimento $\delta = \zeta\omega_n$, então, substituindo na equação 13:

$$\tau = \frac{4}{\delta} \quad (14)$$

Isolando o δ na equação, obtemos:

$$\delta = \frac{4}{\tau} = \frac{4}{163} = 0.0245 \quad (15)$$

Relacionando a equação 11 com a equação 12, pode-se constatar que:

$$\frac{(1 + AK_p)}{\tau} = 2\zeta\omega_n = 2\delta \quad (16)$$

E também,

$$\frac{A}{\tau T_R} = \omega_n^2 = \delta^2 \quad (17)$$

Como todos os valores são conhecidos, isolando o K_p na equação 16, encontramos o ganho proporcional:

$$K_p = \frac{2\delta\tau - 1}{A} = \frac{2 * 0.0245 * 163 - 1}{9.2354} = 0.7580 \quad (18)$$

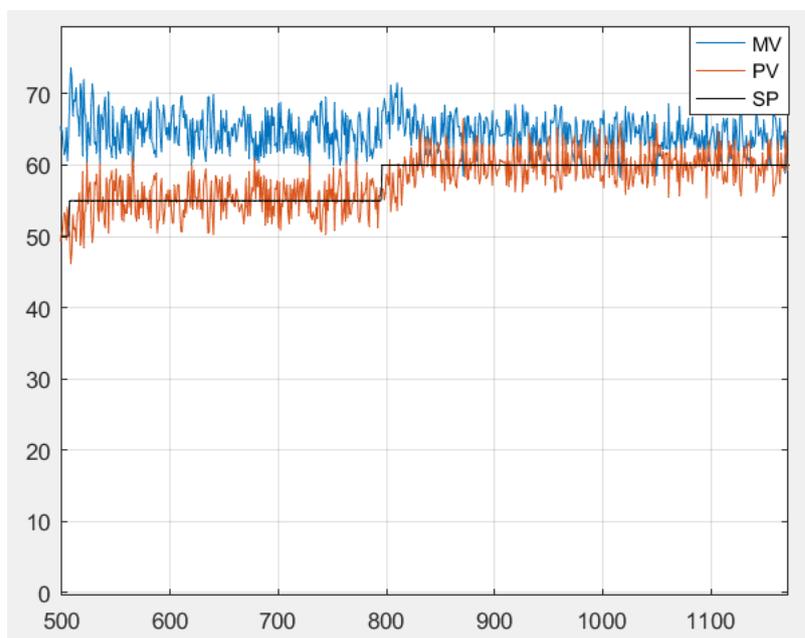
Isolando T_R na equação 17, obtemos o ganho do integrador correspondente em segundos. Assim, para expressá-lo em função de minutos, foi realizado o ajuste necessário, dividindo-o por 60, conforme:

$$T_R = \frac{A}{\tau\delta^2} = \frac{9.2354}{163 * 0.0245^2} = 1.5681 \quad (19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os ganhos do controlador PI obtidos, deu-se início aos testes do sistema em malha fechada. A princípio, foi utilizado o controle PI na planta CRL para identificar a resposta do controlador e, com a utilização do Octave, gerou-se o gráfico da sua função de transferência em malha fechada a partir dos dados obtidos na planta CRL. Com o nível do tanque estabilizado em 50%, foi adotado ao *setpoint* um valor de 55%. A resposta do sistema está representada na Figura 37, tendo um tempo aproximado de 60 segundos para atingir sua estabilidade, com a abertura da válvula em torno de 65%. Após um período, o *setpoint* sofreu uma nova alteração para 60%, resultando em um tempo semelhante para que a PV atingisse sua estabilidade, além disso, nota-se que houve uma ligeira alteração inicial na abertura da válvula para 70%, retornando logo em seguida para uma média de abertura em torno de 65%.

Figura 37 - Teste PI na planta CRL

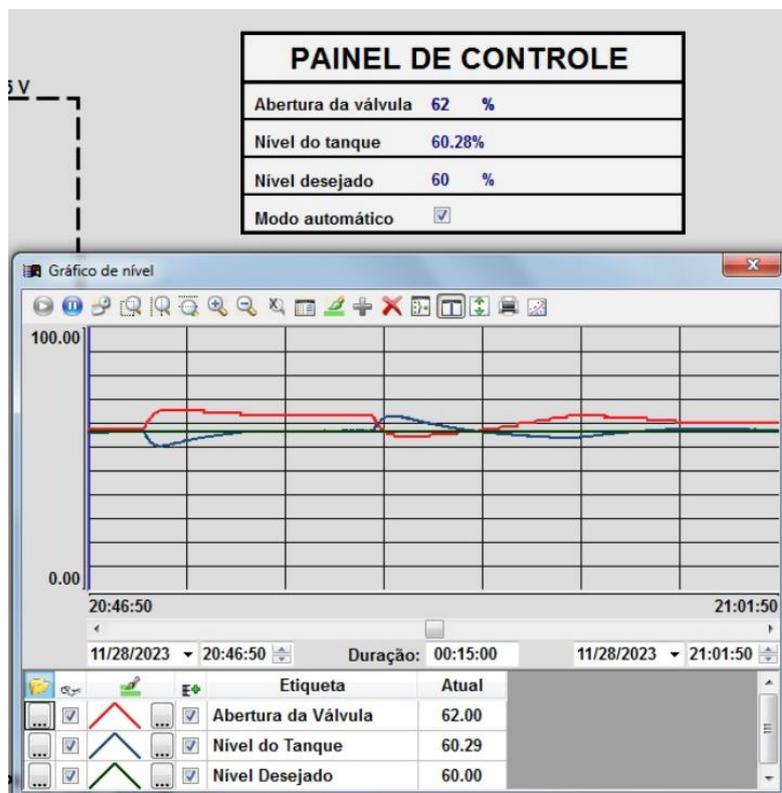


Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foram atribuídos os valores do ganho proporcional e do ganho integrativo ao bloco funcional PID ilustrado na Figura 25, com o propósito de efetuar o teste do controlador PI na planta DemoKit. O teste iniciou-se com um *setpoint* de 60%, após o sistema atingir sua acomodação, ligou-se o distúrbio da planta CRL para

atuar sobre o processo, onde a PV caiu para aproximadamente 54% e, em torno de 2 minutos, a PV alcançou o *setpoint* novamente. Posteriormente, o distúrbio foi desligado e a PV aumentou ligeiramente, até a atuação do controle diminuir a abertura da válvula para compensar, neste caso, a PV demorou aproximadamente 5 minutos para alcançar o *setpoint*. É possível verificar a resposta do controle sobre a perturbação externa na Figura 38.

Figura 38 - Teste PI na planta DemoKit



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois os equipamentos foram instalados e ajustados seguindo os manuais do fabricante, assim como a conexão física entre a planta DemoKit e CRL.

Em relação aos softwares empregados no projeto, a única limitação encontrada foi relacionada à licença do System302, vinculada apenas ao Windows 7. Diante disso, foi necessário adquirir um computador com o sistema operacional Windows 7 e softwares mais antigos, como InduSoft, capaz de operar nesse sistema. Apesar disto, a programação em lógica *ladder* implementada no LogicView foi bem-sucedida, efetuando o controle dos equipamentos de maneira satisfatória, assim como a implementação da IHM no InduSoft, que apesar de ser um software de versões anteriores, atendeu às expectativas.

O controlador foi obtido com a utilização da planta CRL e auxílio do Octave para estimar a função de transferência do sistema. A partir dessa estimativa, o sistema foi modelado e o controlador foi projetado. Este controlador se mostrou satisfatório em controlar o nível diante de perturbações externas, também vale ressaltar da possibilidade de controlar a abertura da válvula manualmente.

Assim, é possível afirmar que este trabalho atingiu com êxito os objetivos de controle do nível do sistema. Além disso, este projeto permanecerá no laboratório de automação para auxiliar os professores durante suas aulas práticas, ampliando os processos a serem demonstrados aos alunos.

6 REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis A. **Fundamentos de Instrumentação**. Pearson, 2013.
- ALÉSSIO, Vinícius. **Comunicações industriais e acesso remoto aplicados em um processo de automação de uma linha cerâmica**. Centro Universitário UniSatc, (Trabalho de Conclusão de Curso, 2022), 2022.
- CASTELETTI, Luís F. **Instrumentação industrial**. <http://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2010/09/instrumentacao.pdf>,(Apostila de Ensino) v. 10, p. 04– 14, 2013.
- DA SILVA, Edilson Alfredo. **Introdução às linguagens de programação para CLP**. Editora Blucher, 2021.
- FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**, 2004.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. Pearson, 2011.
- OLIVEIRA, L. M. et al. Utilização de uma planta didática smar para complementação do ensino de engenharia de controle e automação. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Belém, PA. [S.l.]: [s.n.]. 2012.
- PETRUZELLA, Frank D. **Controladores lógicos programáveis**. AMGH Editora, 2014.
- PINHEIRO, José Maurício Santos. **Introdução às redes de supervisão e controle**, 2006.
- RAMIELLI, Liliane K. **Hidráulica e planejamento aplicados ao saneamento**. InterSaberes, 2021.
- ROSARIO, Joao Mauricio. **Automação industrial**. Baraúna, 2012.
- SANTOS, Fabrício Teixeira dos; MARINATO, Matheus Mariano. **Sistema supervisório**. (Trabalho de Conclusão de Curso, 2021), 2021.
- SILVA, Lyvia RB; ENDO, Wagner; LISBÔA, ARBS. Expectativas da utilização de uma planta didática industrial como objeto de aprendizagem em um curso de graduação em engenharia. In: **XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA**. 2011.
- WALTER ANTÔNIO BAZZO, Luiz T. D. V. P. **Introdução a Engenharia Conceitos, ferramentas e comportamentos**. Ed. da UFSC, 2006.

SMAR TECHNOLOGY COMPANY. **LogicView**. Disponível em: <<https://www.smar.com/pt/produto/logicview-configurador-de-redes-logicas-padrao-iec-61131>>. Acesso em: 20/06/2023.

SMAR TECHNOLOGY COMPANY. **System302**. Disponível em: <<https://www.smar.com/pt/system302>>. Acesso em: 09/11/2023

SMAR TECHNOLOGY COMPANY. **LD301**. Disponível em: <<https://www.smar.com/public/img/produtos/arquivos/LD301MP.pdf>> Acessado em 07/06/2023 às 18:14

SMAR TECHNOLOGY COMPANY. **MÓDULOS E/S**. Disponível em: <https://www.smar.com/public/img/produtos/arquivos/1648143650627_mesdamp.pdf> Acessado em: 17/06/2023 às 15:04

EATON, John Wesley et al. **Gnu octave**. London: Network thoery, 3ª Ed. 1997.



Emitido em 17/12/2023

CÓPIA DO TRABALHO Nº 228/2023 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 16:53)

HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: ###22#4

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 16:59)

Guilherme de Lima Resende Martins
DISCENTE
Matrícula: 2017#####4

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **228**, ano: **2023**, tipo:
CÓPIA DO TRABALHO, data de emissão: **18/12/2023** e o código de verificação: **d2ddf9ec35**