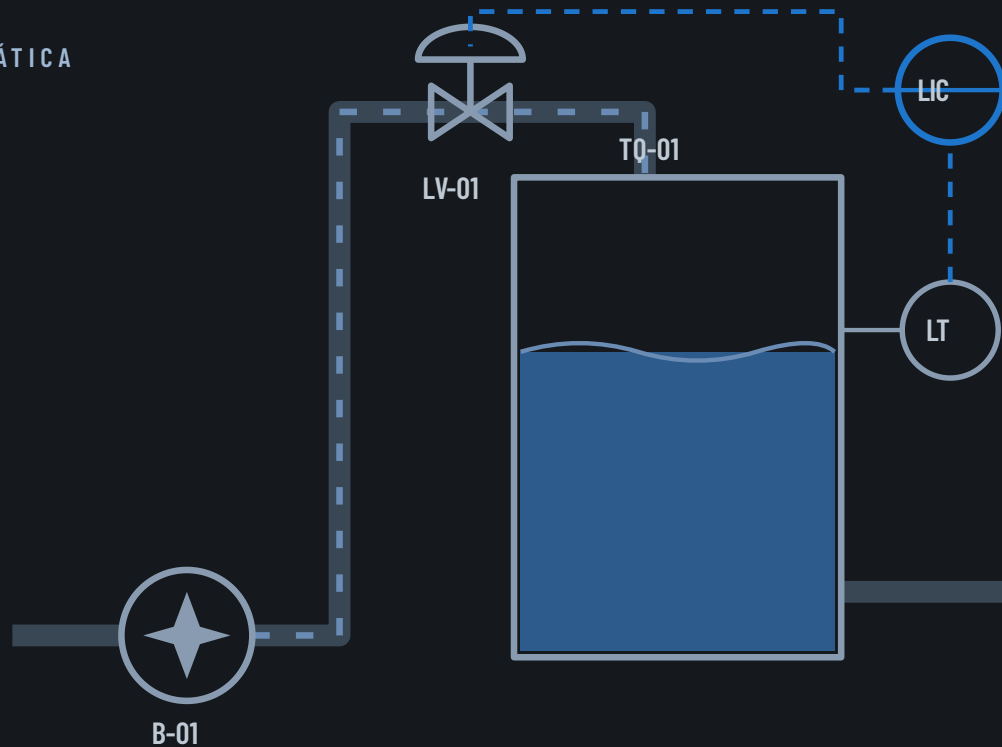




AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS

Bancada de Nível TQ-01

Orientações para a prática com o sistema: planta, malha de controle, comunicação Modbus TCP, aquisição de dados, indicadores e controle de versões, com exemplos resolvidos e exercícios.

Prof. Luciano Bittencourt

Curso de Engenharia Elétrica
UNILESTE

Prática orientada

Bancada virtual de controle de nível
Setembro de 2026

Sumário

Este material orienta a prática com a Bancada de Nível TQ-01, uma planta de controle de nível simulada no navegador. Ele explica o que cada parte do sistema faz, por que foi projetada assim e como conduzir a prática, seja como demonstração do professor, seja como atividade das equipes. A comunicação Modbus TCP recebe o tratamento mais detalhado, com exemplos resolvidos byte a byte.

1	Apresentação e objetivos	2
2	Visão geral da bancada	3
3	A planta e a instrumentação	5
4	O modelo dinâmico	7
5	A malha de controle de nível	9
6	Comunicação Modbus TCP	15
	Cliente, servidor e varredura · modelo de dados · estrutura do quadro · representação de números · mapa de registradores · seis exemplos resolvidos · endereçamento · desempenho · segurança	
7	Aquisição, armazenamento e dicionário de variáveis	26
8	Indicadores técnicos e gerenciais	29
9	Controle de versões	31
10	Roteiro da prática	32
11	Exercícios	33
12	Gabarito	34
A	Parâmetros do modelo e glossário	35

1 Apresentação e objetivos

A bancada é uma planta de controle de nível simulada no navegador. Ela reúne, em uma única tela, tudo o que uma equipe precisa planejar ao implementar um sistema automatizado: ferramentas, dados, comunicação, indicadores e registro de versões.

1.1 Por que uma bancada virtual

No planejamento de um projeto de automação, a equipe precisa definir o conjunto de ferramentas, o dicionário de variáveis, a estrutura de arquivos e os indicadores que vai apresentar. Esses conceitos ficam abstratos quando discutidos apenas no papel. A bancada permite mostrar o ciclo completo funcionando: o processo gera dados, a rede transporta esses dados, o coletor os grava, a análise transforma dados em indicadores e o repositório guarda a evidência.

Como tudo roda no navegador, não é necessário instalar software, configurar rede ou ter um CLP disponível. O modelo matemático da planta foi construído com dinâmica realista (atrasos, curvas de bomba e de válvula, ruído de medição), de modo que os fenômenos observados na tela são os mesmos encontrados em campo.

1.2 Objetivos de aprendizagem

Ao final da prática, o estudante deve ser capaz de:

1. identificar os elementos de uma malha de controle de nível em um diagrama P&ID e descrever o caminho do sinal, do transmissor até o elemento final de controle;
2. ler e montar telegramas Modbus TCP de leitura (FC03) e escrita (FC06 e FC16), convertendo valores entre unidade de engenharia, inteiro e hexadecimal;
3. explicar a função do dicionário de variáveis e da convenção de nomes na integração entre equipamentos, programas e equipe;
4. calcular e interpretar indicadores de energia, qualidade de controle, disponibilidade e eventos a partir de dados de ensaio;
5. comparar estratégias de controle usando evidências quantitativas, e não apenas impressões;
6. organizar dados e documentos com estrutura de pastas e controle de versões.

1.3 Como usar este material

As seções 2 a 5 descrevem o sistema físico e o controle. A seção 6 é o núcleo do material: explica a comunicação Modbus TCP partindo do zero e resolve seis exemplos completos usando valores reais da bancada. As seções 7 a 9 tratam dos dados, dos indicadores e das versões. A seção 10 traz o roteiro da prática, e as seções 11 e 12 trazem exercícios com gabarito.

CONVENÇÃO DOS EXEMPLOS

Todos os números usados nos exemplos foram obtidos da própria bancada, com o PID atuando na válvula LV-01, setpoint de 60 % e a válvula de saída HV-01 recém-aberta de 40 % para 55 %. Por isso, o estudante pode reproduzi-los na tela e conferir os valores.

2 Visão geral da bancada

A bancada imita a arquitetura de um sistema de automação real, organizada em níveis: o campo, o controle, a supervisão e a gestão dos dados.

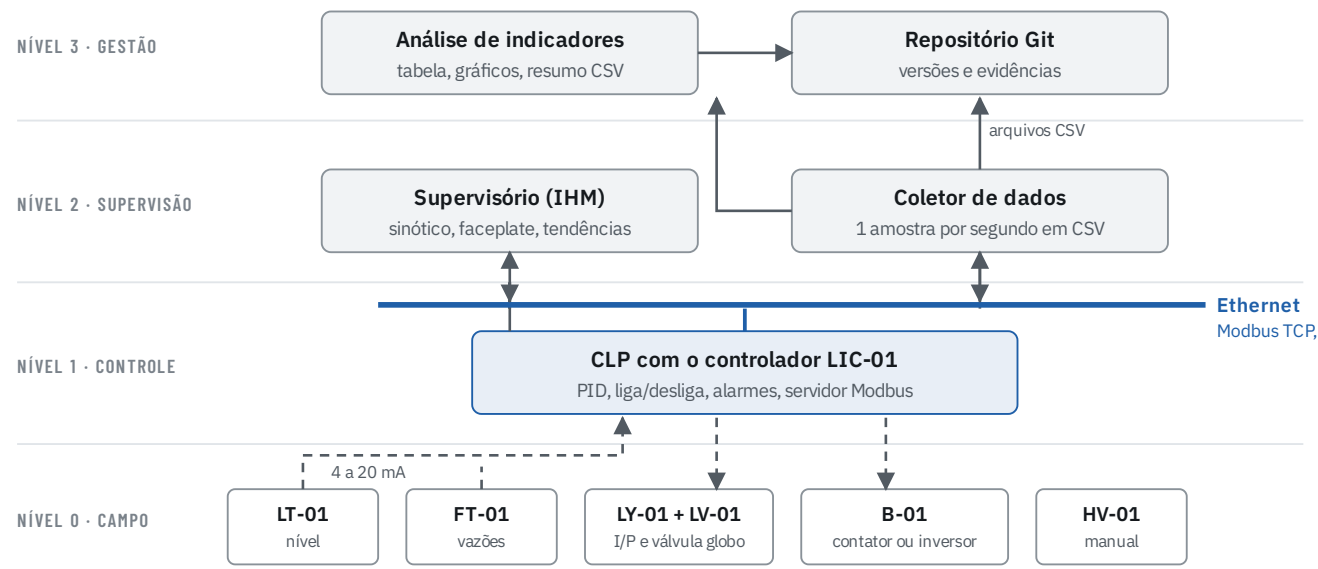


Figura 1 Arquitetura da bancada em níveis. Os instrumentos de campo trocam sinais analógicos com o CLP; o CLP conversa com o supervisório e com o coletor pela rede Modbus TCP; os dados gravados alimentam a análise e o repositório.

2.1 O que cada área da tela faz

ÁREA DA PÁGINA	FUNÇÃO	SEÇÃO DESTE MATERIAL
Roteiro da prática	Nove passos com duração sugerida e orientações	10
Barra de operação	Iniciar, pausar e reiniciar o processo; velocidade da simulação; relógio	2.2
Sinótico da planta	Diagrama P&ID animado, alarmes e ajuste da HV-01	3
Faceplate do LIC-01	Estratégia, modo, setpoint, saída e parâmetros do PID	5
Tendências	Nível, saída do controlador, vazões, potência e resposta ao degrau	4 e 5
Comunicação Modbus TCP	Telegramas em hexadecimal e tabela de registradores	6
Coletor de dados	Ensaio gravados em CSV, ensaio padronizado	7
Indicadores dos ensaios	Tabela comparativa, consumo específico e curvas sobrepostas	8
Dicionário de variáveis	TAG, descrição, unidade, registrador, escala e acesso	6.6 e 7

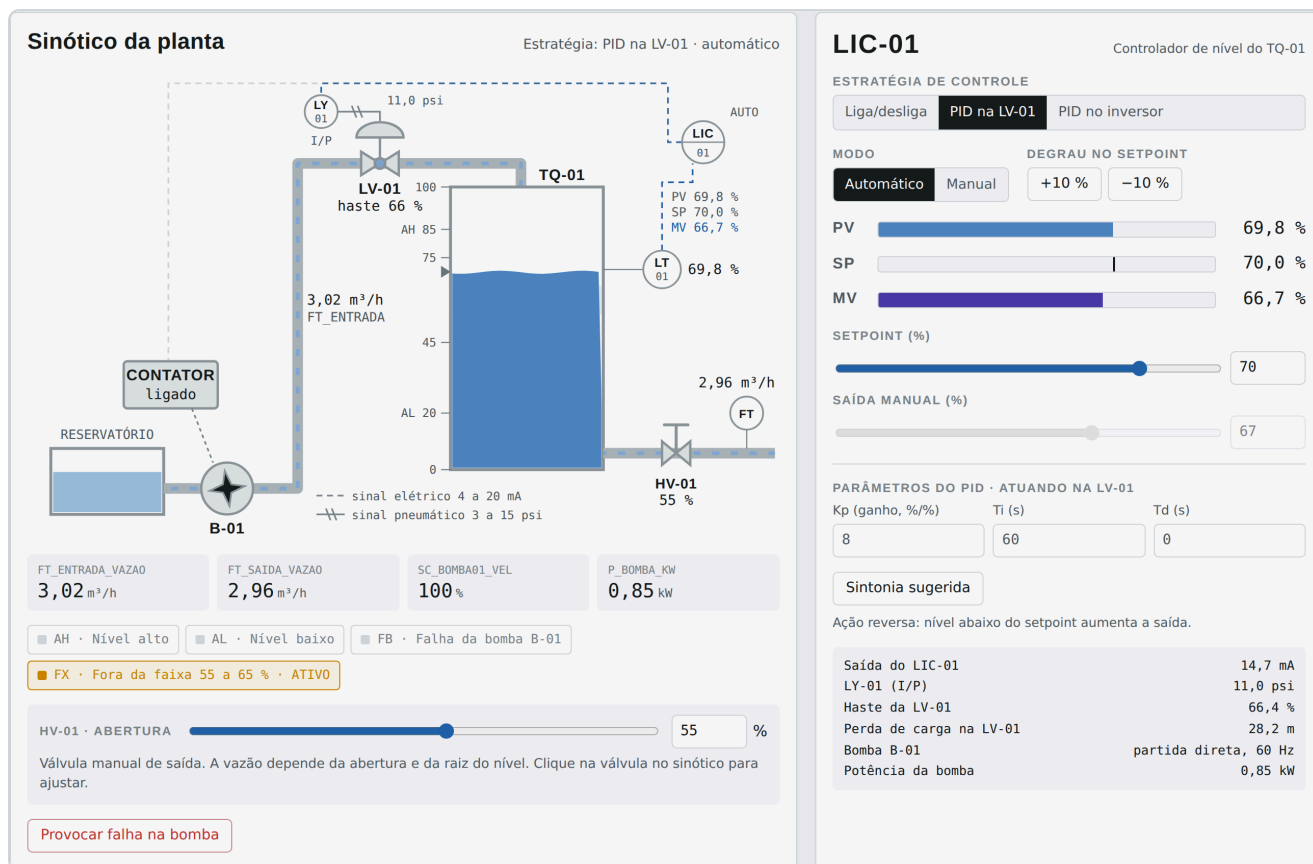


Figura 2 Sinótico P&ID (à esquerda) e faceplate do controlador LIC-01 (à direita), com o PID atuando na válvula LV-01 logo após um degrau de setpoint.

2.2 Operação do processo

A página abre com o processo parado: a bomba desligada, a válvula de controle fechada e o relógio de processo em zero. Nada avança até o operador clicar em Iniciar processo. Esse comportamento é intencional, porque em uma planta real a partida é um ato deliberado do operador.

BOTÃO	EFEITO
Iniciar processo	Coloca a planta em operação. Nas estratégias com PID, a bomba parte imediatamente; no liga/desliga, o controlador decide quando ligá-la.
Pausar / Continuar	Congela o tempo da simulação. Útil para explicar uma tela sem que os valores mudem.
Reiniciar	Volta ao estado inicial (nível em 50 %, processo parado, tendências vazias). Mantém estratégia, setpoint, sintonia e abertura da HV-01.
Velocidade 1x a 60x	Acelera o tempo. Em 20x, um ensaio de 300 s de processo dura 15 s de relógio.

3 A planta e a instrumentação

A planta bombeia água de um reservatório para o tanque TQ-01. O consumo do processo é representado pela saída do tanque, através da válvula manual HV-01. O objetivo do controle é manter o nível no setpoint, mesmo com o consumo variando.

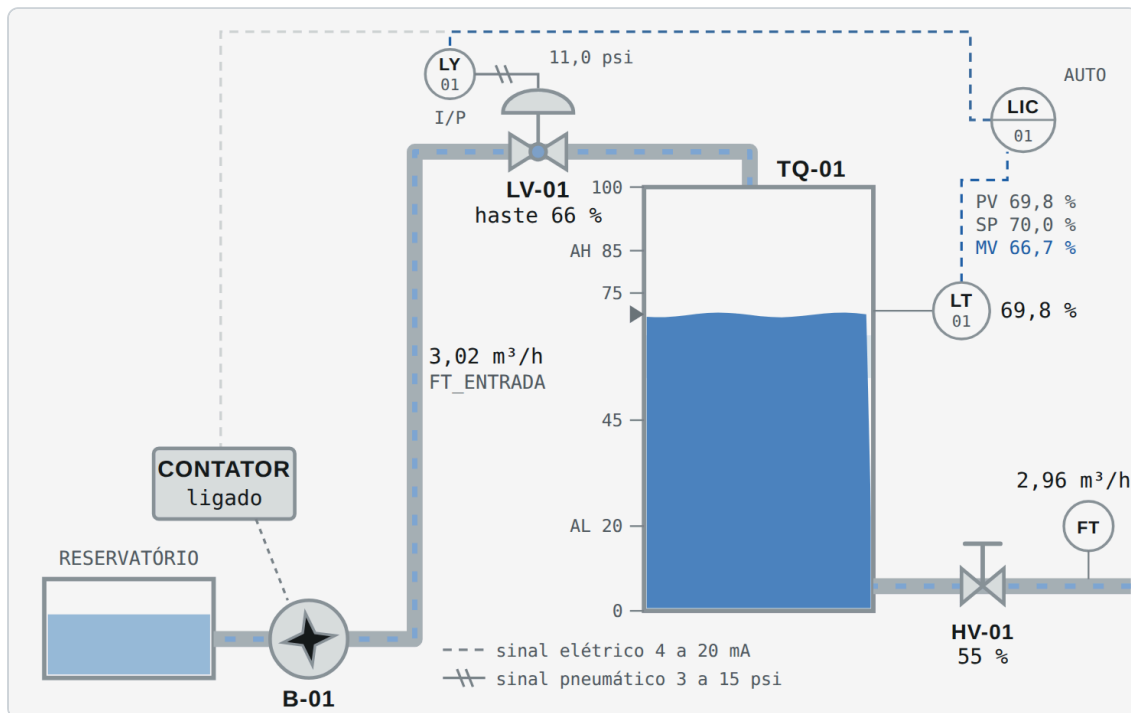


Figura 3 Sinótico em notação P&ID. As linhas tracejadas são sinais elétricos de 4 a 20 mA; a linha com duas barras inclinadas é o sinal pneumático de 3 a 15 psi. O trecho em azul é o caminho ativo da malha.

3.1 Equipamentos e instrumentos

TAG	NOME	FUNÇÃO NA PLANTA
B-01	Bomba centrífuga	Recalca água do reservatório para o tanque. Acionada por contator (partida direta) ou por inversor de frequência.
LV-01	Válvula de controle globo	Estrangula a vazão de entrada conforme o comando do controlador. Atuador pneumático de diafragma, ar-para-abrir.
LY-01	Conversor I/P	Converte o sinal elétrico de 4 a 20 mA do controlador em pressão de 3 a 15 psi para o atuador da válvula.
TQ-01	Tanque	0,1 m² de seção e 1 m de altura útil (100 litros).
LT-01	Transmissor de nível	Mede o nível e envia 4 a 20 mA ao controlador. Tem atraso de 1,5 s e ruído de medição.
LIC-01	Controlador indicador de nível	Compara o nível medido com o setpoint e calcula a saída (PID ou liga/desliga).
HV-01	Válvula manual	Define o consumo do processo. É o distúrbio da malha.
FT-01	Transmissor de vazão	Mede a vazão de saída.

3.2 Como ler uma TAG

As TAGs seguem a norma ISA-5.1. A primeira letra indica a variável medida; as letras seguintes indicam a função do instrumento. O número identifica a malha.

LETRA	1ª POSIÇÃO (VARIÁVEL)	LETRA	POSIÇÕES SEGUINTE (FUNÇÃO)
L	nível (level)	T	transmissor
F	vazão (flow)	I	indicador
H	manual (hand)	C	controlador
Z	posição	V	válvula
S	velocidade (speed)	Y	relé ou conversor

EXEMPLO

LIC-01 se lê: L (nível), I (indicador), C (controlador), malha 01. É o controlador que indica e controla o nível da malha 01. Pelo mesmo raciocínio, LY-01 é o conversor da malha de nível 01, e ZT (usado no nome do registrador ZT_LV01_POS) é o transmissor de posição da haste da LV-01.

3.3 Alarmes da planta

ALARME	CONDIÇÃO	SEVERIDADE
AH	Nível medido maior ou igual a 85 %	advertência
AL	Nível medido menor ou igual a 20 %	crítico
FB	Falha da bomba B-01 (acionada pelo botão Provocar falha)	crítico
FX	Nível fora da faixa de especificação de 55 a 65 %	advertência

Seguindo a filosofia de IHM de alto desempenho (ISA-101), a tela usa tons de cinza para o estado normal e reserva cores para água, sinais ativos e anormalidades. Assim, o que exige atenção se destaca imediatamente.

4 O modelo dinâmico

Um simulador só é útil para ensinar controle se reproduzir a dinâmica do processo. Esta seção mostra as equações usadas, sempre com um exemplo numérico.

4.1 Balanço de massa no tanque

O nível sobe quando entra mais água do que sai, e desce no caso contrário. Com área de seção A:

$$A \cdot dh/dt = q_{\text{ent}} - q_{\text{sai}}$$

EXEMPLO PRÁTICO

Com $q_{\text{ent}} = 3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e $q_{\text{sai}} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$, a diferença é $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, ou $0,000278 \text{ m}^3/\text{s}$. Dividindo pela área de $0,1 \text{ m}^2$, o nível sobe $0,00278 \text{ m/s}$, isto é, $0,28 \%$ por segundo. Em um minuto, sobe cerca de 17% .

Como o nível é a integral da diferença de vazões, o tanque é um processo integrador: se a entrada ficar maior que a saída, o nível sobe indefinidamente. Esse comportamento explica o sobressinal observado nos degraus de setpoint (seção 5.7).

4.2 Vazão de saída pela HV-01

$$q_{\text{sai}} = K_v \cdot (\text{abertura}) \cdot \sqrt{h} \quad \text{com } K_v = 6,45$$

A vazão de saída depende da raiz quadrada do nível (lei de Torricelli): quanto mais cheio o tanque, mais pressão na saída. Com a HV-01 em 40 % e nível de 60 % (0,6 m), $q_{\text{sai}} = 6,45 \times 0,40 \times \sqrt{0,6} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.3 Bomba, tubulação e válvula de controle

A bomba entrega a vazão em que a altura que ela produz se iguala à altura que o sistema exige. A altura da bomba cai com a vazão e depende do quadrado da velocidade (leis de afinidade). O sistema exige a altura estática de 15 m, mais as perdas na tubulação e na válvula de controle.

$$\begin{aligned} \text{bomba: } H &= 60 \cdot s^2 - 1,0 \cdot q^2 \\ \text{sistema: } H &= 15 + 0,8 \cdot q^2 + [q / (C_v \cdot f(x))]^2 \end{aligned}$$

Aqui s é a velocidade relativa ($1 = 60 \text{ Hz}$), x é a abertura da haste da LV-01 e $f(x)$ é a característica da válvula (seção 5.3). A Figura 4 mostra o que acontece em dois modos de controlar a mesma vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

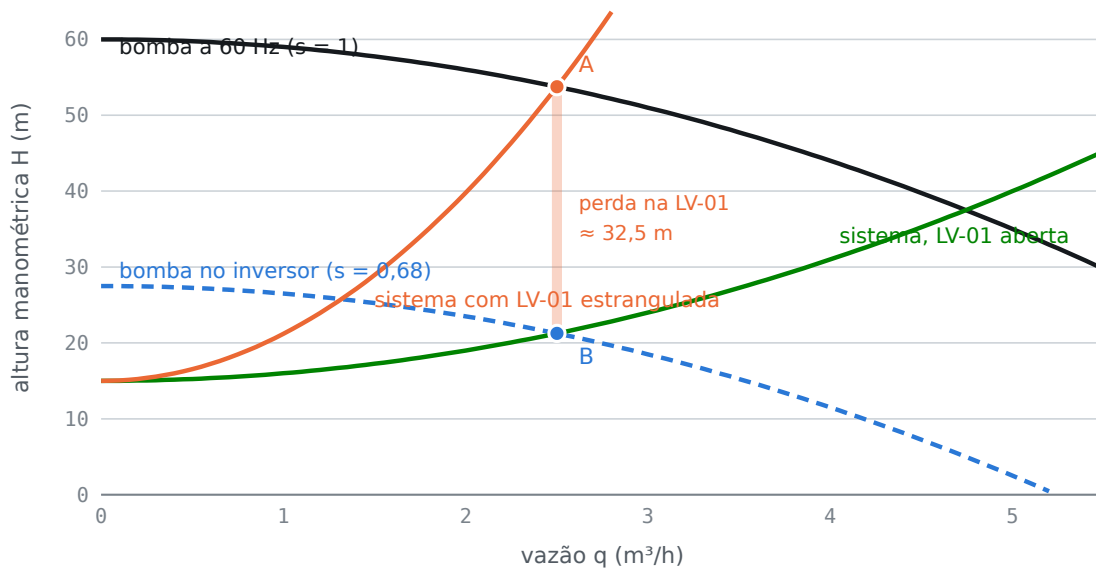


Figura 4 Curvas da bomba e do sistema. No ponto A, a bomba gira a 60 Hz e a LV-01 estrangula o fluxo, dissipando cerca de 32 m de altura. No ponto B, o inversor reduz a velocidade e a válvula fica aberta: a mesma vazão é obtida com muito menos altura.

POR QUE ISSO IMPORTA

A potência hidráulica é proporcional ao produto vazão $\times$ altura. No ponto A ela vale cerca de 366 W; no ponto B, cerca de 145 W. A diferença é energia transformada em calor e ruído dentro da válvula. É por isso que a estratégia PID no inversor consome muito menos que a estratégia PID na LV-01 (seção 8).

4.4 Atrasos e imperfeições incluídos

ELEMENTO	COMPORTAMENTO MODELADO
Motor, partida direta	acelera com constante de tempo de 0,8 s; na parada, desacelera por inércia em 2,5 s
Inversor	rampa de 20 % por segundo; velocidade mínima de 40 % (24 Hz)
Atuador da LV-01	primeira ordem de 2,5 s e zona morta de 0,3 % (atrito na haste)
Coluna de água	atraso de 1 s entre a mudança de condição e a nova vazão
HV-01	atraso de 1 s entre o ajuste e a nova abertura
Transmissor LT-01	primeira ordem de 1,5 s mais ruído de medição; o controlador usa o valor medido

Sem esses atrasos, o nível desenharia rampas perfeitas e a potência teria degraus instantâneos, o que não acontece em nenhuma planta real. Com eles, aparecem fenômenos importantes: no liga/desliga, o nível ultrapassa os limites da histerese; no PID, surge sobressinal; com derivativo, o ruído é amplificado.

5 A malha de controle de nível

Uma malha fechada mede a variável controlada, compara com o valor desejado e age sobre o processo para reduzir a diferença. Esta seção percorre a malha do tanque TQ-01 elemento por elemento.

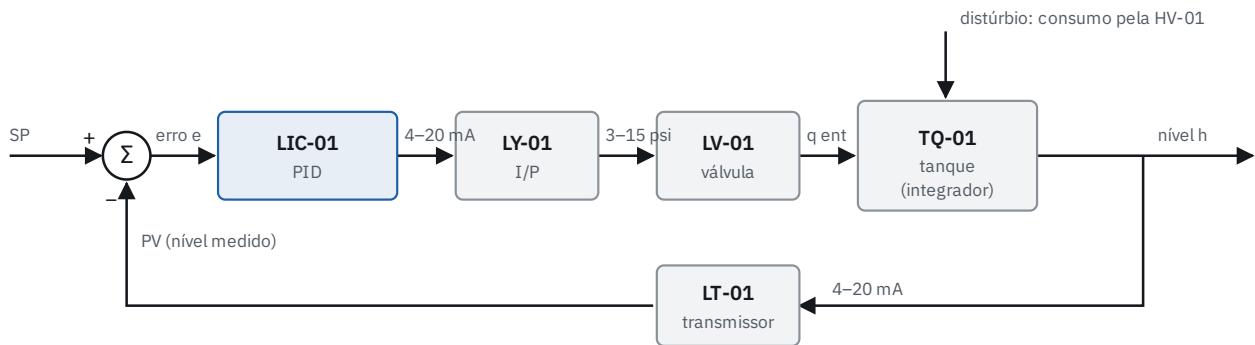


Figura 5 Diagrama de blocos da malha de nível com a estratégia PID na LV-01. Na estratégia PID no inversor, os blocos LY-01 e LV-01 são substituídos pelo inversor e pela bomba.

5.1 O caminho do sinal

1. O LT-01 mede o nível e o transmite como corrente de 4 a 20 mA. Esse valor é a variável de processo, PV.
2. O LIC-01 calcula o erro $e = SP - PV$ e, a partir dele, a saída MV (0 a 100 %), enviada como 4 a 20 mA.
3. O LY-01 converte a corrente em pressão de ar de 3 a 15 psi.
4. A pressão empurra o diafragma do atuador, que move a haste da LV-01 e muda a vazão de entrada.
5. A nova vazão altera o nível, que o LT-01 mede novamente. O ciclo se repete continuamente.

5.2 Sinais padronizados

$$I \text{ (mA)} = 4 + 16 \cdot MV/100$$

$$P \text{ (psi)} = 3 + 12 \cdot MV/100$$

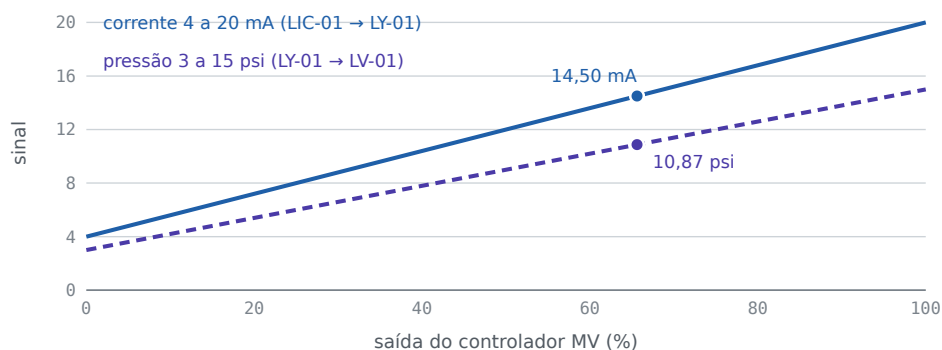


Figura 6 Relação entre a saída do controlador e os sinais de corrente e pressão.

EXEMPLO PRÁTICO

No retrato usado nos exemplos, MV = 65,6 %. A corrente é $4 + 16 \times 0,656 = 14,50$ mA, e a pressão é $3 + 12 \times 0,656 = 10,87$ psi. Esses são exatamente os valores mostrados no faceplate em "Saída do LIC-01" e "LY-01 (I/P)".

O sinal começa em 4 mA, e não em zero, por um motivo prático: uma corrente de 0 mA indica cabo rompido ou instrumento desligado, o que permite diagnosticar falhas. O mesmo vale para os 3 psi pneumáticos.

5.3 A válvula globo de igual porcentagem

A característica de uma válvula relaciona a abertura da haste com a vazão que ela permite. Na característica de igual porcentagem, cada incremento igual de abertura aumenta a vazão em uma porcentagem igual da vazão atual. O resultado é uma curva que começa suave e fica íngreme perto da abertura total.

$$f(x) = (R^x - 1 - 1/R) / (1 - 1/R) \quad \text{com } R = 50 \text{ (rangeabilidade)}$$

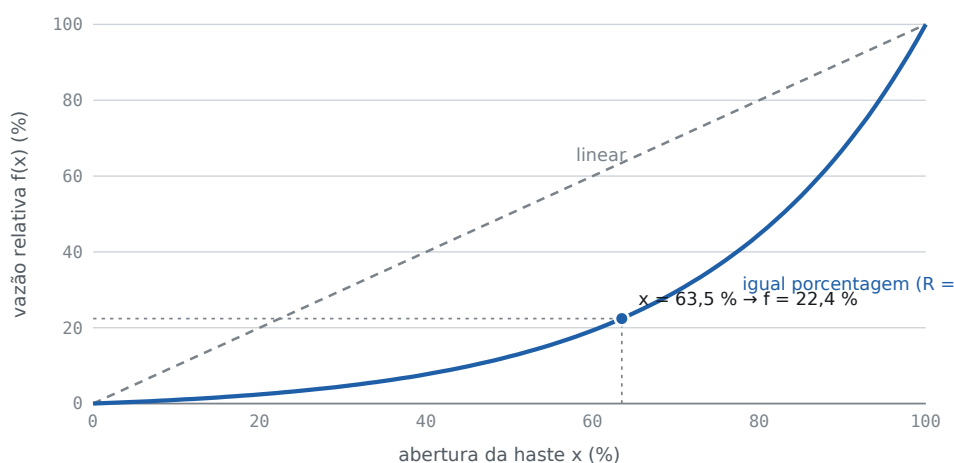


Figura 7 Característica de igual porcentagem comparada com a linear.

Essa característica é a mais usada em válvulas globo de controle porque compensa a curva da bomba: quando a válvula está quase fechada, pequenas variações de abertura produzem pequenas variações de vazão, o que facilita o controle fino.

O atuador é ar-para-abrir: sem pressão de ar, a mola fecha a válvula. Essa é a posição de segurança: se faltar ar comprimido ou energia, a válvula fecha e o tanque não transborda.

5.4 O algoritmo PID do LIC-01

$$MV = K_p \cdot [e + (1/T_i) \cdot \int e \, dt - T_d \cdot d(PV)/dt]$$

TERMO	O QUE FAZ	EFEITO DE AUMENTAR
K _p	Reage ao erro atual, em proporção a ele	resposta mais rápida, mais oscilação
T _i	Acumula o erro ao longo do tempo e elimina o erro em regime	ação integral mais lenta (T _i maior = menos integral)

TERMO	O QUE FAZ	EFEITO DE AUMENTAR
Td	Reage à velocidade de variação do nível	antecipa a resposta, mas amplifica ruído

Quatro detalhes de implementação, presentes em controladores industriais, foram incluídos:

- Ação reversa: se o nível está abaixo do setpoint, a saída aumenta para abrir a válvula.
- Derivativo sobre a PV, com filtro: evita o pico de saída quando o operador muda o setpoint e reduz o efeito do ruído.
- Anti-windup: quando a saída satura em 0 ou 100 %, a integral para de acumular. Sem isso, o nível ultrapassaria muito o setpoint depois de uma saturação longa.
- Transferência sem salto: ao passar de manual para automático, a integral é ajustada para que a saída continue exatamente onde estava.

5.5 As três estratégias de controle

ESTRATÉGIA	COMO FUNCIONA	ELEMENTO FINAL
Liga/desliga	Liga a bomba quando o nível cai a 45 % e desliga quando sobe a 75 % (histerese)	contator da B-01; LV-01 aberta
PID na LV-01	A bomba gira sempre a 60 Hz; o PID ajusta a abertura da válvula	LV-01, via LY-01
PID no inversor	A LV-01 fica totalmente aberta; o PID ajusta a velocidade da bomba (MV de 0 a 100 % corresponde a 40 a 100 % de velocidade)	inversor da B-01

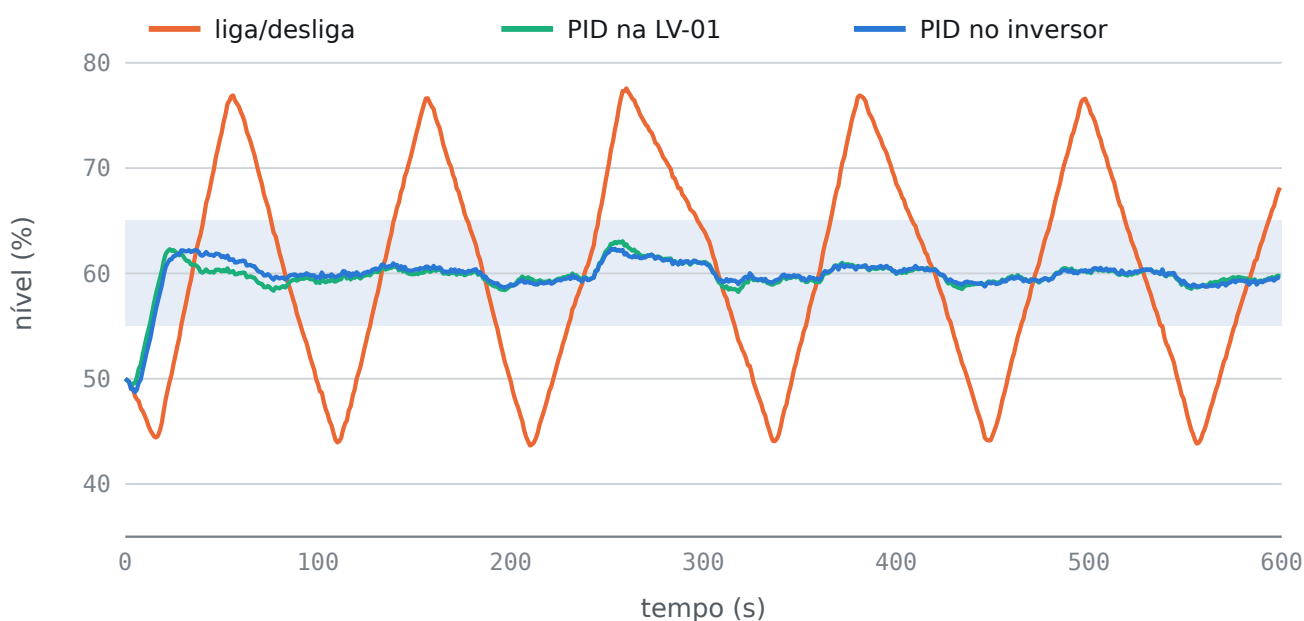


Figura 8 Nível durante um ensaio padronizado de 600 s nas três estratégias. A faixa azul clara é a especificação de 55 a 65 %. O liga/desliga oscila entre cerca de 44 e 77 %; as duas estratégias com PID ficam dentro da faixa depois da partida.

5.6 Acionamento por inversor de frequência

O inversor converte a tensão da rede, de frequência fixa em 60 Hz, em tensão de frequência variável. Como a velocidade de um motor de indução é praticamente proporcional à frequência, o inversor controla a velocidade da bomba. Na estratégia PID no inversor, ele passa a ser o elemento final de controle, e a LV-01 fica totalmente aberta.

Da saída do controlador à frequência

$$\begin{aligned} \text{referência de velocidade (\%)} &= 40 + 0,6 \cdot \text{MV} & \text{frequência (Hz)} &= 60 \cdot \\ \text{velocidade} &/ 100 \end{aligned}$$

EXEMPLO PRÁTICO

Com $\text{MV} = 49,8 \%$, o LIC-01 envia $4 + 16 \times 0,498 = 11,97 \text{ mA}$. O inversor converte isso na referência de $40 + 0,6 \times 49,8 = 69,9 \%$ de velocidade, ou seja, $60 \times 0,699 = 41,9 \text{ Hz}$. Esses são os valores do Exemplo 2 da seção 6.

Três parâmetros do inversor aparecem na bancada, e todos existem em equipamentos reais:

- Frequência mínima de 40 % (24 Hz): protege o motor, cuja ventilação depende da própria rotação, e evita operar a bomba muito abaixo da faixa útil.
- Rampa de 20 % por segundo: a velocidade vai de 0 a 100 % em 5 s. A rampa limita a corrente de partida, que na partida direta chega a 6 a 8 vezes a corrente nominal, e reduz golpes de aríete na tubulação.
- Parada por inércia em caso de falha: se a bomba falha, o motor desacelera livremente, sem rampa.

Leis de afinidade e o efeito da altura estática

Para uma bomba centrífuga em um sistema só com atrito, as leis de afinidade dizem que a vazão é proporcional à velocidade, a altura ao quadrado da velocidade e a potência ao cubo. A 70 % da velocidade, a potência ideal cairia para $0,7^3 = 34 \%$ da nominal.

Na bancada, porém, a bomba precisa vencer 15 m de altura estática antes de entregar qualquer vazão. Como a altura em vazão zero é $60 \cdot s^2$, a vazão só começa quando $60 \cdot s^2$ passa de 15 m, isto é, acima de $s = \sqrt{(15/60)} = 50 \%$ da velocidade (30 Hz). Por isso a vazão não é proporcional à velocidade, e a economia real é menor que a prevista pelas leis de afinidade.

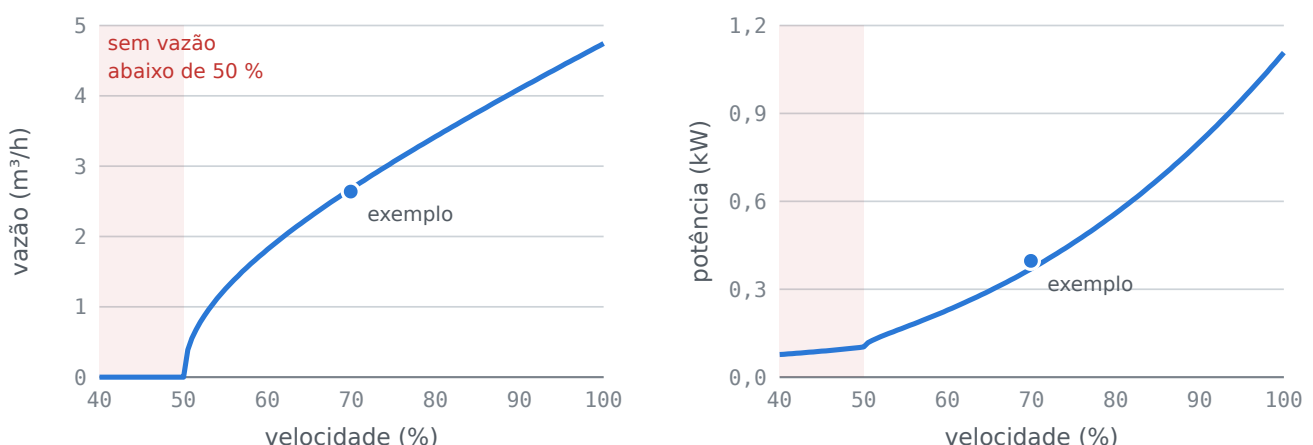


Figura 9 Vazão (à esquerda) e potência elétrica (à direita) em função da velocidade, com a LV-01 aberta. A faixa avermelhada indica velocidades em que a bomba gira sem entregar vazão. O ponto marcado é o do Exemplo 2 da seção 6.

CUIDADO NA CONFIGURAÇÃO

Com a frequência mínima em 24 Hz e a vazão começando só em 30 Hz, existe uma faixa em que a bomba gira sem bombear. Se o PID levar a saída para perto de zero, a bomba fica ligada consumindo energia sem entregar água. Em um projeto real, a frequência mínima deveria ser ajustada acima de 30 Hz. Na bancada, essa faixa foi mantida de propósito, para permitir discutir o problema.

Comparação entre os acionamentos

CARACTERÍSTICA	VÁLVULA PNEUMÁTICA (LV-01)	INVERSOR
Como controla	dissipa a energia excedente como perda de carga	reduz a energia entregue pela bomba
Sinal de comando	4 a 20 mA, convertido em 3 a 15 psi pelo I/P	4 a 20 mA direto no inversor, ou pela rede
Atraso do elemento final	atuador de 2,5 s e zona morta de 0,3 %	rampa de 20 %/s, sem zona morta
Posição de segurança	fecha sem ar (ar-para-abrir)	para o motor
Energia no ensaio de referência	0,350 kWh/m ³	0,142 kWh/m ³
Desgaste típico	gaxeta, sede e atuador	rolamentos; aquecimento em baixa rotação
Infraestrutura necessária	ar comprimido instrumentado	painel elétrico; atenção a harmônicos

5.7 Sintonia e resposta ao degrau

A bancada mede automaticamente o sobressinal e o tempo de acomodação sempre que o setpoint muda com o PID em automático. O critério de acomodação é permanecer dentro de ± 1 % do novo setpoint por 30 s.

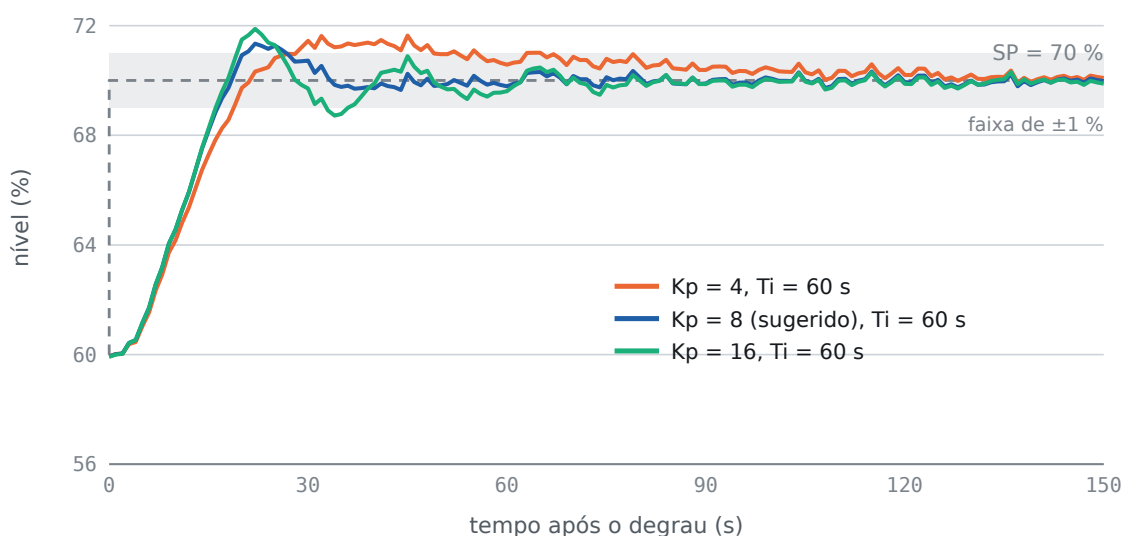


Figura 10 Degrau de setpoint de 60 para 70 % com o PID na LV-01 e três valores de K_p .

ESTRATÉGIA	KP	TI (S)	SOBRESSINAL	ACOMODAÇÃO
PID na LV-01	4	60	17 %	60 s
PID na LV-01 (sugerida)	8	60	16 %	28 s
PID na LV-01	16	60	18 %	25 s
PID na LV-01	8	20	22 %	31 s
PID no inversor (sugerida)	10	60	5 %	18 s

LEITURA DOS RESULTADOS

Em um processo integrador controlado por PI, algum sobressinal é inevitável: para eliminar o erro, a integral precisa acumular área, e essa área só é devolvida quando o nível passa do setpoint. Aumentar Kp acelera a resposta, e reduzir Ti (mais integral) aumenta o sobressinal. O inversor responde melhor que a válvula porque não tem o atraso do atuador pneumático nem a não linearidade da característica de igual porcentagem.

ATENÇÃO AO DERIVATIVO

Com $T_d = 5$ s, a variação média da saída sobe de cerca de 1 % por segundo para 6 % por segundo, porque o derivativo amplifica o ruído do transmissor. Em uma válvula real, isso desgasta a gaxeta e o atuador. Por isso, malhas de nível raramente usam ação derivativa.

6 Comunicação Modbus TCP

Esta é a seção central do material. Ela explica como o supervisor e o CLP trocam dados, parte dos conceitos básicos e chega a seis exemplos resolvidos byte a byte, todos com valores reais da bancada.

6.1 Onde a comunicação entra

Na Figura 1, os instrumentos de campo se ligam ao CLP por sinais analógicos individuais: um par de fios para cada variável. Entre o CLP e os computadores, porém, seria inviável ter um fio por variável. Usa-se então uma rede, em que muitas variáveis viajam pelo mesmo cabo, organizadas por um protocolo.

Protocolo é o conjunto de regras que define quem fala, quando fala e em que formato. O Modbus foi criado em 1979 pela Modicon para seus CLPs e se tornou um dos protocolos mais usados na indústria por três razões: é aberto (a especificação é pública e gratuita), é simples e é suportado por praticamente todos os fabricantes. O Modbus TCP é a versão que trafega sobre redes Ethernet, usando a porta TCP 502.

6.2 Cliente, servidor e varredura

O Modbus segue o modelo cliente e servidor (nas versões antigas, mestre e escravo). O cliente faz perguntas; o servidor apenas responde. O servidor nunca envia dados por iniciativa própria.

PAPEL	NA BANCADA	O QUE FAZ
Cliente	Supervisor e coletor	Envia pedidos de leitura e de escrita
Servidor	CLP	Guarda os valores em registradores e responde aos pedidos

Como o servidor não avisa quando um valor muda, o cliente precisa perguntar periodicamente. Esse ciclo se chama varredura (polling). Na bancada, o supervisor pede os 15 registradores uma vez por segundo.

ANALOGIA

Pense no professor fazendo a chamada. Os alunos (servidores) só falam quando são chamados. O professor (cliente) decide a ordem e o ritmo das perguntas. Se quiser saber se alguém chegou atrasado, precisa perguntar de novo. É exatamente assim que o Modbus funciona.

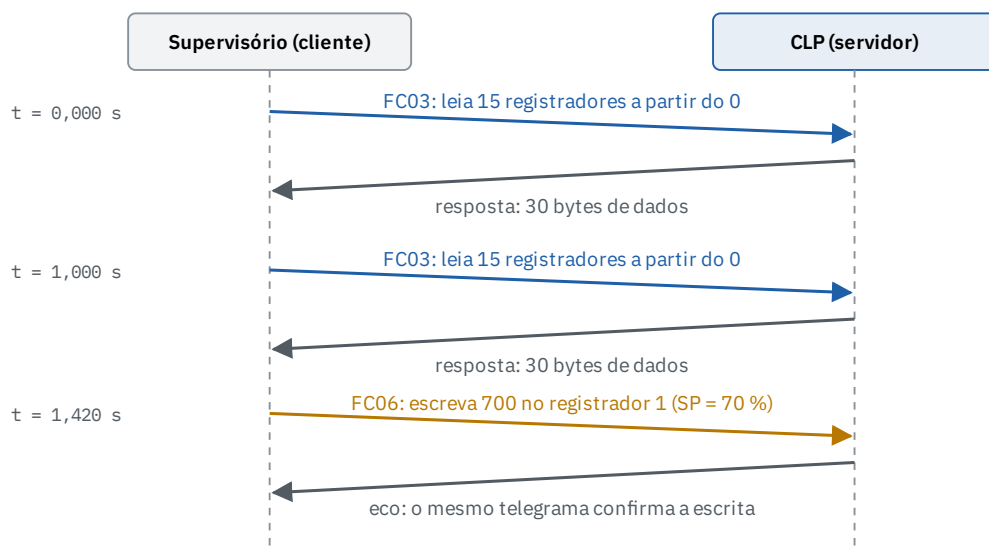


Figura 11 Sequência de mensagens. A cada segundo, o supervisório faz uma leitura. Quando o operador muda o setpoint, uma escrita é enviada entre duas varreduras.

6.3 O modelo de dados do Modbus

O servidor Modbus organiza seus dados em quatro áreas. Duas guardam bits (verdadeiro ou falso) e duas guardam palavras de 16 bits. Em cada tipo, algumas áreas são só de leitura e outras aceitam escrita.

ÁREA	TIPO	ACESSO	REFERÊNCIA	USO TÍPICO
Coils	1 bit	leitura e escrita	0xxxx	comandos liga/desliga
Discrete inputs	1 bit	somente leitura	1xxxx	chaves, fins de curso
Input registers	16 bits	somente leitura	3xxxx	medições analógicas
Holding registers	16 bits	leitura e escrita	4xxxx	setpoints, parâmetros, valores gerais

A bancada usa apenas holding registers, prática comum em projetos reais porque simplifica o mapa: tudo fica em uma única área, lida com um único tipo de pedido.

Códigos de função mais usados

CÓDIGO	HEX	OPERAÇÃO	USADO NA BANCADA
1	01	ler coils	não
2	02	ler discrete inputs	não
3	03	ler holding registers	sim, a cada segundo
4	04	ler input registers	não
5	05	escrever um coil	não
6	06	escrever um holding register	sim, em cada ajuste do operador
15	0F	escrever vários coils	não
16	10	escrever vários holding registers	exemplo 3 deste material

6.4 Modbus TCP e Modbus RTU

O Modbus nasceu para redes seriais (RS-232, RS-485), na versão RTU. O Modbus TCP reaproveita a mesma mensagem, chamada PDU (Protocol Data Unit), e troca o envelope.

CARACTERÍSTICA	MODBUS RTU	MODBUS TCP
Meio físico	serial RS-485, até 1200 m	Ethernet
Endereçamento	endereço do escravo, 1 a 247	endereço IP e porta 502
Verificação de erros	CRC de 16 bits no quadro	feita pelo TCP; não há CRC Modbus
Envelope	endereço + PDU + CRC	cabeçalho MBAP + PDU
Vários pedidos simultâneos	não	sim, identificados pelo ID de transação

6.5 Representação dos números

Antes de ler os telegramas, é preciso dominar três ideias: cada registrador tem 16 bits, os bytes aparecem em hexadecimal e o byte mais significativo vem primeiro.

Hexadecimal

Cada byte (8 bits) é escrito com dois dígitos hexadecimais, de 00 a FF (0 a 255). Os dígitos vão de 0 a 9 e depois de A (10) a F (15). Um registrador de 16 bits ocupa dois bytes, portanto quatro dígitos.

EXEMPLO 6.1: DO HEXADECIMAL PARA O DECIMAL

O nível chega como os bytes 02 4A . O primeiro byte é o mais significativo (big-endian):

$$0x024A = 0x02 \times 256 + 0x4A = 2 \times 256 + (4 \times 16 + 10) = 512 + 74 = 586$$

Com escala $\times 10$, o nível é $586 / 10 = 58,6 \%$.

EXEMPLO 6.2: DO VALOR DE ENGENHARIA PARA O HEXADECIMAL

Queremos enviar setpoint de 70,0 %. Com escala $\times 10$, o inteiro é 700. Dividindo por 256: $700 = 2 \times 256 + 188$. O byte alto é 2 = 0x02 e o byte baixo é 188 = $11 \times 16 + 12 = 0xBC$. Resultado: 02 BC .

Escala: por que multiplicar por 10, 100 ou 1000

Um holding register guarda um inteiro sem sinal de 0 a 65535. Para transmitir 58,6 % sem perder a casa decimal, o CLP multiplica por 10 e envia 586. Quem recebe divide por 10. A escala precisa ser combinada entre as partes, e é o dicionário de variáveis que registra essa combinação.

VARIÁVEL	VALOR REAL	ESCALA	INTEIRO	HEX	RESOLUÇÃO
Nível	58,6 %	$\times 10$	586	02 4A	0,1 %
Vazão de entrada	2,71 m³/h	$\times 100$	271	01 0F	0,01 m³/h
Potência	0,813 kW	$\times 1000$	813	03 2D	1 W

CUIDADO COM O LIMITE

Com escala $\times 1000$, o maior valor possível é 65,535. Uma potência de 70 kW não caberia. Escolher a escala é uma decisão de projeto: ela define a resolução e também o valor máximo.

Valores negativos e valores em ponto flutuante

A bancada não precisa deles, mas eles aparecem em qualquer projeto real.

- Negativos: usa-se inteiro com sinal em complemento de 2 (–32768 a 32767). Uma temperatura de $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, com escala $\times 10$, vira -125 , transmitido como $65536 - 125 = 65411 = \text{FF } 83$.
- Ponto flutuante: um número IEEE 754 de 32 bits ocupa dois registradores consecutivos. O valor $60,3$ é $42\ 71\ 33\ 33$. Alguns fabricantes enviam a palavra alta primeiro (4271 , 3333) e outros a baixa (3333 , 4271). Essa ordem das palavras precisa estar documentada no dicionário, ou o valor lido será absurdo.

6.6 Mapa de registradores da bancada

O mapa de registradores é o contrato entre o CLP e todos os clientes. Ele diz em que endereço está cada variável, com que escala e quem pode escrever.

END.	REF.	TAG	DESCRIÇÃO	ESCALA	ACESSO
0	40001	LT_TQ01_NIVEL	nível medido (PV), %	$\times 10$	leitura
1	40002	SP_TQ01_NIVEL	setpoint, %	$\times 10$	leitura e escrita
2	40003	LIC01_MV	saída do LIC-01, %	$\times 10$	escrita em manual
3	40004	LIC01_AUTO	1 automático, 0 manual	$\times 1$	leitura e escrita
4	40005	ESTRATEGIA	0 liga/desliga, 1 válvula, 2 inversor	$\times 1$	leitura e escrita
5	40006	ZT_LV01_POS	posição da haste da LV-01, %	$\times 10$	leitura
6	40007	SC_BOMBA01_VEL	velocidade da bomba, %	$\times 10$	leitura
7	40008	FT_ENTRADA_VAZAO	vazão de entrada, m^3/h	$\times 100$	leitura
8	40009	FT_SAIDA_VAZAO	vazão de saída, m^3/h	$\times 100$	leitura
9	40010	HV01_ABERTURA	abertura da HV-01, %	$\times 10$	leitura e escrita
10	40011	M_BOMBA01_LIGA	comando da bomba	$\times 1$	leitura
11	40012	P_BOMBA_KW	potência ativa, kW	$\times 1000$	leitura
12	40013	AL_TQ01_NIVEL_ALTO	alarme de nível alto	$\times 1$	leitura
13	40014	AL_TQ01_NIVEL_BAIXO	alarme de nível baixo	$\times 1$	leitura
14	40015	FALHA_BOMBA01	falha da bomba	$\times 1$	leitura

Observe que as variáveis que o operador escreve com mais frequência (setpoint, saída manual, modo e estratégia) estão nos endereços 1 a 4, lado a lado. Isso permite escrevê-las de uma só vez com a função 16, como mostra o Exemplo 4.

6.7 A estrutura de um telegrama Modbus TCP

Todo telegrama Modbus TCP tem duas partes: o cabeçalho MBAP, com 7 bytes, e a PDU, que contém o código de função e os dados. A Figura 12 mostra o pedido de leitura que o supervisor envia a cada segundo.

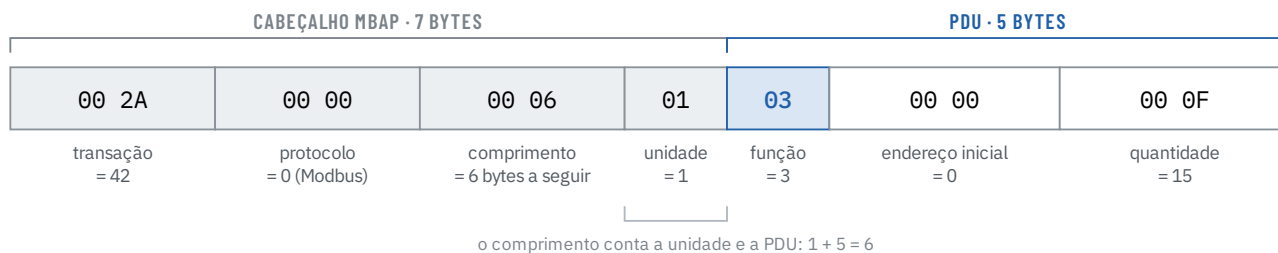


Figura 12 Pedido de leitura FC03, 12 bytes no total. Cada campo de dois bytes é transmitido com o byte mais significativo primeiro.

CAMPO	TAMANHO	PARA QUE SERVE
ID da transação	2 bytes	Número escolhido pelo cliente e devolvido na resposta. Permite associar cada resposta ao seu pedido. A bancada incrementa esse número a cada telegrama.
ID do protocolo	2 bytes	Sempre 0 para Modbus.
Comprimento	2 bytes	Quantos bytes vêm depois deste campo: a unidade mais a PDU.
Unidade	1 byte	Identifica o equipamento quando há um gateway TCP para RS-485 com vários escravos. Em um CLP ligado diretamente à rede, costuma ser 1 ou 255.
Código de função	1 byte	A operação pedida.
Dados	variável	Dependem da função: endereço e quantidade, ou endereço e valor, e assim por diante.

6.8 Exemplo 1: leitura de todos os registradores (FC03)

Situação: a HV-01 acabou de ser aberta de 40 % para 55 %. O consumo aumentou, o nível começou a cair e o PID está abrindo a LV-01. O supervisor faz sua leitura periódica.

Pedido do supervisor (12 bytes)

supervisor → CLP

00 2A 00 00 00 06 01 03 00 00 00 0F

Leitura: transação 42, protocolo Modbus, 6 bytes a seguir, unidade 1, função 3 (ler holding registers), a partir do endereço 0, quantidade 15.

Resposta do CLP (39 bytes)

CLP → supervisor

00 2A 00 00 00 21 01 03 1E

02 4A 02 58 02 90 00 01 00 01 02 7B 03 E8 01 0F

01 0F 02 26 00 01 03 2D 00 00 00 00 00 00

O cabeçalho repete a transação 42. O comprimento agora é 0x21 = 33 bytes: 1 da unidade, 1 da função, 1 do contador e 30 de dados. O byte 0x1E = 30 é o contador de bytes de dados: 15 registradores de 2 bytes. Em seguida vêm os valores, na ordem dos endereços.

Decodificação completa

END.	TAG	BYTES	DECIMAL	ESCALA	VALOR	INTERPRETAÇÃO
0	LT_TQ01_NIVEL	02 4A	586	÷10	58,6 %	nível abaixo do SP
1	SP_TQ01_NIVEL	02 58	600	÷10	60,0 %	setpoint
2	LIC01_MV	02 90	656	÷10	65,6 %	PID pedindo mais abertura
3	LIC01_AUTO	00 01	1	-	1	automático
4	ESTRATEGIA	00 01	1	-	1	PID na LV-01
5	ZT_LV01_POS	02 7B	635	÷10	63,5 %	haste ainda atrás da MV
6	SC_BOMBA01_VEL	03 E8	1000	÷10	100,0 %	bomba a 60 Hz
7	FT_ENTRADA_VAZAO	01 0F	271	÷100	2,71 m³/h	
8	FT_SAIDA_VAZAO	01 0F	271	÷100	2,71 m³/h	entrada já iguala a saída
9	HV01_ABERTURA	02 26	550	÷10	55,0 %	novo consumo
10	M_BOMBA01_LIGA	00 01	1	-	1	bomba ligada
11	P_BOMBA_KW	03 2D	813	÷1000	0,813 kW	
12	AL_TQ01_NIVEL_ALTO	00 00	0	-	0	sem alarme
13	AL_TQ01_NIVEL_BAIXO	00 00	0	-	0	sem alarme
14	FALHA_BOMBA01	00 00	0	-	0	sem falha

O QUE OS NÚMEROS CONTAM

Mesmo sem olhar o sinótico, a resposta conta a história do processo: o nível (58,6 %) está abaixo do setpoint (60 %); o PID elevou a saída para 65,6 %; a haste (63,5 %) ainda está chegando lá, por causa do atraso do atuador; e a vazão de entrada (2,71 m³/h) acabou de igualar a de saída, então o nível vai parar de cair. Ler dados brutos com esse raciocínio é a competência que se quer desenvolver.

6.9 Exemplo 2: a mesma leitura com o inversor em operação

Situação: a mesma perturbação do Exemplo 1 (HV-01 aberta de 40 % para 55 %), agora com a estratégia PID no inversor. O pedido é idêntico; a resposta muda.

CLP → supervísório

00 2E 00 00 00 21 01 03 1E

02 4C 02 58 01 F2 00 01 00 02 03 E5 02 BB 01 08

01 10 02 26 00 01 01 8D 00 00 00 00 00 00

END.	TAG	BYTES	VALOR	NO EXEMPLO 1	INTERPRETAÇÃO
0	LT_TQ01_NIVEL	02 4C	58,8 %	58,6 %	perturbação semelhante
2	LIC01_MV	01 F2	49,8 %	65,6 %	agora a MV comanda a velocidade
4	ESTRATEGIA	00 02	2	1	PID no inversor
5	ZT_LV01_POS	03 E5	99,7 %	63,5 %	LV-01 aberta; parou a 0,3 % do fim por causa da zona morta
6	SC_BOMBA01_VEL	02 BB	69,9 %	100,0 %	41,9 Hz
7	FT_ENTRADA_VAZAO	01 08	2,64 m³/h	2,71 m³/h	entrada ainda abaixo da saída
8	FT_SAIDA_VAZAO	01 10	2,72 m³/h	2,71 m³/h	
11	P_BOMBA_KW	01 8D	0,397 kW	0,813 kW	metade da potência

Os registradores 1, 3, 9, 10, 12, 13 e 14 têm os mesmos valores do Exemplo 1 e foram omitidos.

O QUE A COMPARAÇÃO MOSTRA

Diante da mesma perturbação, o inversor entrega praticamente a mesma vazão com 0,397 kW, contra 0,813 kW da válvula: 51 % menos potência. A leitura dos registradores 5 e 6 revela a estratégia em uso sem olhar a tela: com a válvula, a haste varia e a velocidade fica em 100 %; com o inversor, a haste fica aberta e a velocidade varia.

6.10 Exemplo 3: escrita do setpoint (FC06)

Situação: o operador muda o setpoint para 70,0 % no faceplate.

1. Valor com escala: $70,0 \times 10 = 700$.
2. Em hexadecimal: $700 = 0x02BC$ (Exemplo 6.2).
3. Endereço do SP_TQ01_NIVEL no mapa: 1 = $0x0001$.

supervisório → CLP

00 2B 00 00 00 06 01 06 00 01 02 BC

CLP → supervisório (eco)

00 2B 00 00 00 06 01 06 00 01 02 BC

Na função 6, a PDU tem só o endereço e o valor. A resposta de sucesso é idêntica ao pedido: o CLP devolve o telegrama como confirmação. Se o cliente não receber esse eco, deve considerar que a escrita não aconteceu.

6.11 Exemplo 4: escrita de vários registradores (FC16)

Situação: o operador quer passar o LIC-01 para manual com a saída em 50 % e, ao mesmo tempo, mudar o setpoint para 65 %. São três registradores consecutivos: SP (1), MV (2) e AUTO (3). Com a função 16, um único telegrama resolve.

REGISTRADOR	VALOR	INTEIRO	HEX
1 · SP	65,0 %	650	02 8A
2 · MV	50,0 %	500	01 F4
3 · AUTO	manual	0	00 00

supervisório → CLP

00 2C 00 00 00 0D 01 10 00 01 00 03 06 02 8A 01 F4 00 00

CLP → supervisório

00 2C 00 00 00 06 01 10 00 01 00 03

A PDU contém a função ($0x10 = 16$), o endereço inicial (1), a quantidade de registradores (3), o número de bytes de dados (6) e os valores. O comprimento do MBAP é 1 (unidade) + 1 (função) + 2 (endereço) + 2 (quantidade) + 1 (contador) + 6 (dados) = 13 = $0x0D$. A resposta confirma apenas o endereço e a quantidade escritos.

POR QUE USAR FC16

Com três escritas FC06 separadas, haveria um intervalo em que o controlador já estaria em manual, mas com a saída antiga. Com FC16, as três variáveis mudam juntas, no mesmo ciclo do CLP. Em sistemas reais, isso evita estados intermediários indesejados.

6.12 Exemplo 5: resposta de exceção

Situação: um aluno configura o supervisório para ler 20 registradores, mas o CLP só tem 15.

supervisório → CLP

00 2D 00 00 00 06 01 03 00 00 00 14

CLP → supervisório

00 2D 00 00 00 03 01 83 02

A resposta tem o código de função somado a 0x80 ($0x03 + 0x80 = 0x83$), o que sinaliza erro, seguido do código de exceção 02: endereço de dados ilegal.

CÓDIGO	NOME	CAUSA TÍPICA
01	função ilegal	o servidor não implementa a função pedida
02	endereço de dados ilegal	endereço ou quantidade fora do mapa
03	valor de dados ilegal	quantidade inválida ou valor fora da faixa aceita
04	falha do dispositivo servidor	erro interno ao executar o pedido
06	dispositivo ocupado	o servidor está processando um comando longo

6.13 Exemplo 6: a armadilha do endereço 40001

A documentação dos fabricantes costuma numerar os holding registers a partir de 40001, enquanto o telegrama usa endereços a partir de 0. A regra é: endereço no telegrama = referência – 40001.

ERRO CLÁSSICO DE INTEGRAÇÃO

Um aluno lê no dicionário que o setpoint está em 40002 e, por engano, coloca o endereço 2 no telegrama. Ele lerá a MV (65,6 %) pensando que é o setpoint. Nada dá erro, e o valor parece plausível, o que torna o problema difícil de detectar. Em campo, a checagem mais simples é comparar um valor conhecido: se o supervisório mostra o SP diferente do que está no painel do CLP, suspeite do deslocamento de uma posição.

6.14 Desempenho e temporização

A cada segundo, trafegam 12 bytes de pedido e 39 bytes de resposta, 51 bytes de dados Modbus. Somando os cabeçalhos de Ethernet, IP e TCP (cerca de 54 bytes por quadro) e as confirmações do TCP, o tráfego fica em torno de 300 bytes por segundo, menos de 0,003 % de uma rede de 100 Mbit/s.

O fator limitante, portanto, não é a rede, mas o tempo de resposta do servidor e o número de clientes. Três parâmetros precisam ser definidos no projeto:

- Período de varredura: deve ser bem menor que as constantes de tempo que se quer observar. Com atrasos de 1 a 3 s na planta, 1 s é suficiente para supervisão, mas seria lento para fechar uma malha de controle pela rede.
- Tempo limite (timeout): quanto o cliente espera antes de considerar o pedido perdido. Valores típicos ficam entre 0,5 e 2 s.
- Tentativas: quantas vezes repetir antes de sinalizar falha de comunicação ao operador.

LEITURA EM BLOCO

Ler os 15 registradores em um único pedido gera 51 bytes por segundo. Ler um por um exigiria 15 pedidos e 15 respostas, cerca de 15 vezes mais telegramas e 15 vezes mais tempo de espera. Por isso, variáveis lidas juntas devem ficar em endereços consecutivos, e essa é uma decisão tomada no dicionário de variáveis.

6.15 Segurança

O Modbus TCP não tem autenticação nem criptografia: qualquer equipamento na mesma rede pode ler e escrever registradores. Por isso, redes de automação devem ser segmentadas da rede corporativa, com firewall e lista de endereços autorizados. A variante Modbus/TCP Security acrescenta TLS, mas ainda é pouco difundida. Vale discutir com a turma o que aconteceria se alguém escrevesse 0 no registrador 4 (estratégia) durante a produção.

6.16 Como ler a seção Modbus da bancada

NOTA TÉCNICA

Na bancada, os telegramas são montados byte a byte exatamente como a especificação define, mas não trafegam por uma rede real, porque tudo roda dentro do navegador. Os mesmos bytes seriam enviados por um cliente Modbus TCP real para a porta 502 de um CLP.

Comunicação Modbus TCP

O supervisório lê 15 registradores a cada segundo

supervisório → CLP · leitura FC03 de 15 registradores a partir do 0 · transação 24
00 18 00 00 00 06 01 03 00 00 00 0F

CLP → supervisório · 30 bytes de dados

00 18 00 00 00 21 01 03 1E 02 BA 02 BC 02 9B 00 01 00 01 02 98 03 E8 01 2E 01 :

há 7 s · supervisório → CLP · escrita FC06 no registrador 1 (SP_TQ01_NIVEL) = 700 · setpoint 70,0 % · o CLP responde repetindo o telegrama

00 11 00 00 00 06 01 06 00 01 02 BC

há 10 s · supervisório → CLP · escrita FC06 no registrador 9 (HV01_ABERTURA) = 550 · abertura da HV-01 55 % · o CLP responde repetindo o telegrama

00 0D 00 00 00 06 01 06 00 09 02 26

cabeçalho MBAP código de função endereço, quantidade e dados escrita (FC06)

END.	TAG	BRUTO	ESCALA	VALOR
0	LT_TQ01_NIVEL	698	x10	69,8 %
1	SP_TQ01_NIVEL	700	x10	70,0 %
2	LIC01_MV	667	x10	66,7 %
3	LIC01_AUTO	1	x1	auto
4	ESTRATEGIA	1	x1	válvula
5	ZT_LV01_POS	664	x10	66,4 %
6	SC_BOMBA01_VEL	1000	x10	100,0 %
7	FT_ENTRADA_VAZAO	302	x100	3,02 m³/h
8	FT_SAIDA_VAZAO	296	x100	2,96 m³/h
9	HV01_ABERTURA	550	x10	55,0 %
10	M_BOMBA01_LIGA	1	x1	1
11	P_BOMBA_KW	852	x1000	0,852 kW
12	AL_TQ01_NIVEL_ALTO	0	x1	0
13	AL_TQ01_NIVEL_BAIXO	0	x1	0
14	FALHA_BOMBA01	0	x1	0

Figura 13 Seção Comunicação Modbus TCP. No alto, o último pedido de leitura e sua resposta; abaixo, as escritas mais recentes; por fim, a tabela de registradores com valor bruto, escala e valor convertido.

- Cores: cinza para o cabeçalho MBAP, azul para o código de função de leitura, âmbar para o código de escrita.
- A primeira linha de cada bloco descreve em português o que o telegrama faz, incluindo o número da transação.
- As três escritas mais recentes ficam visíveis com a indicação "há X s", para que possam ser analisadas com calma.
- A tabela destaca o registrador 0 e mostra lado a lado o inteiro recebido e o valor convertido. A resposta é longa e pode ser rolada lateralmente.

7 Aquisição, armazenamento e dicionário de variáveis

Dados só viram evidência se forem gravados de forma organizada, com nome, unidade e origem conhecidos. O coletor da bancada aplica essas regras automaticamente.

7.1 O coletor de dados

O coletor grava uma amostra por segundo de processo, com todas as variáveis, em um arquivo CSV. Cada ensaio tem rótulo e duração definidos pelo operador.

Coletor de dados

Uma amostra por segundo de processo em 05_dados/brutos

RÓTULO: valvula DURAÇÃO: 300 s **Iniciar ensaio**

☒ Ensaio padronizado: a HV-01 segue o mesmo perfil de abertura em todos os ensaios

Nenhum ensaio em andamento. Destino: 05_dados/brutos/

05_dados/exemplo_plano_b/exemplo_ensaio_inversor.csv 600 amostras · PID no inversor · plano B, gerado ao abrir a página	Ver	Baixar CSV
05_dados/exemplo_plano_b/exemplo_ensaio_valvula.csv 600 amostras · PID na LV-01 · plano B, gerado ao abrir a página	Ver	Baixar CSV
05_dados/exemplo_plano_b/exemplo_ensaio_liga_desliga.csv 600 amostras · liga/desliga · plano B, gerado ao abrir a página	Ver	Baixar CSV

Figura 14 Coletor de dados com a lista de ensaios.

7.2 Nome do arquivo

```
2026-09-29_1614_ensaio_valvula.csv
```

Data no formato ano-mês-dia, hora e minuto, a palavra ensaio e o rótulo. Com essa convenção, os arquivos aparecem em ordem cronológica em qualquer gerenciador de arquivos, e o rótulo diz o que foi testado sem precisar abrir o arquivo.

7.3 Estrutura do CSV

COLUNA	EXEMPLO	COLUNA	EXEMPLO
timestamp	2026-09-29T16:14:07	FT_SAIDA_VAZAO	2.71
LT_TQ01_NIVEL	58.6	HV01_ABERTURA	55.0
SP_TQ01_NIVEL	60	M_BOMBA01_LIGA	1
LIC01_MV	65.6	P_BOMBA_KW	0.813
ZT_LV01_POS	63.5	AL_TQ01_NIVEL_ALTO	0
SC_BOMBA01_VEL	100	AL_TQ01_NIVEL_BAIXO	0
FT_ENTRADA_VAZAO	2.71	FALHA_BOMBA01	0
		ESTRATEGIA	valvula

Os nomes das colunas são as mesmas TAGs do dicionário e do mapa Modbus. Assim, a mesma variável tem um único nome em todo o projeto. O CSV usa ponto como separador decimal (padrão internacional), ao contrário da tela, que usa vírgula.

7.4 O ensaio padronizado

Para comparar estratégias de forma justa, todas precisam enfrentar o mesmo distúrbio. Com a opção de ensaio padronizado marcada, a HV-01 segue um perfil fixo de aberturas (31, 47, 39, 54, 23 e 43 %, trocando a cada 60 s, com uma pequena oscilação), sempre a partir do início do ensaio. Durante o ensaio, o campo da HV-01 fica bloqueado; ao final, a abertura manual anterior é restaurada.

EXEMPLO PRÁTICO

Se uma equipe testasse o liga/desliga com a HV-01 em 30 % e o inversor com a HV-01 em 55 %, o inversor pareceria gastar mais energia, simplesmente porque bombeou mais água contra um nível diferente. O consumo específico (kWh/m³) reduz esse efeito, mas não o elimina. O ensaio padronizado resolve o problema na origem.

7.5 O dicionário de variáveis

O dicionário é o documento que dá significado a cada número. Na bancada, ele contém: TAG, descrição, unidade, registrador, escala e acesso. Em um projeto de equipe, recomenda-se também: faixa de valores, origem (sensor, cálculo ou operador), taxa de amostragem e responsável.

REGRAS DE NOMENCLATURA

- função ISA + equipamento + grandeza: LT_TQ01_NIVEL;
- maiúsculas, sem acentos e sem espaços;
- um nome por variável em todo o projeto: no CLP, no Modbus, no CSV e nos gráficos.

7.6 Estrutura de pastas sugerida

PASTA	CONTEÚDO
01_requisitos/	requisitos e especificações
02_documentacao/	diagramas, dicionário de variáveis
03_programas/	programa do CLP, supervisor, coletor
04_simulacao/	modelos e simuladores
05_dados/brutos/	ensaios como foram gravados; nunca são editados
05_dados/tratados/	dados processados e resumos
06_analises/	scripts e gráficos
07_testes/	roteiros e resultados de testes
08_apresentacao/	material da apresentação final

8 Indicadores técnicos e gerenciais

Um indicador só é útil se tiver fórmula definida, fonte de dados conhecida e se ajudar a tomar uma decisão. A bancada calcula catorze indicadores para cada ensaio.

8.1 Fórmulas

INDICADOR	CÁLCULO (AMOSTRAS DE 1 S)	TIPO
Energia consumida	soma de P_BOMBA_KW $\times$ 1 s $\div$ 3600 (kWh)	energia
Volume bombeado	soma de FT_ENTRADA_VAZAO $\times$ 1 s $\div$ 3600 (m ³)	produção
Consumo específico	energia $\div$ volume (kWh/m ³)	eficiência
Tempo fora da faixa	amostras com nível fora de 55 a 65 % $\div$ total	qualidade
Erro médio	média de nível – setpoint	qualidade
Bomba ligada	amostras com a bomba ligada $\div$ total	operação
Partidas por hora	transições de desligada para ligada $\div$ horas	desgaste
Curso da haste da LV-01	soma das variações de posição $\div$ horas (%/h)	desgaste
Alarmes	ocorrências de AH ou AL	eventos
Falhas	ocorrências de falha da bomba	eventos
Disponibilidade	1 – tempo em falha $\div$ tempo total	disponibilidade
MTTR	tempo em falha $\div$ número de falhas	manutenção
Amostras válidas	amostras gravadas $\div$ amostras esperadas	qualidade dos dados

8.2 Resultados dos ensaios de referência

A bancada abre com três ensaios de exemplo, de 600 s cada, com o perfil padronizado da HV-01 e setpoint de 60 %.

INDICADOR	LIGA/DESLIGA	PID NA LV-01	PID NO INVERSOR
Energia (kWh)	0,080	0,122	0,049
Volume (m³)	0,354	0,348	0,348
Consumo específico (kWh/m³)	0,227	0,350	0,142
Tempo fora da faixa	71,0 %	2,2 %	2,5 %
Erro médio	8,64 %	0,88 %	0,92 %
Bomba ligada	45,0 %	99,8 %	99,8 %
Partidas por hora	36	6	6
Curso da LV-01 (%/h)	598	2549	598

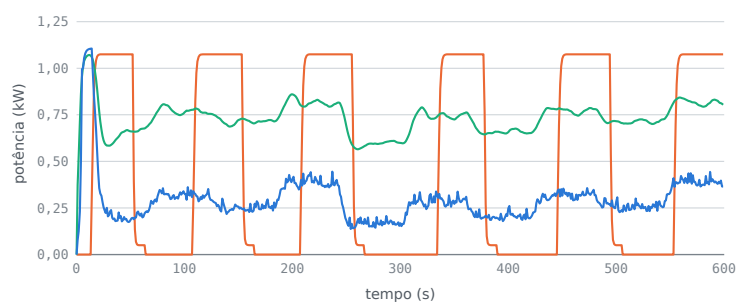


Figura 15 Potência da bomba nas três estratégias (laranja: liga/desliga; verde-água: PID na LV-01; azul: PID no inversor).

8.3 Como interpretar

- **Energia:** o inversor consome 59 % menos energia por metro cúbico que a válvula, confirmando a análise das curvas da Figura 4. O liga/desliga fica no meio: não há estrangulamento, mas a bomba opera sempre em vazão máxima (cerca de 4,7 m³/h), onde as perdas por atrito na tubulação, proporcionais ao quadrado da vazão, são muito maiores. O inversor bombeia a mesma água de forma contínua, em vazão menor.
- **Qualidade:** as duas estratégias com PID mantêm o nível na especificação; o liga/desliga passa 71 % do tempo fora dela.
- **Desgaste:** o liga/desliga causa 36 partidas por hora, o que aquece e desgasta o motor. A válvula acumula 2549 % de curso por hora, desgastando gaxeta e atuador.

LEITURA CRÍTICA DOS DADOS

Nos ensaios de 10 minutos, a única partida da bomba (nas estratégias com PID) vira 6 partidas por hora, e a abertura inicial da LV-01 de 0 a 100 % vira 598 %/h. São efeitos da partida, extrapolados para uma hora. Indicadores por hora calculados em ensaios curtos precisam dessa ressalva, e é um bom exemplo de como declarar as limitações dos próprios dados.

Nenhuma estratégia vence em todos os indicadores. A escolha depende do que importa para o projeto: custo de energia, qualidade do produto, vida útil dos equipamentos ou custo de implantação. Esse é o papel dos indicadores: transformar opinião em decisão justificada.

9 Controle de versões

O controle de versões registra quem mudou o quê, quando e por quê. Em um projeto de equipe, ele é a memória do trabalho e a origem das evidências apresentadas.

9.1 O ciclo básico

COMANDO	O QUE FAZ
<code>git status</code>	Mostra arquivos novos e modificados desde o último registro
<code>git add .</code>	Prepara todas as mudanças para o próximo registro
<code>git commit -m "..."</code>	Cria o registro (commit) com uma mensagem descritiva
<code>git log --oneline</code>	Lista o histórico de registros

Na bancada, cada ensaio concluído aparece como arquivo não rastreado, e o botão "Salvar resumo e gráfico no projeto" marca o resumo e o gráfico como modificados. O terminal simulado mostra as mesmas mensagens que o Git real mostraria.

9.2 Boas mensagens de commit

EVITE	PREFIRA
atualização	Ensaio das três estratégias com perfil padronizado
arrumei	Corrige escala da potência no dicionário (x1000)
teste 2 final agora vai	Sintonia Kp 8 Ti 60 s: sobressinal 16 %

Uma boa mensagem permite responder, meses depois, à pergunta "como a equipe chegou a este número?" sem depender da memória de ninguém.

10 Roteiro da prática

A prática pode ser conduzida pelo professor, como demonstração, ou executada pelas próprias equipes. Os passos seguem a ordem lógica do sistema: entender a planta, operar, comunicar, coletar, controlar, analisar e registrar. O mesmo roteiro aparece no alto da bancada.

PASSO	TEMA	DURAÇÃO SUGERIDA	O QUE FAZER
1	Cenário e malha	4 min	Percorrer o P&ID e a malha LT-01, LIC-01, LY-01, LV-01. Identificar a HV-01 como distúrbio. Registrar a hipótese inicial: qual estratégia deve gastar menos energia?
2	Dicionário	3 min	Identificar padrão de TAG, escala e acesso de cada variável.
3	Operação e rede	3 min	Iniciar o processo. Observar a leitura FC03. Alterar a HV-01 e observar a escrita FC06 no registrador 9.
4	Liga/desliga	4 min	Estratégia liga/desliga, velocidade 20x, ensaio padronizado de 300 s.
5	PID na LV-01	4 min	Observar MV, pressão no I/P e atraso da haste. Ensaio padronizado de 300 s.
6	PID no inversor	4 min	Observar referência de velocidade, frequência e potência. Ensaio padronizado de 300 s.
7	Sintonia	5 min	Degrau de +10 %; dobrar Kp; aumentar Ti; Td = 5 s; teste em manual.
8	Indicadores	5 min	Comparar os ensaios e confrontar os resultados com a hipótese inicial.
9	Versões	3 min	git status, commit com mensagem descritiva e git log.

10.1 Registros esperados

Ao final da prática, cada equipe deve reunir os itens abaixo. Se não houver tempo para coletar os ensaios, os três ensaios de referência já carregados na bancada produzem os resultados da seção 8.2 e podem ser usados na análise.

1. os três arquivos CSV dos ensaios, nomeados conforme a convenção da seção 7.2;
2. a tabela comparativa de indicadores e o resumo em CSV;
3. o resultado de pelo menos dois degraus de setpoint com sintonias diferentes (sobressinal e tempo de acomodação);
4. um commit com mensagem descritiva e a saída do git log;
5. um parágrafo que confronte os resultados com a hipótese inicial.

APLICAÇÃO A PROJETOS

Depois da prática, cada equipe deve conseguir responder, para o próprio projeto: quais ferramentas vai usar, quais variáveis entram no dicionário e com que escala, como os dados serão nomeados e guardados, quais indicadores serão apresentados e quem é responsável por cada parte. Essas respostas formam a base do plano de ferramentas e dados do projeto.

11 Exercícios

Os exercícios 1 a 8 tratam da comunicação Modbus TCP; os de 9 a 14, do controle, do acionamento e dos indicadores. Use o mapa de registradores da seção 6.6.

1. O registrador 7 chegou como `00 E6`. Qual é a vazão de entrada?
2. Converta para os dois bytes transmitidos: nível de 45,3 %; potência de 1,025 kW; abertura da HV-01 de 100 %.
3. Monte o telegrama completo (MBAP e PDU) que escreve a abertura de 30 % na HV-01, usando a transação 0x0050.
4. O supervisor quer ler apenas o nível e o setpoint. Escreva a PDU do pedido e calcule o campo de comprimento da resposta.
5. Uma resposta chegou como `00 51 00 00 00 03 01 86 02`. O que aconteceu? Proponha uma causa.
6. Monte a PDU de uma escrita FC16 que coloca o LIC-01 em automático (registrador 3) e muda a estratégia para inversor (registrador 4).
7. A documentação diz que a abertura da HV-01 está em 40010. Qual endereço vai no telegrama? Que valor seria lido se o aluno usasse 10 por engano, no retrato do Exemplo 1?
8. Um novo sensor de temperatura mede de -20 a 120 °C com resolução de $0,1$ °C. Proponha escala e tipo de dado, e codifique $-4,7$ °C.
9. Com $MV = 30$ %, qual a corrente enviada ao LY-01 e a pressão aplicada à LV-01?
10. Explique por que o nível ultrapassa os limites de 45 e 75 % no liga/desliga, mesmo com o controlador atuando exatamente nesses valores.
11. Um ensaio de 5 minutos registrou 0,061 kWh e $0,212$ m³. Calcule o consumo específico e compare com os ensaios de referência.
12. A bomba falhou duas vezes em um ensaio de 600 s, ficando parada 45 s e 75 s. Calcule a disponibilidade e o MTTR.
13. Com o PID no inversor, a saída do LIC-01 vale 25 %. Qual a referência de velocidade, a frequência e o valor esperado nos bytes do registrador 6 quando o motor atingir essa velocidade? A bomba entrega vazão nessa condição?
14. Pelas leis de afinidade, o que aconteceria com vazão, altura e potência se a velocidade caísse de 100 % para 70 %? Por que a economia observada na bancada é menor que a ideal?

12 Gabarito

1. $0x00E6 = 14 \times 16 + 6 = 230$. Com escala $\times 100$, a vazão é $2,30 \text{ m}^3/\text{h}$.
2. $45,3 \% \rightarrow 453 = 1 \times 256 + 197 \rightarrow 01 \text{ C5}$. $1,025 \text{ kW} \rightarrow 1025 = 4 \times 256 + 1 \rightarrow 04 01$. $100 \% \rightarrow 1000 = 3 \times 256 + 232 \rightarrow 03 \text{ E8}$.
3. $30 \% \rightarrow 300 = 0x012C$. Telegrama: `00 50 00 00 00 06 01 06 00 09 01 2C`. A resposta de sucesso é idêntica.
4. PDU do pedido: `03 00 00 00 02`. A resposta tem 1 (unidade) + 1 (função) + 1 (contador) + 4 (dados) = 7 bytes após o comprimento, logo o campo vale `00 07`.
5. $0x86 = 0x06 + 0x80$: exceção na função 6 (escrita de um registrador), código 02, endereço ilegal. Causa provável: tentativa de escrever em um endereço acima de 14.
6. `10 00 03 00 02 04 00 01 00 02`: função 16, endereço 3, 2 registradores, 4 bytes, AUTO = 1, ESTRATEGIA = 2.
7. $40010 - 40001 = 9$. Com o endereço 10, o aluno leria M_BOMBA01_LIGA = 1 e interpretaria a HV-01 como $0,1 \% (1 \div 10)$, um valor errado mas sem nenhuma mensagem de erro.
8. Escala $\times 10$ e inteiro com sinal de 16 bits (-200 a 1200 cabem com folga em -32768 a 32767). $-4,7^\circ\text{C} \rightarrow -47 \rightarrow 65536 - 47 = 65489 = \text{FF D1}$.
9. $I = 4 + 16 \times 0,30 = 8,8 \text{ mA}$. $P = 3 + 12 \times 0,30 = 6,6 \text{ psi}$.
10. Há atrasos na malha: o transmissor responde com constante de $1,5 \text{ s}$ e ruído, o motor leva cerca de $0,8 \text{ s}$ para acelerar e $2,5 \text{ s}$ para parar, e a coluna de água leva 1 s para mudar a vazão. Quando o controlador percebe que o nível chegou a 75% e desliga a bomba, ainda entra água por alguns segundos.
11. $0,061 \div 0,212 = 0,288 \text{ kWh/m}^3$. Fica entre o liga/desliga ($0,227$) e a válvula ($0,350$), o que sugere PID na válvula em condições menos exigentes, ou liga/desliga com muitas partidas. É preciso consultar a estratégia e o perfil usados antes de concluir.
12. Tempo em falha = 120 s . Disponibilidade = $1 - 120/600 = 80 \%$. MTTR = $120/2 = 60 \text{ s}$.
13. Referência = $40 + 0,6 \times 25 = 55 \%$, que corresponde a $60 \times 0,55 = 33 \text{ Hz}$. Registrador 6: $55,0 \times 10 = 550 = 02 26$. Entrega vazão, porque 55% está acima do limite de 50% ($60 \times 0,55^2 = 18,2 \text{ m}$, maior que os 15 m de altura estática), mas pouca: cerca de $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$.
14. Idealmente, a vazão cairia para 70% , a altura para 49% e a potência para 34% . Na bancada, a bomba precisa sempre vencer 15 m de altura estática, então a vazão cai mais que proporcionalmente e a potência não segue o cubo da velocidade. Além disso, há perdas fixas (auxiliares) e os rendimentos do motor e do inversor.

A Parâmetros do modelo e glossário

A.1 Parâmetros

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
Área do tanque	0,1 m ²	Altura útil	1,0 m
Altura da bomba em vazão zero	60 m	Altura estática	15 m
Coeficiente da HV-01 (K_v)	6,45	C_v equivalente da LV-01	2,236
Rangeabilidade da LV-01	50	Zona morta da LV-01	0,3 %
Constante do atuador da LV-01	2,5 s	Constante do transmissor	1,5 s
Aceleração na partida direta	0,8 s	Parada por inércia	2,5 s
Rampa do inversor	20 %/s	Velocidade mínima	40 %
Rendimento do motor	85 %	Rendimento do inversor	97 %
Histerese do liga/desliga	45 a 75 %	Faixa de especificação	55 a 65 %
Passo de integração	0,05 s	Período de varredura Modbus	1 s

O modelo é didático e simplificado. Os valores foram escolhidos para produzir fenômenos realistas em escala de tempo adequada a uma prática de laboratório, e não para dimensionar uma instalação real.

A.2 Glossário

Anti-windup	Mecanismo que impede a integral do PID de acumular enquanto a saída está saturada.
Big-endian	Ordem em que o byte mais significativo é transmitido primeiro. É a ordem do Modbus.
Consumo específico	Energia gasta por unidade produzida; aqui, kWh por metro cúbico bombeado.
Faceplate	Janela de operação de um controlador no supervísório.
Holding register	Área de dados Modbus de 16 bits, com leitura e escrita.
IHM / SCADA	Interface homem-máquina; sistema de supervisão, controle e aquisição de dados.
MBAP	Modbus Application Protocol header: cabeçalho de 7 bytes do Modbus TCP.
MTTR	Tempo médio para reparo.
MV	Variável manipulada: a saída do controlador.
P&ID	Diagrama de tubulação e instrumentação.
PDU	Protocol Data Unit: código de função mais dados, comum a todas as versões do Modbus.
PV / SP	Variável de processo (valor medido) e setpoint (valor desejado).
Rangeabilidade	Razão entre a maior e a menor vazão controlável de uma válvula.
Sobressinal	Quanto a variável ultrapassa o novo setpoint após um degrau, em porcentagem do degrau.
Varredura (polling)	Leitura periódica feita pelo cliente, já que o servidor não envia dados por iniciativa própria.