



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PTC3418 – Laboratório de Automação

LAB3

Controle de Processo Industrial

Memorial Descritivo

Unidade de Aquecimento de Água de Alimentação

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Resumo executivo | 3 |
| 2 | Descrição do processo | 3 |
| 2.1 | Operação | 3 |
| 2.2 | Especificações e condições ambientais e operacionais | 5 |
| 2.3 | Regime estacionário..... | 5 |
| 2.4 | Restrições operacionais | 7 |
| 2.4.1 | Tanque de acumulação | 7 |
| 2.4.2 | Tanque de alimentação..... | 7 |
| 3 | Instrumentação e controle | 8 |
| 3.1 | Entradas e saídas..... | 8 |
| 3.1.1 | Sensores | 8 |
| 3.2 | Descrição do sistema de controle | 12 |
| 3.3 | Arquitetura do sistema de controle..... | 13 |
| 3.3.1 | Arquitetura proposta | 13 |
| 3.3.2 | Implementação em ambiente virtual | 17 |
| 3.3.3 | Mapeamento do servidor Modbus | 18 |
| 3.4 | Malhas de controle | 20 |
| 3.4.1 | Malhas de regulação | 20 |
| 3.4.2 | Lógicas operacionais | 21 |
| 3.4.3 | Lógicas de proteção | 22 |
| 4 | Referências..... | 23 |

1 Resumo executivo

Este documento apresenta a unidade de aquecimento de linha de água de alimentação, incluindo uma descrição do processo, suas entradas e saídas (atuadores e sensores), especificações gerais e condições operacionais, além de propostas para a arquitetura do sistema de controle e requisitos operacionais e de segurança.

2 Descrição do processo

2.1 Operação

A unidade de aquecimento da linha de água de alimentação destina-se a prover uma instalação industrial (não descrita neste documento) de água à temperatura constante de 40 °C nas vazões demandadas pela instalação.

Ela é composta de um tanque de alimentação com uma linha de entrada de vazão ajustável e uma linha de saída. O tanque de alimentação possui um agitador para uniformização da temperatura e está ligado a um trocador de calor, utilizado para aquecer a água do processo.

O trocador de calor possui um tanque de acumulação preenchido por um fluido de aquecimento, mantido à temperatura constante de 80 °C por um aquecedor elétrico de potência ajustável e um sistema de circulação de vazão ajustável por meio de uma bomba de velocidade variável. O tanque de acumulação também possui um agitador para uniformização de temperatura.

O nível do tanque de alimentação é mantido constante pela modulação da vazão proveniente da linha de água geral. Note que a temperatura desta linha de água não é constante e pode variar entre 10 °C e 30 °C, daí a necessidade da unidade de aquecimento.

A Figura 2-1 mostra um diagrama da unidade.

A instalação industrial demanda água, que é retirada do tanque de alimentação (TAL). Para compensar a retirada de água do tanque, é feita a reposição a partir da linha de água geral (LAG). A válvula de alimentação (VAL) modula esta reposição de modo que o nível do tanque de alimentação permaneça constante.

Idealmente, a temperatura da água no tanque de alimentação deve ser igual à 40 °C para que ele possa fornecer água a esta temperatura para a linha de água de alimentação (LAA). Como a temperatura da linha de água geral é bem mais baixa, um trocador de calor é utilizado para aquecer o conteúdo do tanque. Fluido de aquecimento a 80 °C circula no circuito fechado do trocador de calor sem contato com a água do processo e aquece esta última por condução térmica nas paredes da tubulação. A troca de calor é tanto maior quanto maior for a vazão do fluido de aquecimento.

A temperatura no tanque de alimentação é controlada pela vazão do fluido de aquecimento, imposta pela bomba de circulação (BCA).

O fluido de aquecimento é armazenado no tanque de acumulação (TAC) e é mantido a 80 °C por um aquecedor (AQC) de potência controlada.

Para evitar o aparecimento de zonas quentes nas vizinhanças do aquecedor e do trocador de calor, agitadores (AGA) e (AGL) estão instalados nos taques de acumulação e alimentação, respectivamente, para uniformizar a distribuição de temperaturas e são ativados sempre que a diferença entre as temperaturas das fontes de calor e das saídas de cada tanque torna-se excessiva.

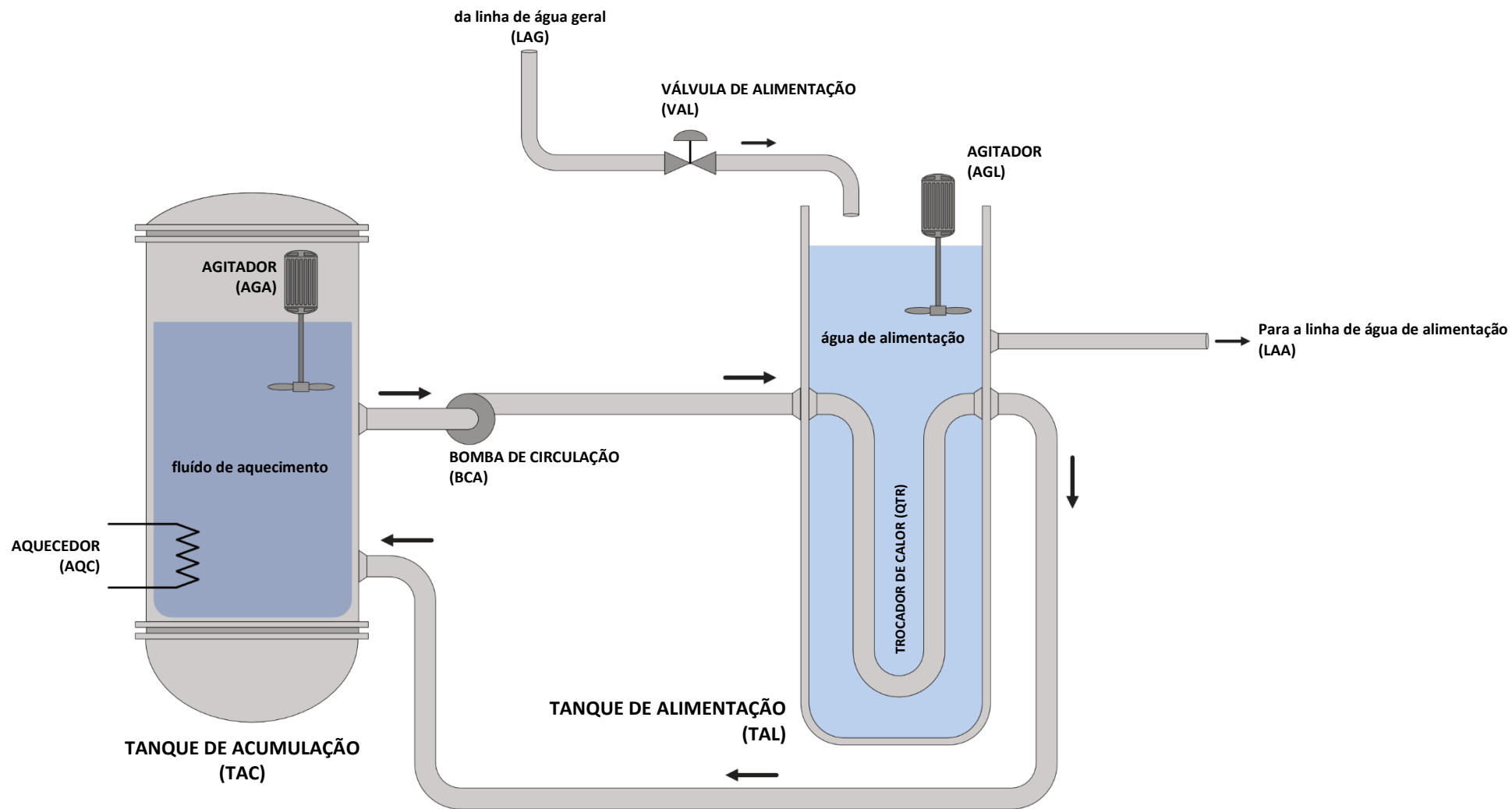


Figura 2-1 Unidade de aquecimento da linha de água de alimentação

2.2 Especificações e condições ambientais e operacionais

As especificações dos equipamentos e demais condições ambientais e operacionais da unidade da Figura 2-1 são dados pelas tabelas abaixo.

Tabela 2-1 Condições ambientais e operacionais do processo

| Variável | Valor | Observações |
|---------------------------------------|------------------|--|
| Pressão ambiente | 0 | Pressão ambiente ao nível do mar (assumida como referência). |
| Temperatura ambiente | 20 °C | Valor assumido constante durante a operação do sistema. Este valor afeta a perda de calor para o ambiente nos tanques de aquecimento e alimentação. |
| Pressão da linha de água geral | 0,1 bar | Valor assumido constante durante a operação do sistema. A linha de água geral é mantida pressurizada para garantir o suprimento do processo. Assume-se que a linha de água geral seja um suprimento inesgotável de água. |
| Temperatura da linha de água geral | 10 °C - 30 °C | A temperatura da linha de água geral varia dentro dessa faixa durante a operação normal do sistema. |
| Vazão da linha de água de alimentação | 10 l/s - 100 l/s | A vazão da linha de água de alimentação (por demanda da planta industrial) é variável dentro dessa faixa durante a operação normal do sistema. |

Tabela 2-2 Especificações dos equipamentos

| Equip. | Espec. | Valores | Observações |
|--------|------------|--|---|
| AGA | Operação | 0/1 (off/on) | Agitador ligado ou desligado. |
| AGL | Operação | 0/1 (off/on) | Agitador ligado ou desligado. |
| AQC | Potência | 0 – 100% | Potência variável. 100% corresponde a 7500 kW. |
| BCA | Operação | 0/1 (off/on) | Bomba ligada ou desligada. |
| | Velocidade | 0 – 100% | Velocidade variável. 100% corresponde a uma vazão de 261 l/s. |
| TAC | Dimensões | 1,20 m (diâmetro int.) 4,00 m (altura) | Tanque cilíndrico. |
| | Pressão | 0 | Pressão ambiente (na superfície do fluido) |
| | Fluído | Água | Água desmineralizada (circuito fechado) |
| TAL | Dimensões | 2,50 m (diâmetro. int.) 9,00 m (altura) | Tanque cilíndrico. |
| | Pressão | 0 | Pressão ambiente (na superfície da água) |
| VAL | Abertura | 0 – 100% | 0 = fechada; 100% = totalmente aberta A vazão através da válvula depende da abertura e da pressão na linha de água geral. Em condições normais, 100% de abertura equivale a 353 l/s. |
| | Tipo | Válvula Globo | A vazão em uma válvula globo típica é não linear em relação à abertura. |

2.3 Regime estacionário

Ausentes perturbações, com a temperatura da linha de água geral (LAG) em 20 °C e a vazão demandada na linha de água de alimentação de 50,01 l/s (50 kg/s), o sistema atinge regime estacionário nas condições operacionais nominais assinaladas na Figura 2-2.

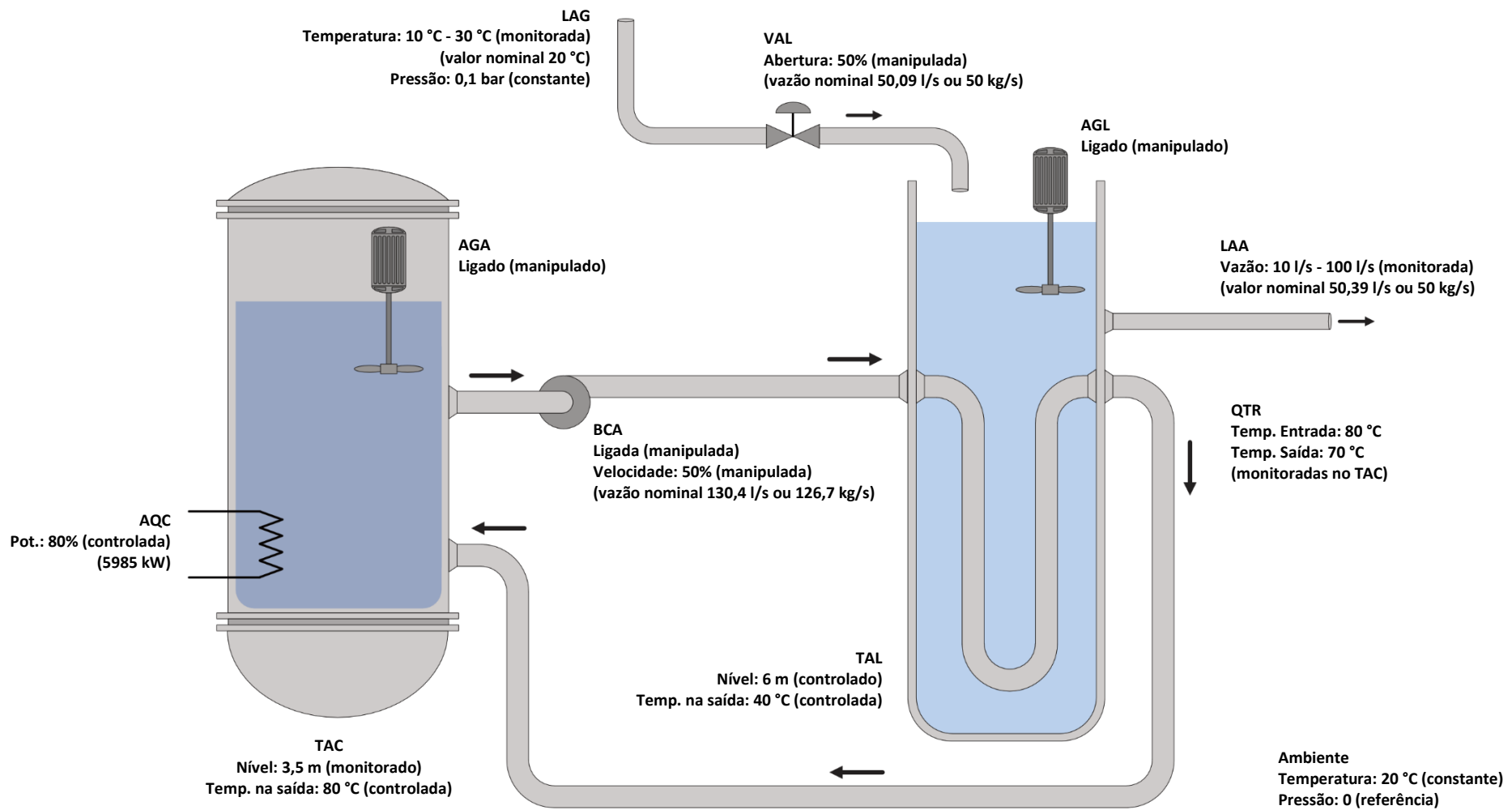


Figura 2-2 Condições operacionais nominais

2.4 Restrições operacionais

As restrições relacionadas à operação de cada equipamento estão relacionadas a seguir.

2.4.1 Tanque de acumulação

O nível no tanque de acumulação (TAC) durante a operação do sistema deve sempre se manter:

- i. acima do nível mínimo (3,00 m) para que a saída de circulação e o aquecedor (AQC) permaneçam submersos;
- ii. abaixo do nível máximo (4,00 m) para que o motor do agitador (AGA) não entre em contato com o fluido de aquecimento e não haja transbordo do tanque.

Note que o nível deste tanque, que opera em circuito fechado não é controlado, e deve ser monitorado.

A temperatura na saída de circulação deve se manter em 80 °C. Ao mesmo tempo, a temperatura do fluido nas vizinhanças do aquecedor (AQC) deve se manter abaixo de 90 °C para evitar que se atinja o fluxo crítico de calor no aquecedor. Este fenômeno ocorre quando há ebulição do fluido em volta do aquecedor, gerando uma película envolvente de vapor, dificultando que o fluido extraia calor do aquecedor, causando o seu superaquecimento.

Um sistema de controle deve manter a temperatura na saída de circulação constante e a temperatura do aquecedor deve ser monitorada.

A diferença de temperatura entre a saída de circulação e a vizinhança do aquecedor não deve ser maior do que 5 °C, o que indicaria má distribuição do calor no interior do tanque. O agitador (AGA) deve ser acionado para manter essa diferença dentro dos limites operacionais.

2.4.2 Tanque de alimentação

O nível no tanque de alimentação (TAL) durante a operação do sistema deve sempre se manter:

- i. acima do nível mínimo (5,00 m) para que a saída de alimentação e o trocador de calor (QTR) permaneçam submersos;
- ii. abaixo do nível máximo (8,00 m) para que o motor do agitador não entre em contato com a água e não haja transbordo do tanque.

Note que o nível deste tanque é controlado e deve se manter em 6,00 m mesmo com diferentes vazões de água de alimentação. Isso é feito controlando-se a vazão de entrada através de atuações na válvula de alimentação (VAL).

A temperatura na saída de alimentação (LAA) deve-se manter em 40 °C. Ao mesmo tempo, a diferença de temperatura entre a saída de alimentação e a água nas vizinhanças do trocador de calor deve se manter abaixo de 10 °C. O agitador (AGL) deve ser acionado para manter essa diferença dentro dos limites operacionais.

A temperatura neste tanque é controlada pelo trocador de calor através da variação da velocidade da bomba de circulação (BCA). Quanto maior a velocidade, maior o calor transmitido ao tanque pelo trocador de calor.

3 Instrumentação e controle

3.1 Entradas e saídas

A unidade de aquecimento possui diversas entradas (associadas a atuadores) e saídas (associadas a sensores) utilizadas para monitoração e controle. A Figura 3-1 apresenta os sensores e atuadores disponíveis na unidade de aquecimento de água de alimentação.

3.1.1 Sensores

A simbologia e os códigos para os sensores seguem a norma ANSI/ISA 5.1, comumente utilizada em controle de processos (veja [1]).

Os sensores relacionados na figura (as bolhas em vermelho) possuem códigos ou *tags*. Os códigos seguem a estrutura da norma e possuem dois campos: um grupo de letras seguido de um grupo de números, eventualmente seguido de um sufixo alfabético (a, b, c).

O primeiro campo é denominado **identificação funcional** do instrumento:

- A primeira letra indica o tipo da variável de processo considerada. Na figura temos:

| | |
|-----------------|-----------------------|
| F (Flow) | Indicando vazão |
| L (Level) | Indicando nível |
| P (Pressure) | Indicando pressão |
| T (Temperature) | Indicando temperatura |

- As demais letras indicam a função do instrumento. Na figura temos as seguintes combinações:

| | |
|-------------------|--|
| _SL (Switch Low) | Indica uma chave acionada quando o valor da variável é baixo, por exemplo: LSL significa uma chave ou relé acionada quando o nível atinge um valor baixo. Uma chave como essa poderia ser utilizada para acionar um alarme de nível baixo. |
| _SH (Switch High) | Indica uma chave acionada quando o valor da variável é alto. |
| _T (Transmitter) | Indica um transmissor, um sensor que transmite o sinal da variável para outro sistema ou instrumento, por exemplo para um mostrador ou um sistema de controle. |

O segundo campo é denominado identificação da malha. A cada malha é atribuído um número sequencial arbitrário. No caso da figura temos as seguintes malhas:

| | |
|-----|--|
| 010 | Nível do tanque de alimentação (TAL) |
| 020 | Temperatura do tanque de alimentação (TAL) |
| 030 | Vazão na válvula de alimentação (VAL) da linha de água geral (LAG) |
| 040 | Nível do tanque de acumulação (TAC) |
| 050 | Temperatura do tanque de acumulação (TAC) |
| 060 | Vazão na linha de água de alimentação (LAA) |
| 070 | Temperatura na linha de água geral (LAG) |
| 080 | Pressão na linha de água geral (LAG) |
| 090 | Vazão na bomba de circulação (BCA) do trocador de calor (QTR) |

Adicionalmente pode se incluir um sufixo para distinguir instrumentos que teriam o mesmo código. Por exemplo, na figura há três transmissores de temperatura na malha 050. Eles medem temperaturas em pontos diferentes do tanque, porém acabariam tendo os mesmos códigos, dada a estruturação da norma. Assim para distingui-los são usados os sufixos: TT-050a, TT-050b, TT-050c.

A Tabela 3-1 abaixo relaciona os sensores da unidade de aquecimento.

Tabela 3-1 Sensores da unidade de aquecimento de água de alimentação

| Malha | Equip. | Tag | Descrição |
|-------|--------|---------|--|
| 010 | TAL | LSL-010 | Chave de nível baixo do tanque de alimentação. "0" para nível acima do mínimo de 5,00 m, "1" para nível abaixo do mínimo. |
| | | LSH-010 | Chave de nível baixo do tanque de alimentação. "0" para nível abaixo do máximo de 8,00 m, "1" para nível acima do máximo. |
| | | LT-010 | Nível do tanque de alimentação. Produz um valor em metros na faixa de 0 a 10 m. Este sinal não deve ser utilizado para gerar alarmes de nível alto ou baixo. Usar as chaves de nível para funções de proteção. |
| 020 | TAL | TT-020a | Temperatura do tanque de alimentação, tomada próxima à saída de água de alimentação. Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. |
| | | TT-020b | Temperatura do tanque de alimentação, tomada próxima ao trocador de calor. Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. |
| 030 | VAL | FT-030 | Vazão na válvula de alimentação. Produz um valor em l/s na faixa de 0 a 400 l/s. |
| 040 | TAC | LSL-040 | Chave de nível baixo do tanque de acumulação. "0" para nível acima do mínimo de 3,00 m, "1" para nível abaixo do mínimo. |
| | | LSH-040 | Chave de nível alto do tanque de acumulação. "0" para nível abaixo do máximo de 4,00 m, "1" para nível acima do máximo. |
| | | LT-040 | Nível do tanque de acumulação. Produz um valor em metros na faixa de 0 a 5 m. Este sinal não deve ser utilizado para gerar alarmes de nível alto ou baixo. Usar as chaves de nível para funções de proteção. |
| 050 | TAC | TT-050a | Temperatura do tanque de acumulação, tomada próxima à saída de circulação. Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. |
| | | TT-050b | Temperatura do tanque de acumulação, tomada próxima ao aquecedor (AQC). Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. |
| | | TT-050c | Temperatura do tanque de acumulação, tomada próxima ao retorno da linha de circulação. Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. Em operação normal a temperatura de retorno é ligeiramente mais baixa que a temperatura de saída. |
| 060 | LAA | FT-060 | Vazão da linha de água de alimentação. Produz um valor em l/s na faixa de 0 a 400 l/s. |
| 070 | LAG | TT-070 | Temperatura da linha de água geral. Produz um valor em Celsius na faixa de 0 a 100 °C. |
| 080 | LAG | PT-080 | Pressão da linha de água geral. Produz um valor em bar na faixa de 0 (pressão atmosférica) a 1,0 bar. |
| 090 | QTR | FT-090 | Vazão na linha de circulação do trocador de calor e na bomba de circulação (BCA). Produz um valor em l/s na faixa de 0 a 300 l/s. |

Os atuadores assinalados na figura (setas em verde) estão relacionados na Tabela 3-2. Note que não há códigos para eles como para os sensores, e são usados os códigos de cada equipamento.

A norma ANSI/ISA 5.1 de fato prevê símbolos tanto para atuadores como para controladores, porém eles não serão utilizados neste documento por questões de conveniência.

Tabela 3-2 Atuadores da unidade de aquecimento de água de alimentação

| Atuador | Comando | Descrição |
|---------|-----------|--|
| AGA | AGA_OnOff | O agitador do tanque de acumulação é utilizado para uniformizar a temperatura da fluido de aquecimento. O agitador do tanque de alimentação é utilizado para uniformizar a temperatura da água em seu conteúdo. O nível lógico "0" desliga o agitador. O nível lógico "1" liga o agitador. |
| AGL | AGL_OnOff | O agitador do tanque de alimentação é utilizado para uniformizar a temperatura da água em seu conteúdo. O nível lógico "0" desliga o agitador. O nível lógico "1" liga o agitador. |
| AQC | AQC_Pot | O aquecedor é utilizado para manter a temperatura do tanque de acumulação no valor desejado (80 °C). Um valor comandado entre 0 e 100% produz uma potência entre 0 e 7500 kW (variação linear). Utilize o valor comandado 0 para desligar o aquecedor. |
| BCA | BCA_Vel | A bomba de circulação controla o fluxo de calor no trocador de calor (QTR). Quanto maior a velocidade da bomba, maior a taxa de transmissão de calor. A vazão volumétrica na linha de circulação é proporcional à velocidade da bomba. Utilize um valor comandado entre 0 e 100% para ajustar a velocidade da bomba. |
| | BCA_OnOff | Utilize este sinal para ligar e desligar a bomba de circulação. Note que quando a bomba é desligada, sua velocidade se anula independentemente do valor de velocidade comandado. O nível lógico "0" desliga a bomba. O nível lógico "1" liga a bomba |
| VAL | VAL_Pos | A válvula de alimentação repõe a água do tanque de alimentação (TAL) retirada pela linha de água de alimentação (LAA) com água da linha de água geral (LAG). A válvula é controlada por um valor comandado de abertura entre 0 (válvula fechada) e 100% (válvula totalmente aberta). Note que a vazão correspondente a cada abertura de válvula depende da pressão da linha de água geral e das características construtivas da válvula, e, portanto, a vazão não varia linearmente com a abertura. |

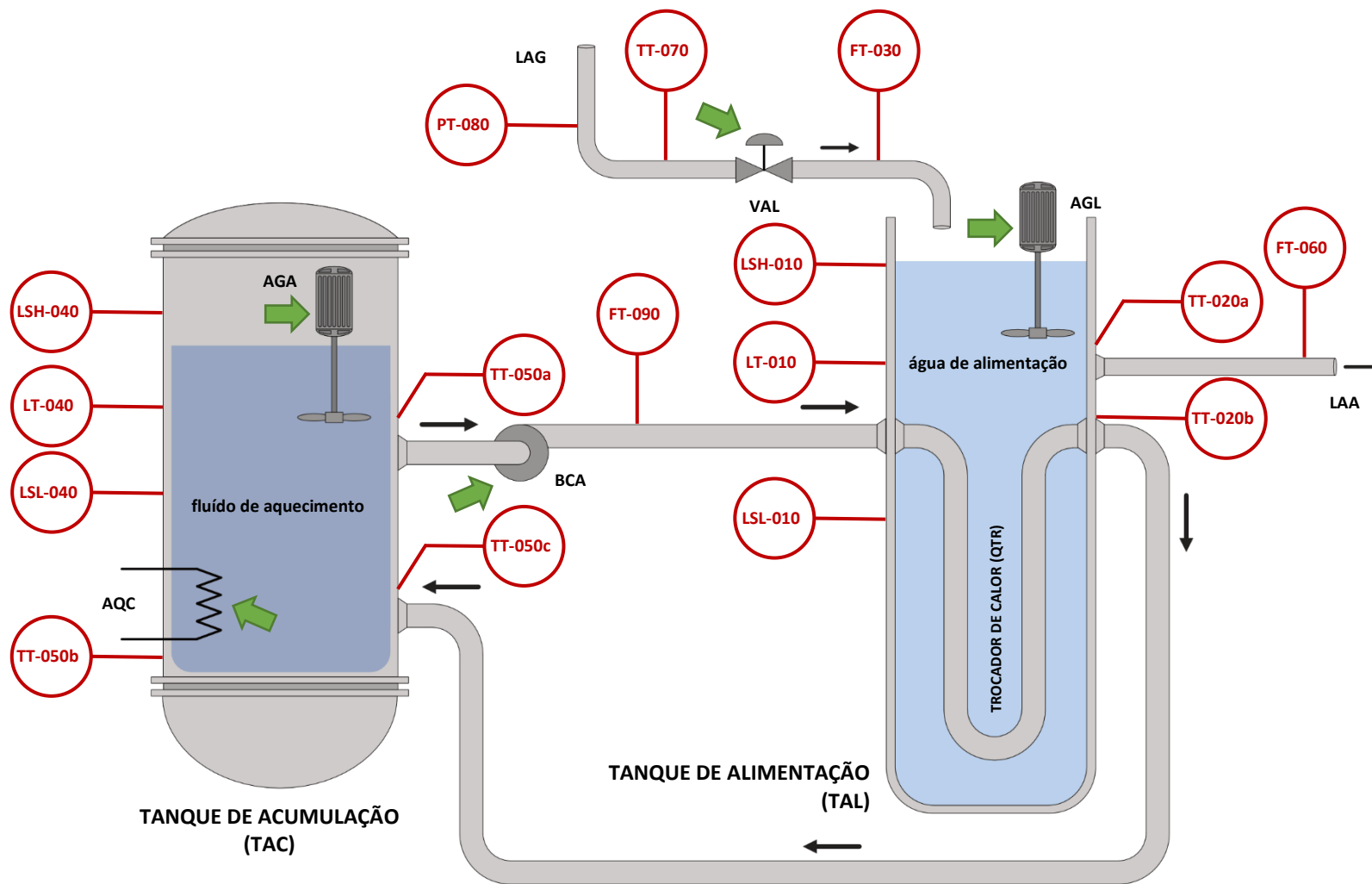


Figura 3-1 Sensores (simbologia e nomenclatura segundo a norma ANSI/ISA 5.1) e atuadores (setas em verde)

3.2 Descrição do sistema de controle

Deseja-se controlar as seguintes variáveis da unidade de aquecimento de água de alimentação:

- **Nível do tanque de alimentação (TAL)**
O nível do tanque cai com a retirada feita pela linha de água de alimentação (LAA) e é repostado pela linha de água geral (LAG). A válvula de alimentação (VAL) é utilizada para dosar a vazão de água geral e manter o nível do tanque num valor constante. Note que a quantidade de água retirada pela linha de água de alimentação varia com demandas (não conhecidas) do processo e pode variar continuamente.
- **Temperatura do tanque de alimentação (TAL)**
A temperatura do tanque de alimentação depende da quantidade de água de alimentação retirada do tanque (e da quantidade e temperatura da água repostada) e do calor transferido pelo trocador de calor. Assim, para se controlar a temperatura modula-se a troca de calor. Aumentando-se a velocidade da bomba de circulação (BCA) transfere-se mais calor para o tanque e diminuindo-se a velocidade, transfere-se menos calor.
- **Temperatura do tanque de acumulação (TAC)**
Para garantir a eficácia do trocador de calor, o fluido de aquecimento do tanque de acumulação deve ser mantido a uma temperatura constante. Para se controlar a temperatura, utiliza-se um aquecedor (AQC) de potência variável. Se a temperatura do tanque diminuir, aumenta-se a potência do aquecedor.
- **Vazão de água geral (malha auxiliar do controle de nível do tanque de alimentação)**
Para um melhor desempenho na reposição de água do tanque de alimentação (TAL), em vez de se controlar o nível através da abertura direta da válvula de alimentação (VAL), o controlador de nível do tanque de alimentação produz como saída um setpoint de vazão para uma malha interna de controle que comanda a abertura da válvula. Esse esquema é usualmente denominado **controle em cascata**.
- **Perfil de temperatura do tanque de acumulação (TAC)**
Caso a temperatura nas vizinhanças do aquecedor (AQC) esteja muito mais alta que a temperatura nas vizinhanças da linha de circulação, o agitador (AGA) deve ser ligado até que a temperatura no tanque se uniformize.
- **Perfil de temperatura do tanque de alimentação (TAL)**
Caso a temperatura nas vizinhanças do trocador de calor (QTR) esteja muito mais alta que a temperatura nas vizinhanças da linha de água de alimentação, o agitador (AGL) deve ser ligado até que a temperatura no tanque se uniformize.

Adicionalmente, deseja-se monitorar e gerar alarmes para uma série de outras variáveis, incluindo níveis e temperaturas dos tanques.

3.3 Arquitetura do sistema de controle

3.3.1 Arquitetura proposta

Um modelo hierárquico como o da Figura 3-2 é usualmente adotado para sistemas de controle como o da unidade de aquecimento deste documento.

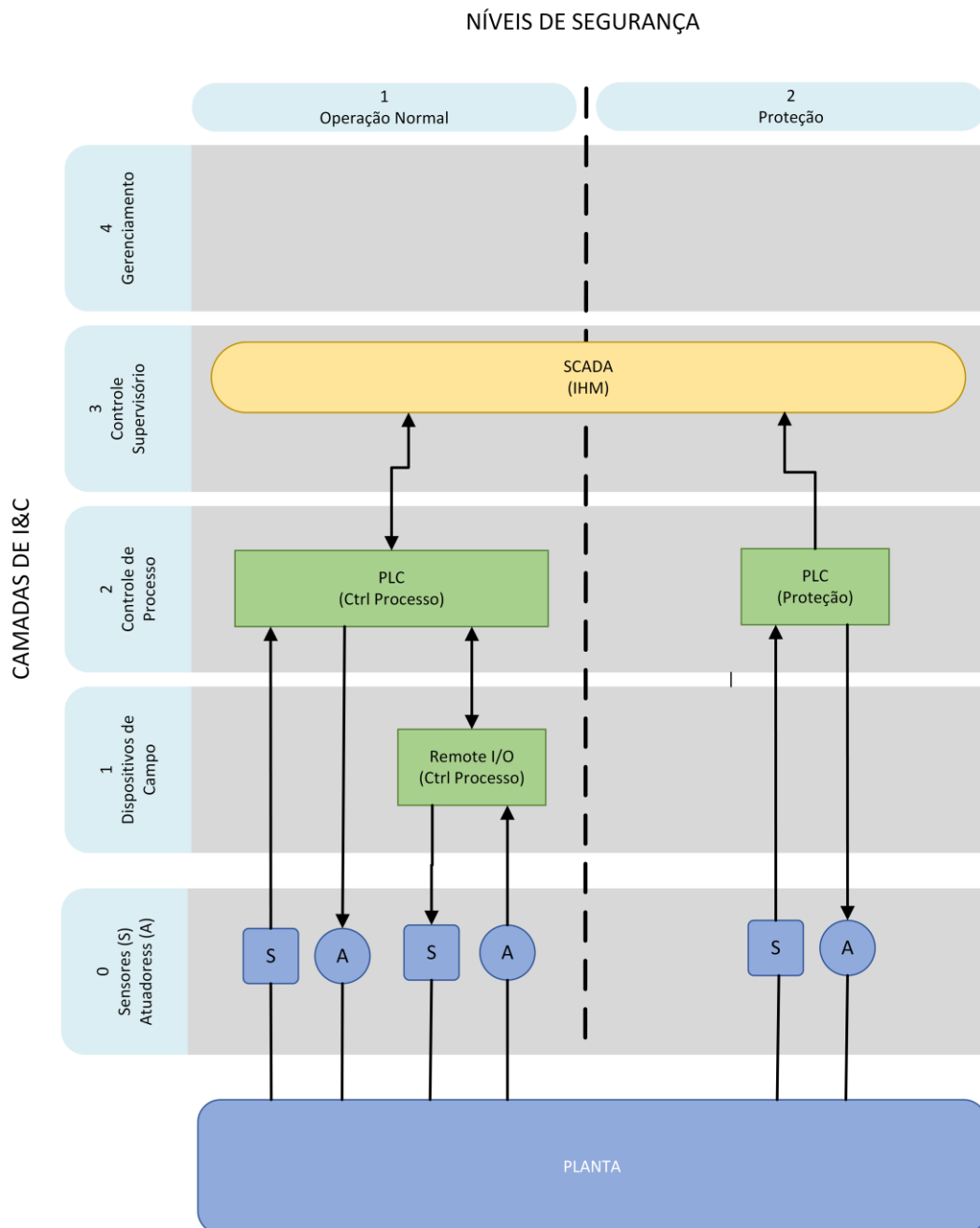


Figura 3-2 Modelo hierárquico do sistema de controle

São considerados dois níveis de segurança:

1. Operação Normal, que envolve as funções de regulação e intertravamento que garantem a operação da planta;
2. Proteção, que envolve as funções de segurança normalmente incluindo medidas como desligamento de equipamentos, acionamento de sistemas de proteção, etc.

E são consideradas as seguintes camadas de instrumentação e controle:

0. **Sensores e Atuadores**, que formam o nível mais básico e se referem às entradas e saídas do processo físico controlado, ou planta.
Os sensores e atuadores da unidade de aquecimento estão assinalados na Figura 3-1 e relacionados na Tabela 3-1 (sensores) e na Tabela 3-2 (atuadores).
1. **Dispositivos de Campo**, que se referem a sistemas de controle localizados no próprio processo controlado, por exemplo: painéis de operação e controle embutidos em equipamentos, controladores locais, etc.
A unidade de aquecimento possui um disposto de E/S Remota que consolida todos os sensores e atuadores.
2. **Controle de Processo**, que se refere aos dispositivos gerais de controle (CLPs, SDCDs, Single-Loops, etc.) que se destinam tanto à proteção como ao controle de processos em operação normal. Funções de proteção são normalmente executadas em equipamentos específicos, segregados do sistema de controle do processo, para uma maior segurança.
Sistemas mais básicos frequentemente executam tanto o controle como a proteção nos mesmos equipamentos, por questões de simplicidade e custo.
O sistema de controle da unidade de aquecimento possui a previsão de funções de controle tanto para operação normal como para proteção.
3. **Controle Supervisório**, que se refere aos sistemas supervisórios, normalmente instalados em uma sala de controle ou espaço equivalente. São equipamentos fisicamente diferentes dos normalmente utilizados para controle de processo e visam prover o sistema de controle de recursos de IHM (Interface Humano-Máquina), gerenciamento do processo, etc.
4. **Gerenciamento**, que se referem a interface com sistemas corporativos, planejamento e controle de produção, historiadores, documentação, etc.

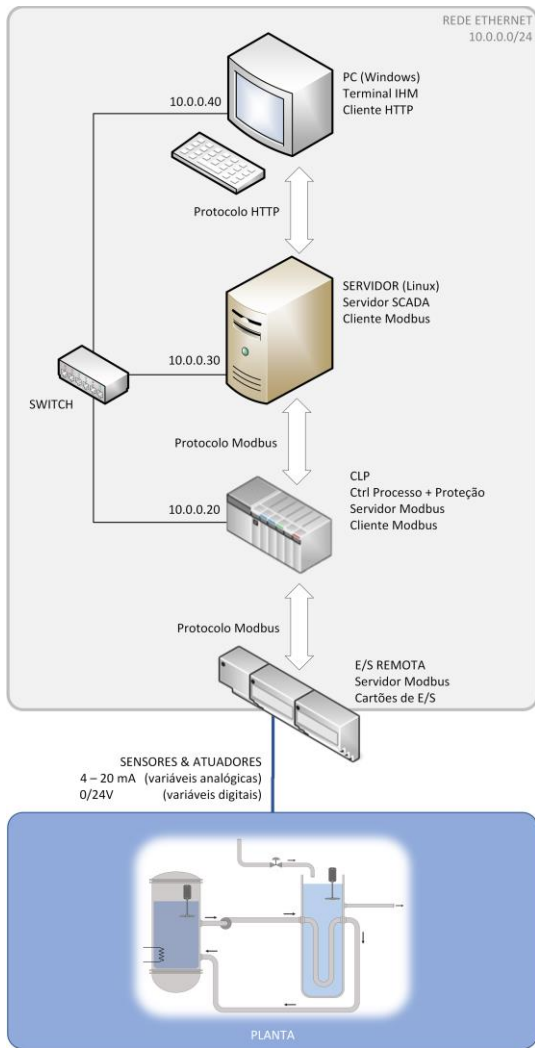
A partir deste modelo hierárquico, a seguinte arquitetura de rede é proposta para o sistema (Figura 3-3), com as funções de controle e proteção incorporadas no mesmo equipamento por simplicidade.

A arquitetura é bastante simples. Em processos reais geralmente são utilizadas arquiteturas mais complexas, com sub-redes isoladas por *firewalls* e conectadas por roteadores, medidas de proteção contra ataques computacionais, etc.

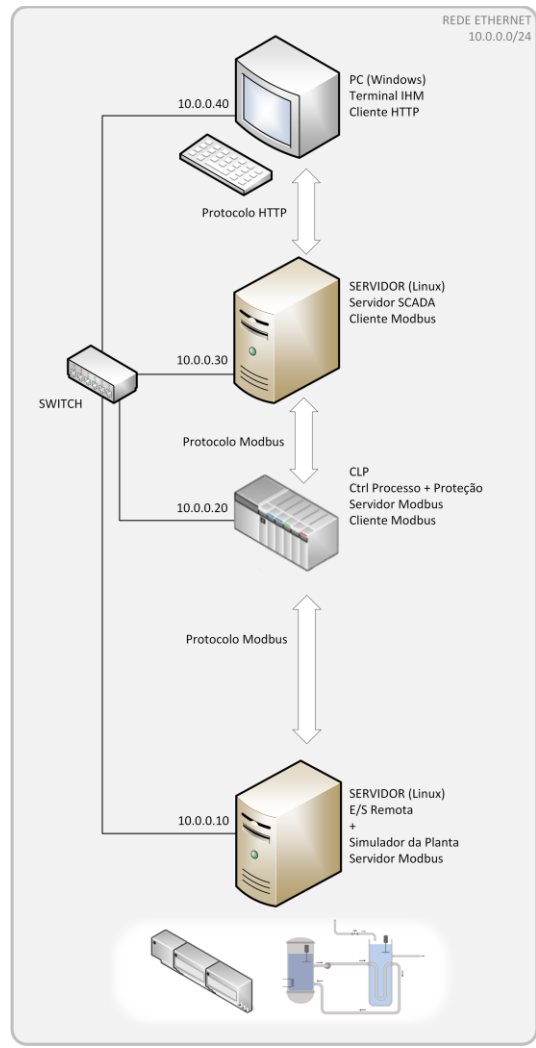
Duas versões são apresentadas na figura:

- a. Com a planta real e os sensores e atuadores com canais físicos de comunicação utilizando laços de corrente a 4 – 20 mA (sinais analógicos) e relés de 24 V (sinais digitais) e uma unidade de E/S remota. Como não se dispõe de uma planta real, ela será substituída por um simulador.
- b. Com a planta e a unidade de E/S remota simuladas, o que elimina a necessidade de implementar os canais físicos e reduz substancialmente os custos. Essa será a base da arquitetura efetivamente implementada.

Arranjos com simuladores em rede substituindo os processos são comumente utilizados durante o desenvolvimento de sistemas complexos e críticos, principalmente para verificação e validação dos sistemas de controle.



(a)
Planta Real



(b)
Planta Simulada

Figura 3-3 Arquitetura de rede

3.3.2 Implementação em ambiente virtual

A arquitetura de rede da Figura 3-3 (b) pode ser implementada virtualmente, conforme a Figura 3-4, de modo que todo o sistema pode ser implementado em um único computador.

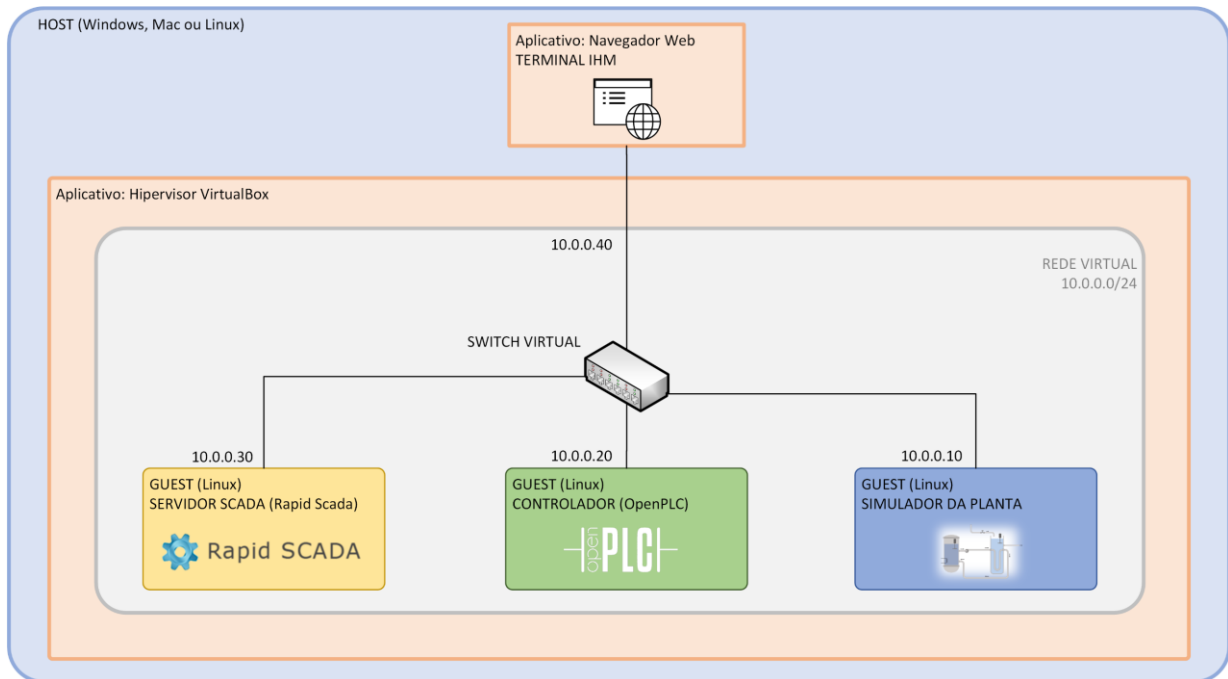


Figura 3-4 Arquitetura de rede virtual

A implementação da figura faz uso de três máquinas virtuais conectadas entre si e com o sistema host através de uma rede virtual. As máquinas virtuais disponibilizadas são as seguintes:

1. **Simulador da planta**, que contém um aplicativo executável que simula a unidade de aquecimento em tempo real, disponibilizando os sinais de entrada (V. Tabela 3-2) e saída (V. Tabela 3-1) em um servidor Modbus local, simulando os sensores e atuadores. Os sinais analógicos são descritos por inteiros de 16 bits em faixas específicas.

Por exemplo, uma medida de nível de 6,0 m em uma faixa de 0 a 10 m é descrita pelo número 39321 (ou 0x9999 em hexadecimal). Da mesma forma uma medida de 0,0 m é descrita por 0 (ou 0x0000 em hexadecimal) e uma medida de 10,0 m é descrita por 65535 (ou 0xFFFF em hexadecimal).

A E/S Remota é simulada por um servidor Modbus.

Esta máquina virtual utiliza o sistema operacional Linux Debian 10.8 e o simulador da planta é produzido a partir de um modelo do processo implementado em Matlab/Simulink e de um simulador Modbus dedicado para simular a E/S Remota.

2. **Controlador**, que contém o aplicativo OpenPLC Runtime. Este aplicativo implementa um ambiente similar ao de um PLC convencional na máquina virtual, incluindo um servidor Modbus para disponibilizar os dados da planta ao Servidor SCADA.

Este servidor disponibiliza os dados analógicos na forma de números de ponto flutuante de 32 bits (single precision float) em unidades de engenharia.

Esta máquina virtual utiliza o sistema operacional Linux Debian 10.8 e o aplicativo OpenPLC Runtime é obtido de www.openplcproject.com.

A programação e configuração do controlador deve ser feita a partir da máquina host.

3. **Servidor SCADA**, que contém o aplicativo Rapid SCADA, um sistema supervisório baseado em protocolos web. Para a visualização das telas de IHM é requerido um navegador, o qual será utilizado a partir da máquina host.

Esta máquina virtual utiliza o sistema operacional Linux Debian 10.8 e o aplicativo Rapid SCADA é obtido de www.rapidscada.org.

A programação e configuração do servidor SCADA é feita a partir da máquina host.

Mais detalhes sobre as máquinas virtuais podem ser encontrados nos guias de instalação e utilização.

3.3.3 Mapeamento do servidor Modbus

O protocolo Modbus, desenvolvido no final dos anos 1970, é um protocolo aberto de troca de dados baseado em mensagens, sendo o protocolo de comunicação industrial de maior difusão em termos mundiais. A maioria dos sistemas, equipamentos e aplicativos da área é compatível com o protocolo.

Mais informações sobre o protocolo Modbus podem ser encontradas em [2].

O protocolo implementa um sistema padrão de mapeamento de sinais em áreas de memória dedicadas do servidor. Os sinais de entrada (V. Tabela 3-2) e saída (V. Tabela 3-1) da unidade de aquecimento já foram mapeados em endereços pré-determinados, de acordo com a Tabela 3-3.

Tabela 3-3 Mapeamento Modbus para a unidade de aquecimento de água de alimentação

| | Sinal | | | Planta | Controlador | | | | SCADA | Observações |
|-----|-----------|------|---------|-------------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------|--|
| | Tag | Tipo | Faixa | Modbus (servidor) | Modbus (cliente) | E/S (interno) | Memória (interno) | Modbus (servidor) | Modbus (cliente) | |
| TAL | LSL-010 | SD | 0/1 | (1) 00000 | (1) 00000 | %IX100.0 | %QX0.0 | (0) 00000 | (0) 00000 | Nível baixo TAL (1 – condição ativa) |
| | LSH-010 | SD | 0/1 | (1) 00001 | (1) 00001 | %IX100.1 | %QX0.1 | (0) 00001 | (0) 00001 | Nível alto TAL (1 – condição ativa) |
| TAC | LSL-040 | SD | 0/1 | (1) 00002 | (1) 00002 | %IX100.2 | %QX0.2 | (0) 00002 | (0) 00002 | Nível baixo TAC (1 – condição ativa) |
| | LSH-040 | SD | 0/1 | (1) 00003 | (1) 00003 | %IX100.3 | %QX0.3 | (0) 00003 | (0) 00003 | Nível alto TAC (1 – condição ativa) |
| AGA | AGA_OnOff | ED | 0/1 | (0) 00000 | (0) 00000 | %QX100.0 | %QX1.0 | (0) 00008 | (0) 00008 | Acionamento AGA (Agitador TAC) |
| AGL | AGL_OnOff | ED | 0/1 | (0) 00001 | (0) 00001 | %QX100.1 | %QX1.1 | (0) 00009 | (0) 00009 | Acionamento AGL (Agitador TAL) |
| BCA | BCA_OnOff | ED | 0/1 | (0) 00002 | (0) 00002 | %QX100.2 | %QX1.2 | (0) 00010 | (0) 00010 | Acionamento BCA |
| TAL | LT-010 | SA | 0 a 10 | (3) 00000 | (3) 00000 | %IW100 | %MD0 | (4) 02048 | (4) 02048 | Leitura Nível TAL (m) |
| | TT-020a | SA | 0 a 100 | (3) 00001 | (3) 00001 | %IW101 | %MD1 | (4) 02050 | (4) 02050 | Leitura Temperatura Saída TAL (Celsius) |
| | TT-020b | SA | 0 a 100 | (3) 00002 | (3) 00002 | %IW102 | %MD2 | (4) 02052 | (4) 02052 | Leitura Temperatura Trocador de Calor TAL (Celsius) |
| VAL | FT-030 | SA | 0 a 400 | (3) 00003 | (3) 00003 | %IW103 | %MD3 | (4) 02054 | (4) 02054 | Leitura Vazão na válvula de alimentação (l/s) |
| TAC | LT-040 | SA | 0 a 5 | (3) 00004 | (3) 00004 | %IW104 | %MD4 | (4) 02056 | (4) 02056 | Leitura Nível TAC (m) |
| | TT-050a | SA | 0 a 100 | (3) 00005 | (3) 00005 | %IW105 | %MD5 | (4) 02058 | (4) 02058 | Leitura Temperatura Saída TAC (Celsius) |
| | TT-050b | SA | 0 a 100 | (3) 00006 | (3) 00006 | %IW106 | %MD6 | (4) 02060 | (4) 02060 | Leitura Temperatura Aquecedor TAC (Celsius) |
| | TT-050c | SA | 0 a 100 | (3) 00007 | (3) 00007 | %IW107 | %MD7 | (4) 02062 | (4) 02062 | Leitura Temperatura Retorno TAC (Celsius) |
| LAA | FT-060 | SA | 0 a 400 | (3) 00008 | (3) 00008 | %IW108 | %MD8 | (4) 02064 | (4) 02064 | Leitura Vazão na linha de alimentação (l/s) |
| LAG | TT-070 | SA | 0 a 100 | (3) 00009 | (3) 00009 | %IW109 | %MD9 | (4) 02066 | (4) 02066 | Leitura Temperatura na linha de água geral (Celsius) |
| | PT-080 | SA | 0 a 1 | (3) 00010 | (3) 00010 | %IW110 | %MD10 | (4) 02068 | (4) 02068 | Leitura Pressão na linha de água geral (bar) |
| QTR | FT-090 | SA | 0 a 300 | (3) 00011 | (3) 00011 | %IW111 | %MD11 | (4) 02070 | (4) 02070 | Leitura Vazão na linha de circulação (l/s) |
| AQC | AQC_Pot | EA | 0 a 100 | (4) 00000 | (4) 00000 | %QW100 | %MD12 | (4) 02072 | (4) 02072 | Comando Potência no aquecedor (%) |
| BCA | BCA_Vel | EA | 0 a 100 | (4) 00001 | (4) 00001 | %QW101 | %MD13 | (4) 02074 | (4) 02074 | Comando Velocidade BCA (%) |
| VAL | VAL_Pos | EA | 0 a 100 | (4) 00002 | (4) 00002 | %QW102 | %MD14 | (4) 02076 | (4) 02076 | Comando abertura VAL (%) |

Notas:

- SD (Saída Digital), ED (Entrada Digital), SA (Saída Analógica), EA (Entrada Analógica) referenciados ao ponto de vista da planta.
- Espaços de endereçamento Modbus: Bobinas (0), Entradas Digitais (1), Entradas Analógicas (3), Registros (4).
- O endereço Modbus tem 16 bits e quando os valores analógicos são armazenados em 32 bits (single precision float), eles ocupam dois endereços Modbus contíguos, sendo que a ordem dos bits pode variar conforme a plataforma.
- Sinais analógicos de 32 bits são expressos em unidades de engenharia (bar, m, etc.), enquanto que sinais analógicos de 16 bits são expressos em termos da faixa do instrumento: $w = \frac{(f - f_{min})}{(f_{max} - f_{min})} \cdot 65535$, onde w é o valor inteiro de 16 bits, f é o valor em ponto flutuante e $[f_{min}, f_{max}]$ é a faixa do instrumento. Se $f = f_{min}$, $w = 0x0000$ e se $f = f_{max}$, $w = 0xFFFF$.

3.4 Malhas de controle

As malhas de controle, incluindo lógicas de intertravamento, necessárias para a operação adequada da unidade de aquecimento estão relacionadas a seguir, divididas em malhas analógicas de regulação, lógicas operacionais e lógicas de proteção, numeradas sequencialmente.

3.4.1 Malhas de regulação

Para a regulação do sistema deseja-se que o sistema seja estável e que as variáveis medidas sigam os setpoints, sem erro de regime estacionário.

As malhas de regulação são as seguintes:

1. (010) Controle de nível do tanque de alimentação (TAL)

Para manter o nível do tanque no valor nominal de 6,00 m, deve-se modular a vazão na válvula de alimentação (VAL) para repor a água extraída pela linha de água de alimentação (LAA).

Dadas as características da dinâmica do tanque e as especificações de controle, um controlador do tipo PI deve ser utilizado para esta malha. Para que se tenha um melhor desempenho, o controlador monitora a vazão de saída do TAL e utiliza este valor num esquema de feedforward para modular mais rapidamente a vazão de entrada.

Note que esta malha produz um setpoint de vazão para a válvula de alimentação e uma malha interna se encarrega de modular a abertura da válvula, num esquema de controle em cascata.

Variável manipulada: Setpoint de vazão para a válvula de alimentação (sem tag).

Variáveis medidas: Nível do tanque de alimentação (LT-010).
Vazão da linha de água de alimentação (FT-060).

Setpoint: 6,00 m (sem tag).

2. (020) Temperatura do tanque de alimentação (TAL)

Para manter a temperatura do tanque de alimentação (medida na saída de alimentação) no valor nominal de 40 °C, deve-se modular a vazão de fluido de aquecimento no trocador de calor (QTR), o que é feito modulando-se a velocidade da bomba de circulação (BCA).

Note que esta malha somente será efetiva se a temperatura do fluido de aquecimento no tanque de acumulação for mantida no valor nominal.

Dadas as características da dinâmica da temperatura e as especificações de controle, um controlador do tipo PI deve ser utilizado nesta malha.

Variável manipulada: Comando de velocidade da bomba de circulação (BCA_Vel).

Variável medida: Temperatura do tanque de alimentação (TT-020a).

Setpoint: 40 °C (sem tag).

3. (030) Vazão na válvula de alimentação (VAL)

O sistema de controle do nível do tanque de alimentação envia um setpoint de vazão. É necessário que uma segunda malha de controle produza a abertura de válvula correspondente e mantenha a vazão no valor desejado.

Dadas as características da dinâmica de vazão e as especificações de controle, um controlador do tipo PI deve ser utilizado nesta malha.

Variável manipulada: Abertura da válvula de alimentação (VAL_Pos).

Variável medida: Vazão na válvula de alimentação (FT-030).

Setpoint: Fornecido pela malha de controle de nível do TAL.

4. (050) Temperatura do tanque de acumulação (TAC)

Para manter a temperatura do tanque de acumulação (medida na saída de circulação) no valor nominal de 80 °C, deve-se modular a potência do aquecedor (AQC) para compensar as perdas para o ambiente e o calor extraído pelo trocador de calor (QTR).

Dadas as características da dinâmica da temperatura e as especificações de controle, um controlador do tipo PI deve ser utilizado nesta malha.

Variável manipulada: Comando de potência no aquecedor (AQC_Pot);

Variável medida: Temperatura do tanque de acumulação (TT-050a).

Setpoint: 80 °C (sem tag).

3.4.2 Lógicas operacionais

As lógicas operacionais são as seguintes:

5. Uniformização de temperatura do tanque de alimentação (TAL)

Se a diferença de temperatura entre a vizinhança do trocador de calor e a saída de alimentação (TT-020b – TT-020a) for maior que 10 °C, o agitador (AGL) deve ser ligado (AGL_OnOff), e somente deve ser desligado se a diferença de temperatura for menor que 2 °C.

6. Uniformização de temperatura do tanque de acumulação (TAC)

Se a diferença de temperatura entre a vizinhança do aquecedor e a saída de circulação (TT-050b – TT-050a) for maior que 5 °C, o agitador (AGA) deve ser ligado (AGA_OnOff), e somente deve ser desligado se a diferença de temperatura for menor que 2 °C.

3.4.3 Lógicas de proteção

As ações das lógicas de proteção devem predominar caso as lógicas operacionais produzam comandos conflitantes. Por exemplo, se uma lógica operacional mandar ligar um agitador, porém uma lógica de proteção mandar desligá-lo, deve valer o comando da lógica de proteção e o agitador deve ser desligado.

As lógicas de proteção são as seguintes:

7. Nível alto do tanque de alimentação (TAL)

Enquanto a chave de nível alto do tanque de alimentação (LSH-010) estiver ativada:

- a. Ativar o aviso de nível alto TAL (sem tag).
- b. Desligar o agitador (AGL_OnOff).

8. Nível alto do tanque de acumulação (TAC)

Enquanto a chave de nível alto do tanque de acumulação (LSH-040) estiver ativada:

- a. Ativar o aviso de nível alto TAC (sem tag).
- b. Desligar o agitador (AGA_OnOff).

9. Nível baixo do tanque de alimentação (TAL)

Enquanto a chave de nível baixo do tanque de alimentação (LSL-010) estiver ativada:

- a. Ativar o aviso de nível baixo TAL (sem tag).
- b. Desligar a bomba de circulação (BCA_OnOff).
- c. Desligar o agitador (AGL_OnOff).

10. Nível baixo do tanque de acumulação (TAC)

Enquanto a chave de nível baixo do tanque de alimentação (LSL-040) estiver ativada:

- a. Ativar o aviso de nível baixo TAC (sem tag).
- b. Desligar o aquecedor (AQC_Pot).
- c. Desligar a bomba de circulação (BCA_OnOff).
- d. Desligar o agitador (AGA_OnOff).

11. Temperatura alta no tanque de acumulação (TAC)

Enquanto a temperatura nas vizinhanças do aquecedor estiver acima de 92 °C:

- a. Ativar o aviso de temperatura alta TAC (sem tag).
- b. Desligar o aquecedor (AQC_Pot).
- c. Ligar o agitador (AGA_OnOff) a não ser que o sinal de nível baixo (LSL-040) esteja ativado.

4 Referências

- [1] Instrumentations Symbols and Identification (ANSI/ISA 5.1). <https://webstore.ansi.org/standards/isa/ansiisa2009> (visitado em maio/2021).

Distribuição oficial da norma.

- [2] Modbus Protocol Specifications. <https://www.modbus.org/specs.php> (visitado em maio/2021).

Especificações oficiais do protocolo Modbus.

V2022a (RPM)