



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e informática

Controle de Contaminação na Produção de Semicondutores

Sistemas de supervisão para automação indústria que fazem uso
de IHM (Interface Humano-Máquina)

Aluno: Thiago Henrique de Oliveira Silva

Campina Grande PB

16 de dezembro de 2025

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 3 |
| 1.1 | Objetivo | 3 |
| 1.2 | Características Gerais do Projeto | 3 |
| 1.3 | Resultados esperados | 4 |
| 2 | Casos de Uso | 5 |
| 2.1 | Atores | 5 |
| 2.2 | Cenários/Stories | 6 |
| 2.2.1 | Cenário 1 Contaminação acima do limite | 6 |
| 2.2.2 | Cenário 2 Queda de vazão durante limpeza | 6 |
| 2.2.3 | Cenário 3 Análise pós-processo | 6 |
| 2.2.4 | Cenário 4 Manutenção preventiva | 6 |
| 2.3 | Casos de Uso | 6 |
| 2.3.1 | UC1 - Monitorar Contaminação | 6 |
| 2.3.2 | UC2 - Analisar Histórico de Lote | 7 |
| 2.3.3 | UC3 - Manutenção/Diagnóstico | 7 |
| 2.3.4 | UC4 - Gerenciar Alarmes | 7 |
| 2.3.5 | UC5 - Registrar Dados do Processo | 8 |
| 2.4 | Descrição | 8 |
| 2.4.1 | Funcionamento | 8 |
| 3 | Requisitos Funcionais e não Funcionais | 9 |
| 3.1 | Requisitos Funcionais | 9 |
| 3.2 | Requisitos Não Funcionais | 10 |
| 4 | Arquitetura | 11 |
| 4.1 | Arquitetura em Camadas | 11 |
| 4.2 | Adapter / Gateway Pattern | 12 |
| 4.3 | Role-Based Access Control (RBAC) | 12 |

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 5 | Plano de Projeto | 13 |
| 5.1 | backlog | 14 |
| 6 | Verificação | 17 |

1 Introdução

Este documento apresenta a especificação do projeto de um sistema de supervisão aplicado à inspeção e limpeza de wafers, no âmbito da disciplina de Informática Industrial. Em ambientes de fabricação de semicondutores, o controle rigoroso de contaminantes é essencial, uma vez que sua presença impacta negativamente o rendimento e a qualidade dos circuitos integrados produzidos.

A produção de semicondutores consiste na formação de múltiplas cópias de circuitos integrados em escala nanométrica sobre um wafer de silício, por meio da sucessiva construção e padronização de camadas. Dado o elevado nível de complexidade desse processo, o monitoramento contínuo da contaminação sobretudo por partículas é imprescindível para garantir a integridade funcional do produto final.

1.1 Objetivo

Neste projeto visamos elaborar uma solução para uma etapa do longo processo de fabricação desses circuitos. Embora algumas empresas estejam na vanguarda na produção de chips e nas soluções envolvendo os semicondutores, no contexto geopolítico atual é crucial deter a capacidade de produzir esses componentes em território nacional.

1.2 Características Gerais do Projeto

O sistema proposto consiste em uma solução de supervisão industrial voltada ao monitoramento do processo de inspeção e limpeza de wafers na fabricação de semicondutores. O objetivo principal é garantir o controle contínuo de parâmetros críticos relacionados à contaminação do wafer e às condições operacionais dos equipamentos envolvidos nessa etapa, contribuindo para maior qualidade, rastreabilidade e disponibilidade do processo.

O sistema será composto por uma Interface Homem-Máquina (IHM) integrada aos sensores e atuadores do equipamento de limpeza, possibilitando ao operador monitorar variáveis como:

- Concentração de partículas e contaminantes
- Pressão e vazão de líquidos e gases utilizados

- Status operacional da máquina
- Alarmes e eventos de falha
- Histórico de lotes e rastreamento de wafers

Além do monitoramento em tempo real, o sistema deverá emitir alertas quando parâmetros ultrapassarem limites especificados, permitindo intervenções rápidas, correções de anomalias e redução de desperdícios.

O funcionamento baseia-se na coleta de dados por sensores industriais conectados a um controlador (ex.: CLP), que repassa as informações para a IHM. A partir dela, o operador pode visualizar o estado do processo, realizar ajustes autorizados, acompanhar gráficos de tendência e consultar registros de produção e falhas. O sistema também poderá registrar dados em um banco para auditorias e análises de desempenho.

1.3 Resultados esperados

Com a implementação do sistema, espera-se alcançar:

- Minimização da contaminação e maior confiabilidade do produto final
- Operação segura e rastreável, com controle claro de cada etapa
- Redução de falhas e retrabalho, aumentando o rendimento da linha de produção
- Maior apoio à tomada de decisão, com dados acessíveis e estruturados
- Interface amigável ao operador, facilitando a supervisão e ações corretivas

2 Casos de Uso

2.1 Atores

| Ator | Descrição |
|--------------------------|---|
| Operador de Produção | Interage diretamente com a IHM, responde a alarmes e executa rotinas operacionais. |
| Técnico de Manutenção | Realiza diagnósticos, calibra sensores e atua na resolução de falhas. |
| Sistema de Automação/CLP | Controla o equipamento e envia variáveis de processo. |
| Sistema Host/MES | Registra lotes, solicita ou recebe status do equipamento. |
| Analista de Qualidade | Consulta histórico e relatórios para fins de rastreabilidade e controle de processos. |

Tabela 2.1: Tabela de Atores

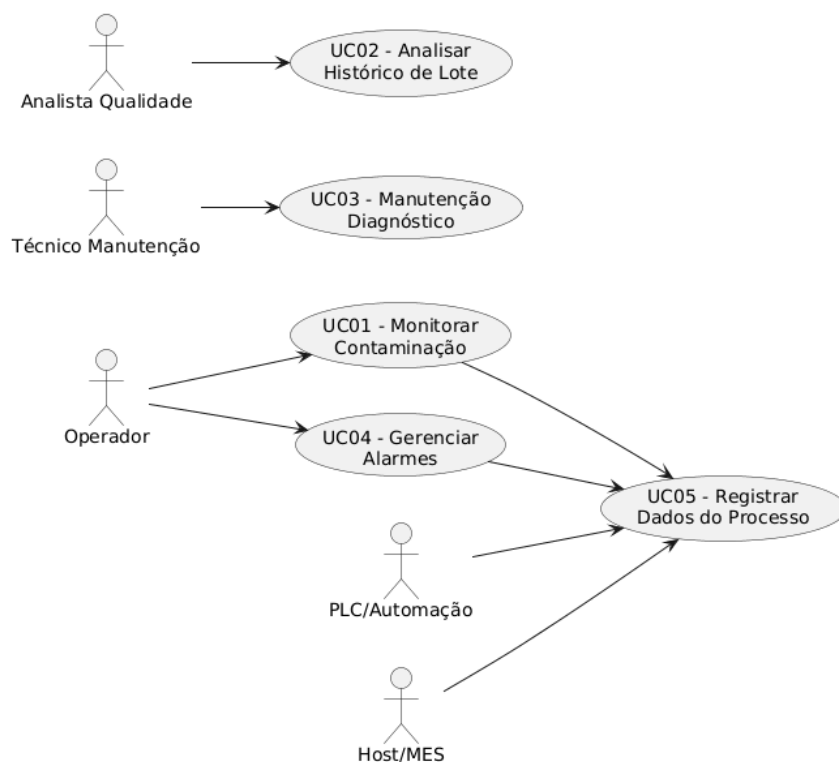


Figura 2.1: Caso de Uso

2.2 Cenários/Stories

2.2.1 Cenário 1 Contaminação acima do limite

Como operador, quero ser notificado imediatamente quando o contador de partículas exceder o limite crítico para interromper o processamento e evitar perda de wafers.

2.2.2 Cenário 2 Queda de vazão durante limpeza

Como operador, desejo visualizar tendências de vazão em tempo real para detectar entupimentos ou falhas de bomba antes que se tornem críticas.

2.2.3 Cenário 3 Análise pós-processo

Como analista de qualidade, desejo acessar o histórico de um lote para verificar se variáveis de limpeza permaneceram dentro das especificações.

2.2.4 Cenário 4 Manutenção preventiva

Como técnico de manutenção, quero executar testes com sensores e atuadores sem liberar wafers ao equipamento.

2.3 Casos de Uso

2.3.1 UC1 - Monitorar Contaminação

| | |
|-----------|---|
| Atores | Operador de Produção |
| Objetivo | Visualizar em tempo real os níveis de contaminação no processo de limpeza de wafers. |
| Descrição | O sistema coleta dados dos sensores e os apresenta na IHM para acompanhamento contínuo do operador. |

Tabela 2.2: UC1

2.3.2 UC2 - Analisar Histórico de Lote

| | |
|-----------|---|
| Atores | Analista de Qualidade e Sistema Host/MES |
| Objetivo | Consultar dados de produção e avaliar rastreabilidade e conformidade. |
| Descrição | O Sistema Host/MES fornece registros de lotes e o Analista de Qualidade acessa o histórico para investigação ou auditorias. |

Tabela 2.3: UC2

2.3.3 UC3 - Manutenção/Diagnóstico

| | |
|-----------|---|
| Atores | Técnico de Manutenção |
| Objetivo | Verificar condições do equipamento, calibração e falhas. |
| Descrição | O Técnico utiliza a IHM para acessar diagnósticos enviados pelo CLP, identificar problemas e realizar intervenções. |

Tabela 2.4: UC3

2.3.4 UC4 - Gerenciar Alarmes

| | |
|-----------|---|
| Atores | Operador de Produção e Sistema de Automação/CLP |
| Objetivo | Atuar diante de desvios de processo e condições de risco. |
| Descrição | O CLP gera alarmes quando parâmetros ultrapassam limites; o Operador recebe, reconhece e registra as ações tomadas. |

Tabela 2.5: UC4

2.3.5 UC5 - Registrar Dados do Processo

| | |
|-----------|---|
| Atores | Sistema de Automação/CLP e Sistema Host/MES |
| Objetivo | Armazenar dados essenciais do processo para controle e rastreamento. |
| Descrição | O CLP envia variáveis continuamente e o Sistema Host/MES registra essas informações para uso posterior em análises. |

Tabela 2.6: UC5

2.4 Descrição

2.4.1 Funcionamento

Como mostrado na Tabela ??, a interface OBI define sinais para comunicação entre o core RISC-V e a memória. O seu funcionamento básico parte de uma máquina de estados simples, que implementa um handshake, uma vez que o core necessita de sinais da memória e o controlador de memória indica que este está pronto para receber e/ou responder as requisições pendentes.

A interface foi dividida em duas partes: uma destinada à memória de instruções, a qual o PC é enviado como endereço e a memória retorna a operação, e outra destinada à memória de dados, prevendo dois espaços de memória diferentes.

3 Requisitos Funcionais e não Funcionais

3.1 Requisitos Funcionais

- **RF01:** O sistema deve exibir em tempo real os níveis de contaminação na IHM.
- **RF02:** O sistema deve apresentar pressão e vazão do processo na IHM.
- **RF03:** O sistema deve indicar o status do equipamento (Operando, Parado, Falha).
- **RF04:** O sistema deve emitir alarmes quando parâmetros ultrapassarem limites configurados.
- **RF05:** O sistema deve permitir ao Operador reconhecer e registrar o tratamento de alarmes.
- **RF06:** O sistema deve registrar continuamente os dados enviados pelo CLP.
- **RF07:** O sistema deve armazenar histórico completo de lotes processados.
- **RF08:** O Analista de Qualidade deve conseguir consultar históricos de produção e relatórios.
- **RF09:** O sistema deve gerar gráficos de tendência das variáveis do processo.
- **RF10:** O sistema deve emitir aviso de falha quando sensores estiverem inoperantes.
- **RF11:** O sistema deve permitir acesso ao modo diagnóstico por usuário autorizado.
- **RF12:** O sistema deve exibir o estado dos sensores e atuadores para manutenção.
- **RF13:** O sistema deve registrar data, hora e tipo de todos os alarmes.
- **RF14:** O sistema deve trocar informações com o Sistema Host/MES sobre identificação do lote.
- **RF15:** O sistema deve permitir configuração de limites operacionais por usuário com permissão.

- **RF16:** O sistema deve alertar falha de comunicação com o CLP se o tempo limite for excedido.
- **RF17:** O sistema deve controlar acesso por níveis de permissão (Operador, Técnico, Analista).
- **RF18:** O sistema deve registrar todas as ações dos usuários para auditoria em um arquivo de log.
- **RF19:** O sistema deve exibir, na IHM, indicação visual por cores para status crítico/normal.

3.2 Requisitos Não Funcionais

- **RNF01:** A IHM deve atualizar as variáveis em tela em menos de 1 segundo.
- **RNF02:** As telas da IHM devem seguir layout padronizado industrial com contraste adequado.
- **RNF03:** O sistema deve operar continuamente (24/7) sem necessidade de reinicialização.
- **RNF04:** A comunicação entre o CLP e a IHM deve possuir detecção de erro e reconexão automática.
- **RNF05:** O sistema deve recuperar comunicação sem perda permanente de dados.
- **RNF06:** A IHM deve apresentar navegação intuitiva com no máximo 3 níveis de menu até qualquer função.
- **RNF07:** O sistema deve atender às normas de segurança elétrica e industrial aplicáveis.
- **RNF08:** O banco de dados deve garantir integridade referencial e recuperação em caso de falha.
- **RNF09:** Os dados históricos devem permanecer disponíveis para consulta por pelo menos 12 meses.
- **RNF10:** O sistema deve permitir inclusão de novos sensores e variáveis sem alteração do núcleo do software.
- **RNF11:** O sistema deve ser compatível com as interfaces já utilizadas no mercado.

4 Arquitetura

Neste projeto partimos do pressuposto que a indústria de semicondutores exige alta confiabilidade, rastreabilidade e integração com sistemas hosts (MES). Tendo em vista a implementação de CLP's e uma IHM's, além de todo aparato relacionado a interconexão entre eles, segurança e o próprio sensoramento. Foram adotadas uma série de padrões consagrados para IOT e ambientes industriais críticos tendo em vista exigências estabelecidas pelos requisitos funcionais e não funcionais.

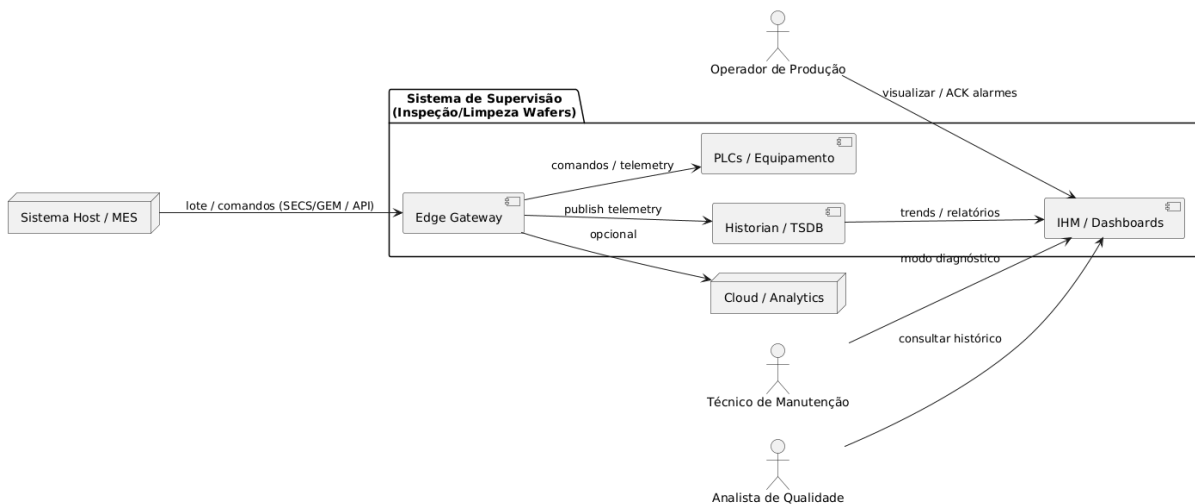


Figura 4.1: Diagrama de Contexto de Implementação

4.1 Arquitetura em Camadas

Arquitetura em camadas (Layered Architecture): separação clara entre Camada de Campo (OT), Camada de Controle (PLC), Edge/Gateway, Back-end (Historian/DB) e Camada de Apresentação/IHM. Isso promove isolamento de responsabilidades, testabilidade e segurança (RNF10, RNF04).

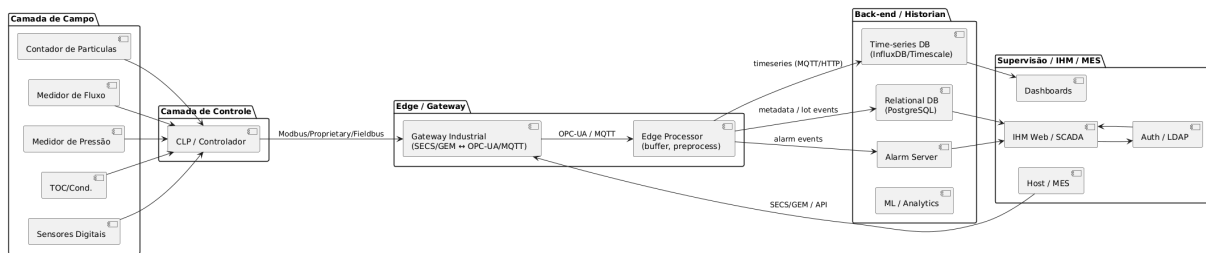


Figura 4.2: Diagrama de Camadas

4.2 Adapter / Gateway Pattern

O Edge Gateway faz a adaptação entre protocolos industriais (SECS/GEM, Modbus, Profinet) e protocolos IT (OPC-UA, MQTT, REST). Facilita interoperabilidade com MES e reduz acoplamento entre PLCs e aplicações. (RNF11)

4.3 Role-Based Access Control (RBAC)

Políticas de autenticação e autorização (RF17), usando LDAP/OAuth2.

5 Plano de Projeto

O desenvolvimento do sistema será conduzido seguindo uma abordagem Iterativa e Incremental, no formato de um pipeline, baseada em práticas de Engenharia de Software voltadas para sistemas industriais. Cada incremento será validado por revisões técnicas documentadas e alinhamento visando supervisão industrial.

Os principais atores envolvidos no desenvolvimento do projeto são:

- 2 Equipes de Desenvolvedores
- 1 Especialista em Automação Industrial
- 1 Product Owner
- 1 Scrum Master

O projeto será dividido nas seguintes fases macro:

| | | | |
|-----------|--|--|--|
| 01 | Planejamento e Gestão | Definir escopo, cronograma, stakeholders e critérios de aceitação | Plano do Projeto |
| 02 | Levantamento e Especificação de Requisitos | Identificar requisitos funcionais e não funcionais, casos de uso, cenários | Documento de Requisitos |
| 03 | Modelagem e Arquitetura do Sistema | Diagramas arquiteturais, definição de padrões, interfaces e banco de dados | Documento de Arquitetura, Diagramas UML |
| 04 | Design da IHM e Fluxos Operacionais | Prototipação de telas e estrutura de navegação da IHM | Wireframes/Mockups |
| 05 | Verificação | Assegurar funcionalidade e rastrear Bugs | Relatório de Verificação com métricas de cobertura |
| 06 | Validação | Consolidação da solução, avaliação técnica e ajustes finais | Versão final dos artefatos projetados |
| 07 | Apresentação Final | Encerramento do projeto e entrega | Slides e entrega formal |

Tabela 5.1: Planejamento

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 01 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 02 | | | X | X | | | | | | | | | | |
| 03 | | | | | X | X | X | | | | | | | |
| 04 | | | | | | | | X | X | X | | | | |
| 05 | | | | | | | | | | | X | X | | |
| 06 | | | | | | | | | | | | | X | |
| 07 | | | | | | | | | | | | | | X |

Tabela 5.2: Cronograma previsto

5.1 backlog

Tabela 5.3: Ferramentas Seleccionadas para Desenvolvimento do Projeto

| Categoria | Ferramentas Seleccionadas | Utilização |
|--|--|--|
| Modelagem | PlantUML, Draw.io | Ferramentas consolidadas em modelagem, padronizadas para UML e com suporte a versionamento. |
| Gestão do Projeto | Notion, GitHub Projects, Google Planilhas | Planejamento, acompanhamento de metas e controle de tarefas com fácil colaboração on-line. |
| Documentação | Overleaf (LaTeX), Word com ABNT, Google Docs | Atende exigências acadêmicas e trabalha com edição colaborativa em tempo real. |
| Controle de Versão e Repositório | Git, GitHub | Rastreamento de mudanças, versionamento distribuído e integração contínua entre membros da equipe. |
| Prototipação de IHM | Figma, Draw.io | Simulação de interfaces para validação com stakeholders sem implementação prévia. |
| Armazenamento e Compartilhamento de Arquivos | Google Drive | Sincronização e compartilhamento seguro dos artefatos do projeto. |
| Referenciais Técnicos | Normas e manuais SECS/GEM, SCADA, OPC-UA | Garantia de conformidade com padrões industriais amplamente adotados. |

Tabela 5.4: Product Backlog do Sistema de Supervisão e IHM

| ID | User Story | Nível | CrITÉrios de Aceitação |
|------|---|-------|---|
| PB01 | Como Operador, desejo visualizar em tempo real os dados de contaminação, para monitorar o processo. | 1 | Dados atualizam continuamente; IHM exibe status seguro/risco; Permite seleção e zoom por variável. |
| PB02 | Como Operador, quero receber alarmes sonoros/visuais quando limites forem excedidos, para agir rapidamente. | 3 | Alarme dispara em até 1s após violação; Registro do evento em log; Classificação do alarme (crítico/aviso). |
| PB03 | Como Técnico de Manutenção, desejo acessar diagnóstico dos sensores, para identificar falhas e calibrações. | 5 | Tela com status e códigos de erro; Histórico de calibração; Alertas de manutenção preventiva. |
| PB04 | Como Analista de Qualidade, quero consultar histórico do lote, para rastrear problemas do processo. | 7 | Filtros por lote/data/variável; Exportação em planilha; Garantia de integridade dos dados. |
| PB05 | Como Sistema MES, quero registrar automaticamente os dados do processo, para rastreabilidade. | 9 | Comunicação contínua sem perdas; Dados com timestamp; Log de falhas de integração. |
| PB06 | Como Operador, quero redefinir limites e criticidade de variáveis, para adequar o controle ao processo. | 11 | Permite editar limites com autenticação; Mudanças registradas com usuário/data/hora. |
| PB07 | Como Técnico de Manutenção, quero executar testes da malha de comunicação, para validar integridade do sistema. | 13 | Latência dentro do limite especificado; Exibição de falhas em tempo real; Emissão de relatório automático. |
| PB08 | Como Sistema CLP, quero enviar variáveis ao sistema continuamente, para controle do processo. | 3 | Tempo de amostragem conforme especificação; Sincronização de relógio; Registros de falha de transmissão. |
| PB09 | Como Operador, quero visualizar instruções de resposta aos alarmes, para reduzir erros operacionais. | 11 | Manual acessível pela IHM; Conteúdo validado; Acesso direto via tela do alarme. |
| PB10 | Como Analista de Qualidade, quero gerar relatórios consolidados para auditorias e métricas de processo. | 13 | Seleção de período; Exportação em PDF e Excel; Assinatura digital ou equivalente. |

6 Verificação

O processo de validação e verificação adotado no projeto seguirá uma abordagem incremental baseada no método ágil Scrum amplamente utilizada na indústria, baseando principalmente na metodologia UVM utilizada em hardware e outras para software. A qualidade será garantida através da aplicação dos seguintes mecanismos:

- **Revisões de Requisitos:** análise de clareza, completude e testabilidade;
- **Validação de Interface (IHM):** verificação com base nos fluxos definidos para o operador;
- **Testes de Aceitação Baseados em User Stories:** cada funcionalidade será validada conforme critérios de aceitação do Product Backlog
- **Testes Funcionais:** avaliando comunicação com CLP e atualizações em tempo real
- **Testes de Robustez e Segurança Operacional:** alarmes, limites de variáveis, manutenibilidade
- **Testes de Rastreabilidade e Auditoria:** histórico, logs e rastreamento de lotes

Cada caso de teste será rastreável ao requisito correspondente, garantindo a cobertura total das funcionalidades priorizadas.

Tabela 6.1: Casos de Teste de Aceitação Completos

| ID | Req. | Objetivo do Teste | Procedimento | Resultado Esperado |
|-------------------------------|------|--|--|--|
| CT01 | RF01 | Validar exibição dos níveis de contaminação em tempo real. | Simular envio de dados do CLP com variabilidade. | Valores atualizam em tempo real na IHM. |
| CT02 | RF01 | Validar atualização gráfica. | Forçar aumento súbito nas partículas. | Gráficos refletem mudança imediatamente. |
| Continua na próxima página... | | | | |

Tabela 6.1

| ID | Req. | Objetivo do Teste | Procedimento | Resultado Esperado |
|-------------------------------|------|---|---------------------------------------|---|
| CT03 | RF02 | Verificar disparo de alarme quando limite é excedido. | Configurar valor acima do limite. | Alarme visual e sonoro emitido. |
| CT04 | RF02 | Validar registro de alarme em log. | Gerar alarme crítico. | Evento logado com timestamp e variável associada. |
| CT05 | RF03 | Verificar leitura do status de sensores. | Desabilitar sensor no CLP. | IHM exibe falha correspondente. |
| CT06 | RF03 | Validar aviso de manutenção preventiva. | Simular degradação do sensor. | Sistema alerta antes da falha. |
| CT07 | RF04 | Consultar histórico por lote. | Selecionar lote existente. | Dados exibidos corretamente. |
| CT08 | RF04 | Exportar dados históricos. | Solicitar exportação para Excel. | Arquivo XLSX gerado corretamente. |
| CT09 | RF05 | Verificar envio contínuo ao MES. | Testar comunicação com MES simulado. | Sem perdas de dados e com timestamps corretos. |
| CT10 | RF06 | Autenticação antes de alterar limites. | Tentar alterar sem permissão. | Acesso negado com aviso. |
| CT11 | RF06 | Registro de alteração de limite. | Alterar valor com usuário autorizado. | Log registra usuário/data/hora e novo valor. |
| CT12 | RF07 | Testar latência da comunicação. | Enviar pacotes periódicos. | Latência dentro do limite definido. |
| CT13 | RF07 | Relatório de teste da malha. | Executar diagnóstico automatizado. | Relatório exibido com status da rede. |
| CT14 | RF08 | Verificar sincronização do CLP. | Inserir offset no tempo. | Sistema corrige sincronismo automaticamente. |
| CT15 | RF09 | Exibir instruções durante alarme. | Acessar auxílio via tela do alarme. | Guia exibido corretamente. |
| CT16 | RF09 | Testar navegação nas instruções. | Percorrer passos. | Fluxo fluido sem erros. |
| Continua na próxima página... | | | | |

Tabela 6.1

| ID | Req. | Objetivo do Teste | Procedimento | Resultado Esperado |
|------|-------|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| CT17 | RF10 | Emitir relatório consolidado. | Gerar relatório mensal. | PDF gerado com dados íntegros. |
| CT18 | RNF02 | Testar disponibilidade do sistema. | Simular instabilidade de rede. | Sistema mantém operação sem travamentos. |
| CT19 | RNF03 | Testar desempenho da interface. | Executar múltiplas ações simultâneas. | Sem queda de performance perceptível. |
| CT20 | RNF04 | Verificar segurança de acesso. | Login com senha incorreta. | Acesso negado com notificação. |