

Parte V

Uma visão sistêmica de projeto

12

Alguns aspectos relevantes em projetos

“Great things are not done by impulse, but by a series of small things brought together.”

– Vincent Van Gogh

Embora esta obra tenha um foco maior no tratamento teórico de controladores, este capítulo foi incluído para que se chame atenção a vários fatores relevantes no desenvolvimento prático de um sistema de controle.

Uma proposta para organizar a apresentação das etapas de projeto de um sistema de controle é adaptar as recomendações da Engenharia de Sistemas.

Entre as boas fontes de informação a respeito de Engenharia de Sistemas estão: (SHEA, 2020), (INCOSE, 2015) e (KOSSIAKOFF et al., 2020).

Para efeito didático, a apresentação segue uma sequência de etapas usualmente utilizadas no Projeto de Sistemas de Controle, agrupadas conforme a tabela a seguir.

Análise	Projeto	Comissionamento
Coleta de Informações	Modelagem Matemática	Implementação
Estudo do Processo	Escolha do Enfoque	Entrega do Produto
Definição dos Objetivos	Seleção dos Componentes	Sintonização Fina
Descrição das Restrições	Ajuste dos Parâmetros	Operação Assistida
Especificação de Requisitos	Simulações	Manutenção
Revisão Crítica	Documentação	Desativação

A tabela reflete um detalhamento simplificado das etapas de Concepção, Desenvolvimento, Produção, Utilização, Suporte e Desativação mencionados em

obras sobre Engenharia de Sistemas.

12.1 Coleta de Informações

O desenvolvimento de um controlador requer várias informações, além daquelas relacionadas ao funcionamento do processo em si.

Apenas como exemplo, podem ser mencionados:

- Local de Operação (nos satélites, dissipar calor é um problema por estar no vácuo).
- Grau de segurança (nos aviões de passageiros, esse quesito é de grande relevância).
- Durabilidade (com o coração artificial, substituições são arriscadas).
- Limitações físicas (peso não é problema para um navio, mas sim para um avião).
- Custo (um robô de brinquedo muito caro vai vender pouco).
- Normas (equipamentos clínicos fora das normas não serão certificados).
- Padrões (estando fora dos padrões internacionais a manutenção será dificultada).
- Eficiência (é difícil reabastecer satélites em órbita com combustíveis).
- Manutenção e garantia (em geral, “simple is beautiful”).

Nota-se que os vários requisitos podem ser conflitantes e impactar na viabilidade do projeto.

12.2 Estudo do processo a ser controlado

De modo geral, “só se controla bem um processo que é bem conhecido”, e alguns comentários pertinentes são:

- Se o processo a ser controlado é concebido de forma concomitante com o controlador, há uma potencial vantagem em comparação com o caso em que o processo já existe e busca-se apenas agregar um controlador. Se o processo e o controlador são projetados de modo integrado, o desempenho de ambos pode ser favorecido em vista de uma melhor harmonização.
-

- Se o processo envolve fenômenos intrincados e complexos, poderá haver a necessidade de fazer aproximações que levam a modelos incertos ou serem afetados por variáveis exógenas de modo adverso e inesperado.
- É de particular importância a caracterização das restrições, tanto as físicas quanto as operacionais, as administrativas ou as legais. Como exemplos, podem ser mencionados:
 1. Físicas: fim de curso de um pistão, volume do controlador, tensão máxima fornecida por um conversor D/A etc.
 2. Operacionais: fator de segurança para a pressão máxima em um vaso, utilização em ambiente hostil, segurança contra *hackers* etc.
 3. Administrativas: treinamento de recursos humanos, recursos financeiros para implementação, custo das paradas não programadas, disponibilidade de estoque de peças etc.
 4. Legais: necessidade de certificações, atendimento a normas diversas etc.

12.3 Definição dos objetivos

Em muitos textos sobre controle de sistemas, são comuns as seguintes características de comportamento a serem exibidas pelo controlador:

- Estabilidade: por exemplo, no caso de sistemas LTI, exigência de que todos os polos estejam no interior do semiplano esquerdo.
 - Rapidez: às vezes especificado através do tempo de subida para uma entrada tipo degrau.
 - Precisão: que pode ser eventualmente quantificada pela covariância do erro em regime permanente.
 - Acurácia: por vezes medido como percentual de erro em relação ao valor especificado da saída em regime permanente.
 - Eficiência: podendo ser o consumo médio de energia ao longo de um período predefinido, em operação rotineira.
 - Robustez: que pode ser representado pelas margens de ganho e de fase.
 - Tolerância a falhas: caso em que algumas falhas são compensadas por mecanismos de mitigação, como redundância de atuadores.
-

Na fase de especificação dos requisitos, apresentado mais à frente, são discutidas as várias formas de quantificar essas características.

12.4 Caracterização das restrições

Em projetos práticos, deve-se atentar para algumas restrições adicionais, além daquelas próprias da operação do controlador.

Podem ser mencionados, a título de exemplo, algumas restrições que são decorrentes de fatores como:

- Nível de vibração: veículos que trafegam em pistas irregulares.
- Máxima temperatura admissível: posicionador tipo manipulador mecânico para estufas de tratamento térmico.
- Campos eletromagnéticos: proximidade do equipamento a uma máquina de solda a ponto.
- Disponibilidade de Capital: Recursos financeiros limitados.
- Operação no vácuo: no robô móvel para exploração lunar não é possível utilizar *coolers* tipo ventoinha.
- Propagação de ondas eletromagnéticas para comunicação: equipamento de vistoria para o fundo do mar.
- Massa e Volume: mísseis antitanque pequenos lançados por soldado devem ser portáteis.
- Legislação: sustentabilidade, patentes, externalidades como a poluição, critérios de homologação etc.

12.5 Especificação dos requisitos

Além de especificações usualmente tratados em Teoria de Controle, tipo

- $t_r < 1$ s, $M_P < 20\%$ e $e(\infty) = 0$ deve-se levar em conta para entrada degrau

devem ser contemplados aspectos tais como:

- Tecnologia escolhida: cilindro hidráulico de 50.000 N \rightarrow massa da bomba > 30 kg
-

- Condições ambientais: temperatura -30° a 50° e Vibração $< 200\text{ m/s}^2$
- Condições de operação: manutenção de 6/6 meses, pureza do insumo $> 90\%$
- Disponibilidade financeira: custo menor que R\$ 3.000,00
- Normas e padrões: equipamentos clínicos \rightarrow isolamento galvânico e recomendação de usar equipamento ACME porque essa é a marca usada no resto da fábrica
- Confiabilidade: $MTBF > 10.000h$ (*mean time between failures*)
- Descartabilidade: utilização de material nuclear

12.6 Revisão crítica

É salutar que sejam feitas revisões críticas para verificar o bom andamento do projeto, atendendo para detalhes como:

- Consulta geral a todas as partes envolvidas.
- Aprovação do *stakeholder*.
- Cuidado com “esquecimentos”: uma vez o desenvolvimento já está em andamento, modificações das especificações de requisitos podem ter impactos sérios.
- Atualização de cronograma e marcos detalhados.
- Definição das entregas.
- Documentação.
- Participação de especialistas fora do grupo específico de trabalho.

12.7 Modelagem matemática

Antes da escolha do método para a obtenção de modelos matemáticos, valem algumas reflexões:

- Navalha de Ockham (adaptado da Wikipédia: “*também chamada de princípio da economia, refere que a formação de hipóteses explicativas exige parcimônia em termos de complexidade*”).
-

- Lembrar sempre a frase de George E. P. Box, 1976: “*All models are wrong, but some are useful*”.
- Modelo de Projeto \times Modelo de Avaliação: muitas vezes é interessante fazer o projeto para um modelo mais simples e avaliar o resultado em um modelo mais completo com ruídos, variações temporais, e não linearidades.
- Verificação \neq validação:
 - Verificação \rightarrow *did the things right*
 - Validação \rightarrow *did the right thing*
- Incertezas: identificação, linearização, redução da ordem de modelos e outros procedimentos podem introduzir incertezas.
- Modelo do Meio Ambiente: níveis de ruídos e perturbações, variabilidades sazonais, erros humanos e muitos outros fatores.

À luz dessas reflexões e das informações disponíveis, opta-se por métodos de caixa preta, cinza ou branca e são utilizados os procedimentos ou algoritmos mencionados nos capítulos de modelagem.

12.8 Escolha do Enfoque

A escolha da estrutura ou da classe de leis de controle a ser utilizada decorre do enfoque (filosofia) preferido pelo projetista.

- *Off the shelf* \times controlador customizado: os dois tipos mais comuns de controladores “de prateleira” são o liga-desliga e o PID. Além de controladores PID industriais, são disponíveis equipamentos como os controladores lógicos programáveis (CLP) e os *programmable automation controllers* (PAC).
 - Analítico \times numérico: é muito provável, em algum momento, ter que se valer de métodos numéricos. No entanto, o que se destaca aqui é o crescente uso de enfoques que, de partida, envolvem extenso processamento numérico, como é o caso daquele baseado em redes neurais. Isso se deve ao fato de que, na maioria das vezes, o aprendizado de redes neurais é baseado em métodos de otimização numérica.
-

- Heurístico \times formal: Além de métodos heurísticos famosos, como o de Ziegler-Nichols e o de Cohen-Coon, mecanismos heurísticos baseados em experiência do operador podem ser codificados com o auxílio de regras *fuzzy*.

12.9 Seleção de componentes

- Cada componente possui características próprias, sendo que algumas delas são tratadas em seções próprias (sensores, transdutores, atuadores e processadores digitais).
- Vários componentes “baratos” redundantes \times um controlador único, de melhor “qualidade”. Vários sensores mais simples podem ser operados simultaneamente e a medida ser a média entre as leituras. Além disso, vários sensores podem operar com redundância para mitigar o caso de falha de um deles.
- Redundância heterogênea: atuadores de tipos diferentes podem operar em *stand by*, pelo menos para prover um *graceful degradation* no caso de falha do sistema principal.
- Redundância analítica: sensores de tipos diferentes podem ter as medidas relacionadas por uma expressão analítica (matemática), de modo que a leitura de um pode ser combinado ou confrontado com outros.
- É importante ressaltar que a seleção dos diversos componentes deve ter sempre em vista a integração no sistema como um todo. Em particular, deve-se atentar para o fato que sensores, atuadores e o processador podem operar com períodos de amostragem diferentes, levando a sistemas *multirate* e problemas de sincronização.

12.9.1 Sensores e atuadores

- Sensor é a parte do mecanismo de medida diretamente afetado pelo fenômeno que gera a grandeza a ser medida.
 - Transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Por exemplo, energia térmica em energia elétrica (termopar).
 - No presente módulo será adotado o termo sensor para designar o dispositivo de medida da saída.
-

- Usualmente as saídas preferidas são correntes elétricas de 4 a 20 mA ou 0 a 10 V. Ainda são encontradas saídas tipo 3-15 *psig* em controladores pneumáticos (interessante para uso em ambiente com produtos inflamáveis, não requerendo barreira intrínseca).
- Atuador é um dispositivo que ajusta a variável manipulada do sistema físico (bombas, motores, cilindro hidráulico, resistores de aquecimento).

Seleção de sensores

As escolhas dos sensores devem levar em consideração diversas características tais como:

- Faixa de operação (faixa de atuação, *range*): por exemplo, o termopar Tipo K (junção Níquel-Cromo e Níquel-Alumínio) possui faixa de operação entre -200°C e 1200°C . Por outro lado, um termistor (NTC - *Negative Temperature Coefficient*) possui, tipicamente, uma faixa de operação entre -100°C e 300°C .
 - Ambiente em que pode ser utilizado. Por exemplo, no vácuo, imerso em fluido, sob elevada vibração, sob temperaturas muito baixas etc.
 - Resolução: é a menor variação da grandeza monitorada que produz uma variação na medida. Por exemplo, se um conversor análogo digital (A/D) utiliza 8 bits, para representar o valor de uma grandeza que varia de 0 a 100 unidades, então a menor variação percebida é $100/2^8 = 0.3906$, mas, se utiliza 12 bits, tem-se a resolução de $100/2^{12} = 0.0244$
 - Precisão e exatidão (acurácia): precisão se refere ao grau de variação de resultados quando se realizam várias medições de uma mesma grandeza sob condições iguais, enquanto exatidão indica o quão próximo o valor medido está próximo ao valor real. Por exemplo, um sensor de deslocamento linear (*linear variable displacement transducer - LVDT*) utilizado com um circuito muito ruidoso de média zero pode ser acurado na média de muitas leituras, mas uma leitura única pode estar bastante afastada do valor real. A exatidão é definida numericamente como o máximo erro entre o valor verdadeiro e o valor medido. A precisão se relaciona com a repetibilidade, em que medidas consistentes são obtidas através de múltiplas medições sob condições idênticas de ambiente e em curto espaço de tempo.
 - Sensibilidade: o termopar Tipo K possui sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Porém, se o amplificador for ruidoso e o conversor A/D utilizar poucos bits, a saída pode ter pouca precisão e baixa resolução.
-

- Relação sinal/ruído: é importante notar que valores absolutos podem não representar bem o efeito do ruído. Por exemplo, um ruído de 2V em um sensor que monitora 220V pode ser aceitável, mas não seria adequado para monitorar 5V.
- Linearidade: expressa o quanto a saída y pode ser descrita por uma expressão do tipo $y = \alpha x$ em que α é uma constante. Usualmente a linearidade é especificada em termos da percentagem

$$Linearidade = \max_{x \in [x_{min}, x_{max}]} \left\{ \frac{|y_{erro}(x)|}{FS} \right\} 100\% \quad (12.1)$$

em que $y_{erro}(x) = y_{medido} - \alpha x$ e $FS = \alpha (x_{max} - x_{min})$. O termo *Full Scale* representa o fundo de escala ou a faixa de variação da saída.

- Presença de deriva (ou drift) ou de viés (bias, offset): por exemplo, em giroscópios integradores, o ângulo indicado pode apresentar um desvio progressivo com o tempo (deriva), da forma $\theta(t) = \theta(0) + \alpha t$, e um circuito eletrônico pode apresentar um erro constante (viés) devido à assimetria das fontes de tensão $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$.
- Histerese, zona morta, folga, saturação e outras não linearidades: por exemplo, uma mola que não obedece à Lei de Hooke poderia ser $x = \alpha \sqrt[3]{f}$, representando um “endurecimento” ao longo do seu estiramento.
- Grau de estabilidade: às vezes o termo estabilidade é utilizado no sentido de que as propriedades do sensor são constantes por um longo período de tempo. No contexto de sensores dinâmicos, a estabilidade pode ser interpretada, também, de forma convencional, como no caso de se utilizar um pêndulo para a detecção do vertical local.
- Tempo de resposta e atraso puro: embora a aproximação assumindo resposta instantânea do sensor seja adequada em muitas situações, o tempo de resposta pode ser não desprezível em algumas aplicações. Por exemplo, um anemômetro de fio quente requer um processo de transferência de calor que pode ser representado por um modelo dinâmico cujo tempo de resposta seja significativo.
- Consumo de energia: este aspecto pode ser crucial em aplicações em que a fonte de energia é limitada como no caso de utilização de baterias (que também exigem manutenção periódica) ou que traz inconveniências (como a necessidade de tomadas no campo de operação, ambientes hostis, uso prolongado etc).

- **Custo:** é sempre um fator importante, tanto no desenvolvimento quanto na operação e manutenção.
- **Criticalidade:** alguns sensores são de extrema relevância para o bom funcionamento da malha de controle e geralmente requerem cuidados especiais, tais como redundância, detecção automática de falhas, autotestagem, robustez aumentada etc.
- **Confiabilidade:** é uma característica probabilística que indica a funcionalidade de um item por um determinado período de tempo, geralmente indicado pelo *Mean Time Between Failures - MTBF*.
- **Manutenabilidade:** é a característica de poder ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas mediante procedimentos e meios prescritos (ABNT NBR 5462)
- **Massa e volume:** são características de devem ser consideradas em várias aplicações, como equipamentos portáteis, satélites, *retrofit* de sistemas já existentes em que novos equipamentos não haviam sido planejados etc.
- **Disponibilidade de mecanismos automatizados:** alguns sensores podem ser dotados de mecanismos para autocalibração, autoteste e autoinicialização para se atingir um grau superior de dependabilidade.

Seleção de atuadores

Algumas características de atuadores possuem descrições semelhantes aos dos sensores e a adaptação é bastante intuitiva, caso em que se limita aqui um detalhamento mais elaborado. As escolhas dos atuadores devem considerar características tais como:

- **Capacidade de carga:** por exemplo, no caso de motor de passos, se a carga supera um valor máximo (geralmente especificado pelo fabricante), ocorre o *stall*, ou seja, o rotor não consegue avançar para o próximo passo (*step*).
 - **Tipo de alimentação** (pneumática, elétrica, hidráulica).
 - **Consumo e eficiência:** enquanto os sensores possuem um consumo geralmente baixo e de pouca variação (a menos, por exemplo, que utilize reagentes consumíveis), os transdutores geralmente demandam energia, que, em algumas aplicações, pode ser bastante custosa. Por exemplo, no
-

controle de órbitas de satélites, podem ser utilizados foguetes de propulsão, mas, uma vez que o combustível é consumido, o reabastecimento é proibitivo.

- Exatidão, Precisão, Resolução, Linearidade, Repetibilidade, Deriva, Viés, Estabilidade, Histerese, Atritos Seco, Folga de Engrenagem, Durabilidade, Custo, Confiabilidade, Manutenibilidade, Massa e Volume: esses conceitos são similares àqueles apresentados para os sensores, porém relacionando a ação do atuador em relação aos valores comandados.
- Velocidade de resposta sob cargas variadas: muitas vezes a carga a ser manipulada afeta a dinâmica do atuador. Por exemplo, no caso de um motor elétrico, o transitório depende de fatores como o momento de inércia e do atrito viscoso da carga, podendo haver inclusive efeitos dinâmicos adicionais como a elasticidade do eixo de acionamento.

Processador digital

Com os avanços conquistados no campo da tecnologia digital, os sistemas modernos de aquisição de dados são, frequentemente, baseados em processadores digitais.

A utilização de processadores digitais pode ser tornada mais segura utilizando cuidados específicos, tais como

- Uso de *watchdog timer* (cão de guarda) para reinicializar algoritmos ou softwares em caso de erros.
 - Uso de códigos corretores de erros.
 - *Burn in* para evitar falha precoce dos componentes.
 - Uso de compartimentos selados com temperatura controlada, preferencialmente com uso de trocadores de calor ao invés de ventoinhas e também blindagem eletromagnética.
 - Eliminação de soquetes e conectores para evitar mau contato devido a fadiga por vibração.
 - Uso de componentes *endurecidos* (por exemplo, com encapsulamento especial).
 - Utilização de *warm backup*.
 - Algumas considerações adicionais constam do capítulo que trata o problema de controle por computador.
-

12.10 Ajuste dos parâmetros

Embora em alguns casos mais simples o ajuste dos parâmetros do controlador possa ser realizado através de tentativa e erro, de modo geral, é mais eficaz o uso de métodos analíticos ou numéricos assistido por computador.

São exemplos de métodos de ajuste de parâmetros de controlador

- Métodos gráficos (com ou sem o auxílio do computador), como os que se valem do LGR, curvas de Bode, cartas de Nichols etc.
- Busca numérica, quer seja utilizando algoritmo de otimização ou de satisfação de restrições. Um método não muito elegante, mas que é utilizado com alguma frequência, é o da busca em grade. Se os parâmetros são $p \in [p_{min}, p_{max}]$ e $q \in [q_{min}, q_{max}]$, divide-se o retângulo com uma grade, por exemplo, 10×10 , e testa-se cada (p_i, q_j) .
- Métodos heurísticos que, dependendo das informações disponíveis, podem evitar a necessidade de tentativa e erro. Por exemplo, o método de Ziegler-Nichols é heurístico, mas pode levar a resultados satisfatórios com ensaios simples. Controladores baseados em conhecimentos, em geral, estão nessa categoria, mas eventualmente são combinados com métodos numéricos (por exemplo, para treinamento de redes neurais artificiais ou para ajuste das regras e das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos envolvidos).
- Métodos automatizados ou analíticos como a autossintonização (*self-tuning*), controle robusto, MRAC, MPC e outros.

12.11 Simulações e testes

- Testes são essenciais, principalmente quando foram feitas aproximações (linearização, polos congelados, atraso desprezível, sem atrito seco, sem quantização, viés (*bias*) negligenciado, ruído branco gaussiano etc.).
 - Modelo de Projeto \times Modelo de Verificação: se o teste for realizado com o modelo utilizado no projeto, o resultado será aquele esperado pela teoria. Deve-se, portanto, usar um modelo que contemple os aspectos que foram desprezados.
 - *Hardware in the Loop*: o *iron bird* é um sistema completo e real de parte de uma aeronave montado em um hangar para efeito de testes. Um sistema de navegação inercial montado em uma mesa de três eixos para
-

testes. Embora seja efetivo, há detalhes como o custo, duração para o *setup*, segurança que podem comprometer a viabilidade.

- Protótipos e plantas piloto: embora as simulações sejam muito úteis, é necessário, em projeto de sistemas críticos, a implementação de protótipos, ou plantas piloto que possuem total funcionalidade.

12.12 Documentação

Essa é uma etapa que deve ocorrer em todas as fases do projeto devido a razões variadas.

- Amnésia técnica: projetos não documentados apresentarão dificuldades na atualização, manutenção ou duplicação.
- Verificação de conformidade: uma documentação precisa, detalhada e objetiva permite um acompanhamento eficaz do desenvolvimento do produto de modo fiel ao planejado.
- Implicações legais: em casos de litígio ou processos penais, a documentação pode comprovar (ou não) a adequação do projeto.
- Homologação e certificação: alguns equipamentos críticos tais como equipamentos hospitalares e veículos aéreos requerem a submissão de uma documentação extensa do projeto.
- Controle de custos: a documentação ajuda a controlar os custos, permitindo avaliações dos efeitos da variação do câmbio, taxas de importação, proibição da importação e outros fatores de volatilidade.

12.13 Implementação

A implementação depende, obviamente, do sistema específico em desenvolvimento.

Porém, algumas ponderações são relevantes.

- Os testes de aceitação dos equipamentos são cruciais, pois, uma vez instalados no campo, poderá ser difícil fazer alterações ou até mesmo verificações.
 - A sequência das tarefas envolvidas na implementação pode afetar significativamente a eficácia da implementação.
-

- A partida pode requer procedimentos especiais. Por exemplo, se o controlador vai operar em torno de um certo ponto de operação, mecanismos específicos devem levar o processo às condições iniciais adequadas.
- Atentar para a “curva da banheira” que representa a probabilidade de falhas \times tempo. Em particular, os produtos novos estão sujeitos a maior probabilidade de erros de projeto e de implementação (nos antigos, as falhas são mais relacionadas a desgaste e envelhecimento).

12.14 Entrega

A entrega é uma ocasião especial que, por vezes, demanda uma atenção especial e pode requerer alguns rituais específicos.

- Em alguns setores, é mandatória a certificação realizada por instituições especiais e independentes.
- Todas as parte envolvidas devem ter acesso aos resultados de *check* de conformidade e aceitação.
- Questões de propriedade intelectual, sigilo industrial e patentes podem limitar a entrega de documentação.
- A elaboração de planos de contingência é recomendada para acomodar casos de eventos não antecipados (por exemplo, contar com sobressalentes, instrumentos de medidas, equipamentos de proteção etc.).

12.15 Sintonização fina e otimização

- Diferentemente de simulações, o processo real fornece dados concretos da operação do controlador e a coleta de dados de operação pode propiciar oportunidades para a melhoria do desempenho do controlador.
 - Em alguns casos há um sistema supervisorio ou de *data logging* que permite um monitoramento detalhado da operação do processo, podendo contribuir para a manutenção baseada em condição, correções periódicas dos pontos de operação, melhoria da eficiência e manejo dos insumos etc.
 - O resultado de um problema de otimização depende da função de desempenho (em geral, maximização do retorno ou minimização das perdas). Porém, normalmente existem objetivos conflitantes e, por exemplo, aumentar a taxa de produção de uma máquina pode levar a produtos de qualidade inferior.
-

- Em princípio, uma sintonia fina poderia ser automatizada, mas o custo pode ser a complexidade e talvez o comprometimento da dependabilidade do sistema. (segundo a Wikipédia: “*O termo dependabilidade é uma tradução literal do termo inglês dependability, que indica a qualidade do serviço fornecido por um dado sistema e a confiança depositada no serviço fornecido*”).

12.16 Operação assistida

- Sistemas complexos podem exigir um treinamento específico dos seus operadores, não somente para os procedimentos de rotina, mas também para emergências.
- Em vista da “curva da banheira” já mencionada e de eventos não antevistos, é conveniente que a operação seja assistida, no início da operação, para a eventual necessidade de mitigar os problemas encontrados.
- Mais uma vez, lembrar que a operação assistida envolve custos de pessoal e de material, principalmente se forem feitos experimentos com o processo (por exemplo, aplicar um degrau ou injetar ruídos).
- A operação assistida é uma oportunidade para obter novos conhecimentos para aproveitamento em projetos futuros.

12.17 Manutenção

- É importante lembrar que tanto garantias quanto contratos de manutenção costumam incorrer em elevação de custos.
 - São aplicáveis a manutenção corretiva, a programada e a baseada em condições.
 - Na modalidade de manutenção corretiva, a ação só ocorre após a instalação da falha.
 - Na manutenção programada são feitas ações periódicas compatíveis com expectativa de falhas.
 - Na manutenção baseada em condição, mecanismos especiais monitoram a degradação e são realizadas ações quando um nível de aceitabilidade é ultrapassado.
-

12.18 Desativação

Embora essa etapa não seja sempre relevante, por vezes a desativação pode requerer procedimentos especiais, por exemplo, no caso de envolver materiais radioativos, componentes contaminados por patógenos (bactérias, fungos), substâncias tóxicas etc.

- Analogamente à partida, a desativação de um controlador pode exigir mecanismos especiais, contrastando com paradas abruptas, por exemplo, em decorrência de falhas.
- Se a desativação for permanente, deve-se contemplar procedimentos para descarte, por exemplo, material radioativo (por exemplo, sensor de gramatura de papéis usando raios beta oriundos de Kr85 ou Sr90) ou equipamentos utilizando SF_6 , que é um dos gases envolvidos no efeito estufa).
- A desativação de um sistema mais antigo pode ocorrer devido à atualização tecnológica, por exemplo, substituição de um equipamento analógico para digital.

12.19 Mitigação do efeito de falhas

Infelizmente, não existem sistemas totalmente livre de falhas.

Logo, muitas vezes é necessário incorporar aos sistemas de controle mecanismos para mitigar os efeitos de possíveis falhas, principalmente em sistemas críticos tais como os equipamentos médicos, veículos de transporte (aviões, trens, navios), processos químicos que manipular substâncias letais, equipamentos que utilizam radioisótopos etc.

De modo simplificado, a mitigação pode ser classificada como ações anteriores ou posteriores a uma falha.

Com o intuito de organizar a apresentação, o termo *falha* é utilizado para designar ocorrências tipo “parada de funcionamento” ou “quebra de uma peça”.

Por outro lado, a causa de mau funcionamento de equipamentos em função do envelhecimento do componente (por exemplo, relacionado com a migração de íons em semicondutores, precipitação de cristais em baterias etc.) ou desgaste devido à utilização (pneus “carecas”, engrenagens com folga etc.) será denominado de degradação.

As categorias básicas de métodos relacionados com falhas são aquelas baseadas em séries temporais (sinais ao longo do tempo) e as baseadas em modelos.

12.19.1 Ações pré-falhas

As ações anteriores à falha se referem àqueles realizadas no sentido de:

1. Reduzir os efeitos de mau funcionamento devido a uma degradação progressiva (devida ao desgaste ou o envelhecimento) até culminar em desempenho inaceitável (p. ex., devido a entupimento de duto, oxidação de uma peça). São exemplos: entupimento de dutos e orifícios, oxidação de uma peça, acúmulo de resíduos etc.
2. Reduzir a probabilidade de ocorrência de uma falha abrupta. São exemplos: curtos ou abertos em circuitos elétricos, rompimento de uma tubulação, travamento de um eixo etc.
3. Prolongar a vida útil de componentes degradados. São exemplos: aumentar a potência do *cooler*, ativar uma bomba auxiliar, reduzir o esforço a ser demandado pelo transdutor, relaxar especificações operacionais de desempenho etc.

Várias ações podem reduzir o processo de degradação, tais como a adequada filtragem de fluidos, boa regulação da tensão de alimentação, frequente limpeza de dissipadores de calor, verificação e aplicação periódica de lubrificantes etc.

A utilização de componentes de melhor qualidade (com melhor MTBF - *mean time between failure*) e sua correta utilização (conforme as recomendações do fabricante) também tendem a reduzir o risco de ocorrência de falhas.

A partir do conhecimento do MTBF, pode-se, por exemplo, planejar uma manutenção preventiva, como o que ocorre com os automóveis, tais como troca da correia dentada com 50.000 km, troca dos lubrificante a cada 10.000 km etc...

Um detalhe interessante é que a taxa de falhas tende a ocorrer no início da vida do componente (por exemplo, devido a falhas na montagem, embalagem ou transporte, além de instalação incorreta) ou mais tardiamente, agora devido ao desgaste com o uso ou envelhecimento ao longo do tempo (na literatura da teoria de confiabilidade, o gráfico de taxas de falha com o tempo é referido como a curva da banheira). Em havendo a disponibilidade de sensores e atuadores incorporados no sistema, podem ser realizados testes específicos para aferir o adequado funcionamento dos componentes (*built in tests*).

O prolongamento da vida útil de um componente, ou seja, manter a sua operação com adequada confiabilidade, porém com desempenho reduzido a um nível aceitável, requer a monitoração do estado através de sensores adequados (por exemplo, mediante a medida da intensidade e faixa de frequência das

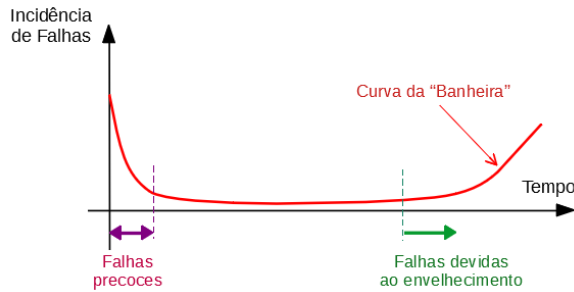


Figura 12.1: Curva da banheira: incidência de falhas ao longo da vida útil de um componente.

vibrações ou do ruído audível, análise das características dos eletrólitos das baterias, detecção da presença de limalhas no fluido de lubrificação etc.).

A figura 12.2 apresenta, graficamente, o conceito de RUL (textitremaining useful life), utilizável tanto no enfoque de prolongamento da vida útil de componentes, bem como para manutenção baseada em condição. Ter uma estimativa

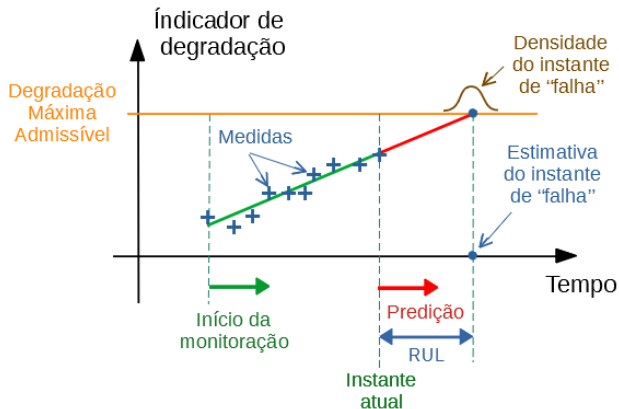


Figura 12.2: Estimação do *remaining useful life*.

do instante de ocorrência de uma falha com um adequado nível de significância é útil para a segurança da operação, bem como do ponto de vista econômico, no sentido de se evitar o descarte de um componente ainda hígido e também para planejar o estoque de peças de reposição.

12.19.2 Ações pós-falhas

Quando ocorre uma falha, faz-se necessária uma manutenção corretiva ou algum mecanismo de tolerância, tais como a ativação de equipamentos redundantes ou de reserva. Em alguns casos é invocada a intervenção do operador humano.

Em linhas gerais a ocorrência de falhas leva aos processos de detecção, isolamento e recuperação, podendo envolver diagnóstico e mitigação propriamente dita da falha (*fault detection, isolation, and recovery* - FDIR).

Detecção de falhas

Para se garantir a segurança ou a continuidade das operações, pode-se valer também de mecanismos de tolerância a falhas, tipicamente baseadas na existência de algum tipo de redundância.

A detecção de falha pode ser realizada com base em diferentes enfoques, como ilustrado com alguns exemplos.

- Verificação da consistência entre três sensores que monitoram a mesma grandeza e fazer uma votação 2 em 3.
- Verificação da consistência entre sensores de tipos diferentes, mas que se relacionam segundo um modelo analítico (por exemplo, entre a vazão medida por sensor Doppler e a queda de pressão do fluido que atravessa um orifício).
- Verificação da consistência entre o modelo identificado (com os parâmetros estimados) e o modelo nominal (com os parâmetros nominais).
- Verificação da paridade dos dados transmitidos.
- Utilização de cão de guarda (*watch dog timer*.)

Isolação da falha

Detectando-se uma falha, aciona-se em geral um alarme e um sinal que inicia alguma forma de mitigação.

É importante notar que um mau funcionamento de algum componente pode eventualmente disparar vários alarmes distintos relacionados com processos ligados a essa falha e que podem confundir o operador, ou então o mesmo alarme ser acionado repetidas vezes se não houver um mecanismo de *debouncing*.

O passo subsequente é a isolação da falha, ou seja, o reconhecimento de qual

a ocorrência que originou os sintomas da falha (qual sensor, qual subsistema, qual processador etc.).

Dependendo da ocorrência, são tomadas ações que podem variar de comutação para o modo normal, parada emergencial, operação degradada ou acionamento de mecanismos de tolerância a falhas.

Ativação do *back up*

Um controlador *back up* pode ser do tipo sempre ativo ou estar em *stand by* e ser ligado quando necessário.

Assumindo que se tem componentes idênticos, independentes (pois se, por exemplo, os dois são alimentados pela mesma rede elétrica, a falha de um pode estar relacionada à do outro) e com a densidade de probabilidade de falha dado por $p(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, tem-se que o instante esperado (médio) de falha é $E[t] = \frac{1}{2\lambda}$ para conexão em série, $E[t] = \frac{3}{2\lambda}$ para conexão paralelo e $E[t] = \frac{2}{\lambda}$ para conexão *stand by* (uma unidade simples teria $E[t] = \frac{1}{\lambda}$).

Convém mencionar que, embora a conexão *stand by* tenha o melhor MTBF, há a necessidade de “ativar” a unidade *back up*, que pode estar ligada mas inativa ou mesmo desligada.

Controladores tolerantes a falhas

Para se garantir a segurança ou a continuidade das operações, pode-se valer também de mecanismos de tolerância a falhas, tipicamente baseadas na existência de algum tipo de redundância e adequadas leis de adaptação, tanto paramétrica quanto estrutural.

12.20 Condições operacionais de sistemas de controle

Mesmo que o projeto tenha sido realizado obedecendo as boas práticas e que não tenham ocorrido degradações ou falhas de componentes, a tentativa (ou a necessidade) de operar o sistema em condições além dos limites estabelecidos pode resultar em situações inconvenientes. Assim, é interessante que se estabeleçam regiões (envelopes) de operação para que o sistema de controle possa exibir um desempenho adequado.

Por exemplo, as regiões de operação poderiam ser classificadas em:

1. Operação normal ou rotineira: o sistema exibe alto desempenho em termos de eficiência, precisão, reduzido desgaste de componentes etc.
-

2. Operação intensiva: o sistema ainda exibe bom desempenho em termos das especificações mais relevantes, mas pode ter a eficiência reduzida, apresentar maior desgaste de componentes, maior dispersão dos erros etc. Trata-se, por exemplo, de casos de emergência, atrasos na produção, demandas acima do esperado etc.
3. Operação limite: condição de operação que não deve ser ultrapassada, possivelmente porque o projeto não levou em consideração essa situação em que podem ocorrer valores excessivos de grandezas como pressão, temperatura, tensão, corrente, força etc. e que eventualmente incorra em perda da controlabilidade (*loss of control*).

Para que um sistema não passe a operar em uma condição limite, é interessante que se incorporem mecanismos de “proteção de envelope”, ou seja, incluir no projeto mecanismos que impeçam o processo de adentrar tal região de operação. Ou existir um mecanismo de recuperação, de tal forma que, se for ultrapassada a fronteira da região limite, existam formas de voltar a ter a controlabilidade.

Caso se reverta ao modo manual, deve-se ter em mente que o operador humano deve estar devidamente treinado para lidar com situações não rotineiras

No caso de controle de aeronaves, os conceitos estão bem elucidados do documento FAA AC-25-7C.

O projeto de controladores deve seguir as boas práticas recomendadas pela Engenharia de Sistemas, uma vez que a obtenção das leis de controle é apenas uma parte do problema. Vários fatores, como a segurança, o custo, a disponibilidade, a sustentabilidade e muitos outros, devem ser considerados em aplicações críticas e sofisticadas, como o caso de veículos de passageiros, equipamentos médicos, centrais nucleares, armamentos etc.

12.21 Comentários

As etapas para o desenvolvimento de Sistemas de Controle que são mencionadas neste texto são inspiradas na literatura de Engenharia de Sistemas.

Uma boa fonte de informações sobre Engenharia de Sistemas é o texto aberto da NASA: National Aeronautics and Space Administration - *NASA - Systems Engineering Handbook*, NASA SP-2016-6105, Rev2, NASA Headquarters, Washington, 2016.

A primeira utilização da palavra *reliability* é atribuída ao poeta Samuel T. Coleridge, 1816. Vide Saleh, J. H. e Marais, K. Highlights from the early (and

pre-) history of reliability engineering. *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, v. 91, n. 2, p. 249-256, 2006.

A origem do conceito de FMEA é atribuído ao documento MIL-P-1629, *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* de 9 de novembro de 1949, patrocinada pelas Forças Armadas dos Estados Unidos.

O surgimento da disciplina *Reliability Engineering* ocorreu por volta de 1950, quando a Força Aérea dos Estados Unidos apurou que o custo de reparar e substituir equipamentos eletrônicos da época era cerca de dez vezes o seu custo original.

Constituiu-se, então, o *Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment (AGREE)* pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, operando entre 1956 e 1958.

12.22 Exercícios

12.22.1 Exercício: Especificações de requisitos

Conceber potenciais requisitos para o problema de controle envolvidos em seguintes atividades

1. Iluminação hospitalar
2. Tratamento de efluentes (esgoto)
3. Construção de drones
4. Fabricação de brinquedos

12.22.2 Prognóstico de falhas

Que vantagens econômicas e sociais poderiam advir de um sistema que permita prognosticar falhas em equipamentos de engenharia?

12.22.3 Falhas, faltas, mau funcionamento, defeito e erro

Verificar o significado das palavras listadas no título da questão, tanto em termos da língua portuguesa, quanto da inglesa.

12.22.4 Exercício: Controle tolerante a falhas

Dissertar sobre como seria um controle tolerante a falhas para o sistema de controle de profundidade de um submarino.

12.22.5 Exercício: Manutenção

Comentar sobre:

1. Manutenção corretiva
2. Manutenção programada
3. Manutenção preditiva
4. Manutenção baseada em condição

12.22.6 Exercício: Qualidade

1. O que se entende por um sistema de controle de alta “qualidade”?
2. O que se entende por um sistema de controle de baixa “qualidade”?

12.22.7 Exercício: Produtividade

Como se expressaria o conceito de produtividade em termos das especificações de desempenho de um controlador automático?

12.22.8 Exercício: Dependabilidade

Um termo que tem recebido muita atenção é *dependabilidade*. Buscar o significado desse conceito na Internet e comentar sobre a possibilidade de incorporá-lo como parte dos requisitos de um sistema de controle.

12.22.9 Exercício: Inovação

Um termo que tem recebido muita atenção é *inovação*. Há diferença de significado entre as palavras *inovação* e *invenção*? Cite exemplos de *inovação* e *inovação* na área de sensores e transdutores.

12.22.10 TRIZ

A sigla TRIZ, originada do russo *Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*, pode ser traduzido como *Teoria da Resolução Inventiva de Problemas*. Buscar elementos dessa teoria na Internet e comentar sobre o potencial de uso dessa teoria no desenvolvimento de projeto de sistemas de controle.
