

# Sistemas Embarcados - Técnicas para Aumentar a Confiabilidade Eletrônica

CC(EN) Durval Sanches da Silva

Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha, Rua 1º de Março, 118 – Centro – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 20010-000  
sanches@ita.br

**Resumo** — Com o advento do uso da energia eletromagnética para destruição de sistemas eletrônicos (bomba de pulso eletromagnético) e o uso cada vez maior de sistemas embarcados, torna-se patente a importância do contínuo funcionamento de sistemas embarcados (confiabilidade) para garantir o êxito das missões. Este artigo sugere técnicas básicas para aumentar a confiabilidade dos sistemas embarcados. Essas técnicas permitem identificar as ações para reduzir as falhas, de tal forma a antecipar os efeitos dos problemas provocados pelas solicitações ambientais (naturais e induzidas) pelo tempo necessário ao trabalho a ser realizado.

**Palavras-chaves** — aterramento, BITE, confiabilidade, derating, ESD, glitches, hot circuit insertion, MTBF, PCI, plug-in, redundância, VANT, watchdog.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas embarcados (*Embedded System*) são sistemas eletromecânicos de propósito determinado, controlado por um computador/microprocessador (que normalmente é invisível ao usuário) e especialmente projetados para executar funções específicas, que atendem a pré-requisitos de tempo definidos (tempos real). [1] Esses sistemas são normalmente otimizados de forma a apresentarem dimensões e confiabilidades para a atividade em que é empregado. Muitos destes sistemas realizam funções críticas de controle e trabalham integrados para formar um sistema mais complexo, como, por exemplo: os sistemas aviônicos, o *fly-by-wire* de um avião ou o sistema de controle de um VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado); onde falhas podem causar catástrofes materiais e/ou humanas. Por esses motivos, a permanência em funcionamento dos sistemas embarcados em uma missão é cada vez mais crucial para o seu êxito. A confiabilidade desses sistemas é o fator que determina o grau de segurança dos mesmos.

Como pode ser observado na Fig. 1, um sistema apresenta uma probabilidade de funcionamento que diminui com o tempo, e essa probabilidade é normalmente avaliada pela figura de mérito - *MTBF* (Tempo Médio entre Falhas - *Mean Time between Failures*).

## II. TÉCNICAS PARA AUMENTAR A CONFIABILIDADE

Uma das definições de Confiabilidade é: a probabilidade de que um sistema irá operar, dentro de níveis pré-definidos de desempenho, por um específico período de tempo, quando submetido a determinadas condições ambientais, para as quais foi projetado.

Para se garantir a confiabilidade dos sistemas embarcados, deve-se empregar processos e procedimentos que envolvam a seleção de componentes e/ou materiais e a sua adequada aplicação. Esses processos devem levar em consideração:

- A definição das condições ambientais de uso do sistema;
- O estabelecimento dos requisitos de vida útil do sistema;
- A utilização de modelos de predição de confiabilidade;
- Os testes dos protótipos;
- O *derating* (fator de redução) dos estresses do sistema; e [2]
- A reavaliação e mudança do projeto para atingir a robustez necessária.

A confiabilidade adequada para o sistema é alcançada pelo controle dos diversos fatores que influenciam o ciclo de produção e utilização do equipamento (**projetos**, produção, instalação/manutenção e utilização).

Neste artigo propõe-se algumas técnicas de projeto para aumentar a confiabilidade dos sistemas eletrônicos. [2] [3]

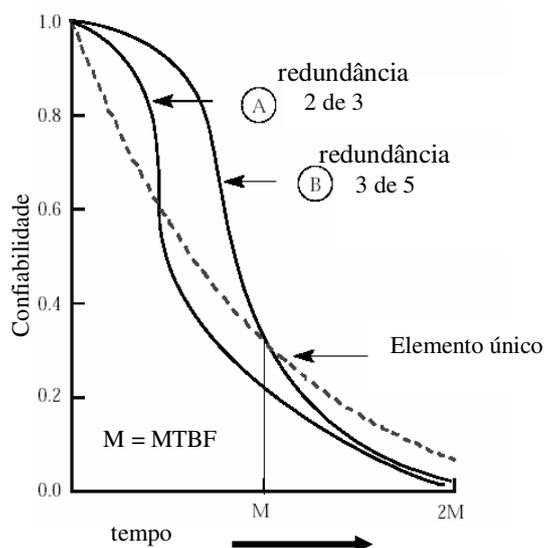


Fig. 1 - Confiabilidade X tempo

## III. FATORES DE PROJETO

Na fase de projeto do sistema eletrônico, deve-se avaliar: a configuração do circuito e os parâmetros dos componentes selecionados, o lay-out da placa de circuito impresso (PCI) e do sistema, as condições de operação e os manuais que serão disponibilizados para os diversos tipos de usuários (mantenedor, usuário). Pontos a serem considerados para a confiabilidade do projeto:

### A) Projeto do sistema

Nesta fase é feita a análise da divisão do sistema em subsistemas, previsão de facilidades de testes e autotestes, alarmes e indicação de falhas (*BITE - Built-In-Test Equipment*); necessidade do uso de redundância.

A adoção dos seguintes subsistemas e filosofias aumentam a confiabilidade/disponibilidade do sistema:

- Circuitos de *watch dog timer* – como visto na Fig. 2
- a ocorrência de ruídos em sistemas digitais pode levá-los a apresentar comportamentos inadequados. Um circuito utilizado para reconduzir o sistema/circuito ao seu comportamento normal é o circuito *Watchdog*, ou *watch dog timer* ou relógio cão-de-guarda. O sistema digital gera periodicamente um sinal que reinicializará o contador (*Watchdog*). Caso esse contador não seja reinicializado, ao fim do seu tempo programado de contagem, esse irá gerar sinais para reconduzir (resetar) o sistema a uma condição conhecida, reestabelecendo o controle. [4] [5] [6]

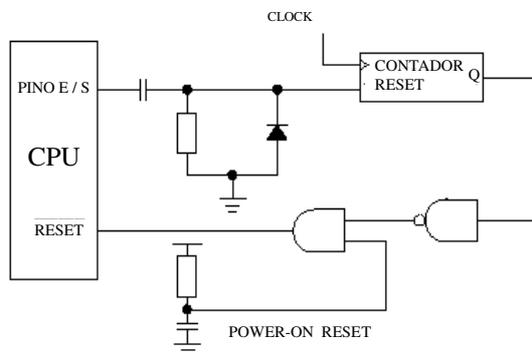


Fig. 2 - Circuito *watchdog*

- Modularização - em conjunto de com a tecnologia *hot circuit insertion* – permite diminuir o tempo de reparo, pois a subdivisão do sistema em subsistema/módulos aliada a utilização da tecnologia *Plug-in – lowest replaceable unit (LRU)* facilita a substituição dos módulos danificados. *Hot circuit insertion* é obtido em sistemas eletrônicos em que os contatos das tensões de alimentação são fechados antes que os contatos dos outros sinais nos conectores, permitindo assim, a conexão das unidades com o sistema ativo.

- Redundância ou paralelismo [8]

O princípio dos sistemas (subsistemas) redundantes é a disponibilidade de mais de um canal (meio, componente, subsistema, submódulo) para executar a função necessária, esses meios não necessitam ser iguais.

A Redundância é um modo de conseguir o aumento de confiabilidade, pois permite construir sistemas de alta confiabilidade utilizando componentes de mais baixa confiabilidade.

A Redundância pode ser:

- estática ou ativa (exemplo: paralela / votação ), como vista na Fig. 3.
- dinâmica ou *stand-by* (passiva (não-operativa) ou *cold stand-by*), como vista nas Fig. 4 e Fig. 5.
- passiva (operativa) ou (*hot/warm* ) *stand-by*, como vista na Fig. 6.

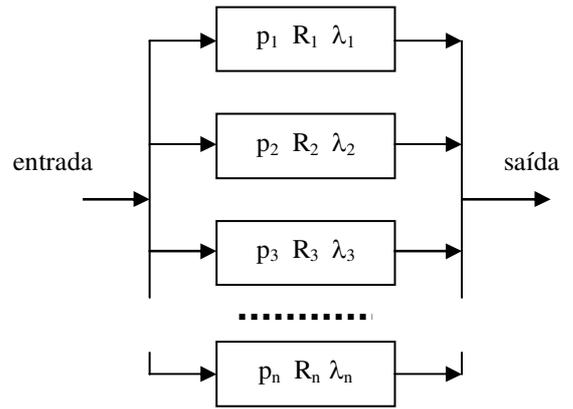


Fig. 3 - Redundância ativa

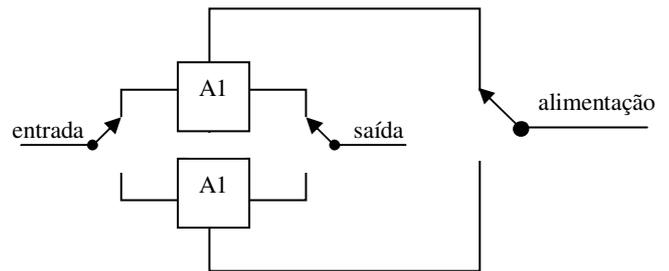


Fig. 4 – Redundância passiva não-operativa

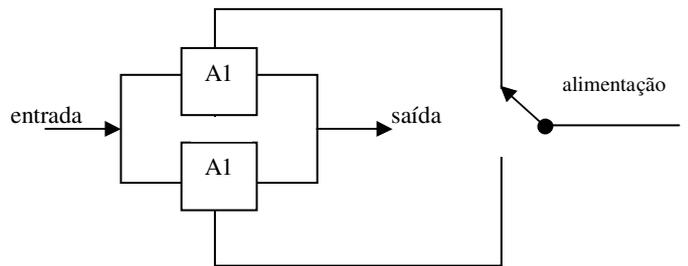


Fig. 5 – Redundância passiva não-operativa

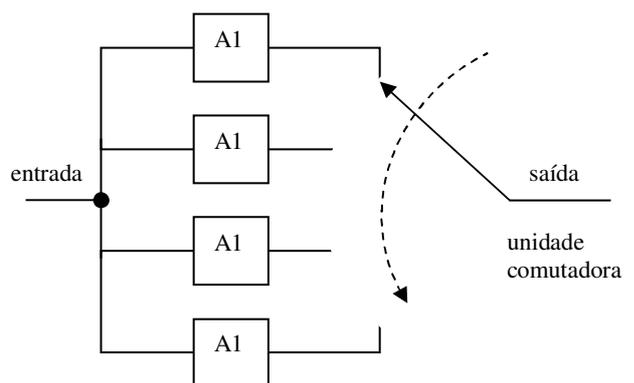


Fig. 6 - Redundância passiva

Para aumentar o *MTBF* dos sistemas embarcados, deve se diminuir as interrupções de funcionamento por causa de falhas de suas partes, como as duas maiores causas operativas que provocam mau-funcionamento em componentes eletrônicos são: transientes no circuito e superaquecimento dos componentes, para melhorar a robustez dos sistemas embarcados e aumentar a sua confiabilidade, pode se utilizar:

a) Para aumentar a resistência (robusticidade) dos sistemas embarcados aos transientes e as descargas eletrostáticas:

- *layout*

O *layout* da PCI deve priorizar a colocação dos componentes mais sensíveis, os quais devem ser colocados preferencialmente próximos ao centro da PCI, pois apresenta menor probabilidade de contato durante a manipulação da PCI. Uma proteção a mais é a colocação de uma borda aterrada ao redor da PCI, a qual atuará como blindagem, mas conectada ao terra do circuito por meio de um resistor de elevado valor (1 a 10MΩ), para descarregar a ESD (*electrostatic discharge* - descargas eletrostáticas). [9]

Para minimizar os efeitos da temperatura deve haver a escolha apropriada do material da PCI.

Para minimizar o acoplamento indutivo dos sinais, deve-se utilizar múltiplas linha de alimentação em diferentes camadas e fazer a transposição das mesmas em intervalos regulares, diminuindo, com esses procedimentos, a área do anel magnético de interferência.

Deve-se utilizar capacitores (de desacoplamento de placa e de componente) e gotas de ferrites (nos terminais das fontes que chegam a PCI) para reduzir os ruídos e os *glitches* (pulsos com duração menor que a menor largura de pulso aceitável no sistema digital – normalmente relacionado ao pulso de relógio do sistema) provenientes da fonte de alimentação causados pelos circuitos digitais. [5]

Para minimizar os efeitos da interferência eletromagnética (*EMI*), deve haver uma separação entre os circuitos geradores de ruídos e os circuitos sensíveis, e entre os circuitos analógicos e os circuitos digitais, isto é, deve ser evitada a impedância comum, como visto na Fig. 7. [5]

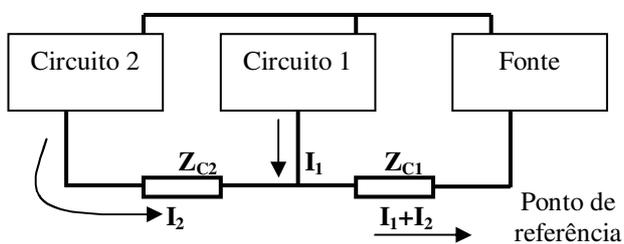


Fig. 7 - Impedância comum -  $Z_{Ci}$  – impedância do sistema de fornecimento de energia ente os circuitos

Também deve-se ter muito cuidado na passagem dos cabos dos sistemas, principalmente na integração / interligação dos sistemas embarcados, para se evitar os muitos problemas de interferência, que podem surgir do acoplamento indevido dos sinais nesses cabos.

- blindagem e aterramento

Blindar os invólucros dos equipamentos (gabinetes) – a blindagem utiliza o princípio da reflexão das ondas eletromagnéticas incidentes ou a absorção pelo material da blindagem para impedir a propagação da energia eletromagnética, para o interior do equipamento ou para o exterior do equipamento (propiciando a compatibilidade eletromagnética).

A seqüência de montagem das placas também pode atuar como blindagem, pois a colocação das PCI mais suscetíveis mais para o interior do equipamento permite que as PCI mais imunes sirvam de blindagem para as mais suscetíveis.

Aterramento - sempre que for possível deve-se utilizar a seguinte ordem do tipo de conexão para o terra de sinal: multiponto, paralelo e por último série, minimizando desta forma a impedância comum, como visto na Fig. 7. [5]

b) Para aumentar a resistência (robusticidade) dos sistemas embarcados a temperaturas e umidades elevadas:

- Utilizar a tecnologia (*ASICs*). Componentes *ASICs* - *Application-Specific Integrated Circuit* - descrevem uma variedade de componentes que incluem: *Programmable Logic Devices (PLD)*, *Field Programmable Gate Arrays (FPGA)*, *gate arrays*, semicondutores customizados, os quais são projetados para uma aplicação específica. [2]

- Utilizar *Multi Chip Modules (MCMs)* – O *MCM* pode ser definido como um circuito híbrido de grande densidade, onde a área da ocupação do silício seja aproximadamente de 50% com respeito à área do encapsulamento. O fato de usar os circuitos sem os invólucros (pastilhas de circuitos integrados) em vez dos componentes encapsulados, permite aumentar extremamente a densidade da interconexão; [2]

- Não se deve utilizar materiais orgânicos quando alta confiabilidade for importante por longos períodos;

- Deve-se utilizar substratos inorgânicos;

- Deve-se utilizar sistemas hermeticamente selados com nitrogênio, para proteger os circuitos de agentes corrosivos e da umidade;

- Utilizar componentes com tecnologias resistentes a temperatura (*GaAs*, *SiC*, etc.). As vantagens da utilização de sistemas resistentes a altas temperaturas é evitar o uso de sistemas auxiliares de resfriamento, com os pesados dissipadores e *heat pipes*; permitindo assim sistemas menores em tamanhos e mais leves. [6]

B) Projeto do circuito

Pontos que se deve considerar para a confiabilidade do circuito:

b1) *derating* dos componentes;

b2) usar o componente apropriado para a condição de uso e solicitações do sistema embarcado;

b3) proteger contra transientes, sobrestresse, interferência eletromagnética e proteção eletrostática;

b4) utilizar películas protetoras para a PCI, de modo a diminuir os efeitos dos contaminantes (poeira, umidade, etc.), diminuindo assim os efeitos corrosivos e as correntes de fuga dos componentes;

b5) utilizar circuitos encapsulados (estrutura selada); e

b6) analisar: a degradação dos parâmetros e os circuitos tolerantes, como pode ser visto na Fig. 8 o exemplo da variação com o tempo de um resistor de carbono de composição em função da potência dissipada.

Para projetos de sistemas embarcados confiáveis (robustos) as variações dos valores dos parâmetros devem ser levadas em consideração para evitar a mudança do ponto de operação com o passar do tempo. Duas implementações podem diminuir ou eliminar os efeitos dessas variações no sistema:

I) Controle do componente – é a seleção criteriosa de componentes, em que há o controle da variação dos parâmetros, por meio do projeto e controle dos processos de sua fabricação. Além de evitar o uso de: componentes variáveis (trimpot, trimmer, etc.), relés eletromecânicos, conexões que dependam da ação de molas, etc.;

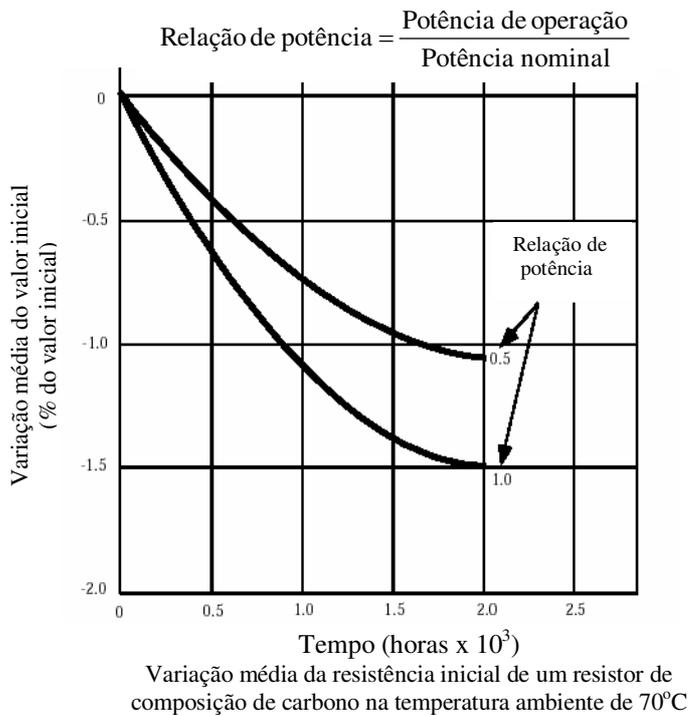


Fig. 8 - Variação média do valor inicial X tempo

II) Controle do projeto – é o projeto dos circuitos e sistemas para serem tolerantes as variações dos valores dos parâmetros dos componentes:

II.1) pode-se usar realimentação negativa, para diminuir a sensibilidade dos parâmetros;

II.2) pode-se garantir uma performance mínima aceitável mesmo em condições de pior caso no circuito do sistema embarcado; e

II.3) pode-se projetar o circuito com componentes para compensar a elevação de temperatura e/ou componentes com baixos coeficientes de temperatura.

#### C) Projeto mecânico

A estrutura mecânica (incluindo a acomodação do sistema, o método de montagem, o tipo de tinta, os isolamentos) é uma defesa contra as características do ambiente (vibração, temperatura, umidade, etc.).

Em muitas aplicações, a proteção mecânica tem influência na temperatura do sistema, nesses casos atenções especiais devem ser tomadas com a cobertura da superfície, pois pinturas e coberturas com coeficientes de emissão e absorção apropriadamente selecionados podem ser utilizados como um eficiente sistema de regulação térmica, bem como a isolamento (do sistema e de suas partes) por multicamadas reflexivas e o uso de aerogels, que são altamente eficiente contra a transferência de calor entre as partes do sistemas.

Uma preocupação importante também é evitar a deflexão da PCI, o que pode ser conseguido com reforço de barras de alumínio e pelo uso de PCI com dimensões reduzidas, pois quanto menor a PCI menor a deflexão.

Em certas aplicações o projetista deve atentar para a necessidade de isolar o equipamento dos danos provocados pelos contaminantes existentes no ar ambiente, principalmente no ambiente industrial.

#### D) Projeto térmico

O projeto do sistema de refrigeração deve ser capaz de manter uma temperatura média na junção dos circuitos

integrados (todos os circuitos integrados do sistema) abaixo do valor definido pelo *derating* a ser aplicado ao sistema.

A qualidade do ar de refrigeração deve preocupar-se com a necessidade ou não de utilizar filtros, pois o filtro apresenta o inconveniente da limpeza periódica dos mesmos e o esquecimento de sua montagem ou o mau posicionamento ou a fixação inadequada pode permitir a passagem de partículas, as quais poderão obstruir a refrigeração do sistema.

E como visto, o comportamento térmico é influenciado pelo projeto mecânico.

Na Fig. 9, vê-se como a temperatura influencia a taxa de falha dos componentes. [10]

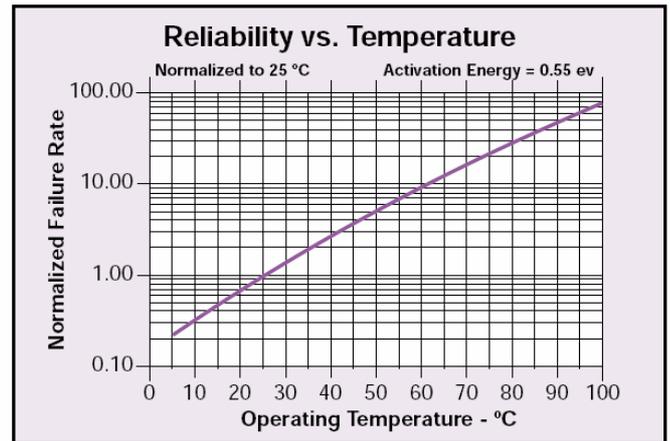


Fig. 9 – Confiabilidade X tempo

## IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Pelas inúmeras áreas de emprego, riscos nas aplicações e as conseqüências que a falhas em tais sistemas podem provocar, fica cada vez mais patente a necessidade do controle da confiabilidade/disponibilidade de tais sistemas.

O estudo dos circuitos de um sistema revela se o sistema funciona e como funciona. O estudo da confiabilidade de um sistema nos informa quanto tempo esse sistema deve funcionar e em que condições.

## REFERÊNCIAS

- [1] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_embarcado](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_embarcado).
- [2] "MIL-HDBK-338B 1 October 1998 - MILITARY HANDBOOK ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOK".
- [3] "MIL-STD-810F 1 January 2000 - DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD FOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS".
- [4] Ballantyne, D., "Redesign of a commercial microcomputer for severe environments in Computer Design The magazine of Computer Based Systems", May 1980.
- [5] Sanches, Durval, "Interferência Eletromagnética EMI", Editora Interciência, 2003.
- [6] "ROME LABORATORY - RELIABILITY ENGINEER'S TOOLKIT", April 1993, *An Application Oriented Guide for the Practicing Reliability Engineer Systems Reliability Division, Rome Laboratory Air Force Materiel Command (AFMC), 525 Brooks Rd, Griffiss AFB, NY 13441-4505*.
- [7] "Chapter 8: Reliability and Availability", [www.artesyn.com](http://www.artesyn.com).
- [8] Cluley, JC, "Electronic Equipment Reliability", Macmillan 1974.
- [9] Sanches, Durval, "Eletrônica Industrial Montagem", Editora Interciência - 2000.
- [10] "MIL-HDBK-217F - NOTICE 2 28 February 1995 MILITARY HANDBOOK RELIABILITY - REDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT".