

# Análise da Taxa de Erro em Terminais 1553B Operando na Presença do Ruído Térmico Induzido

Ivo, F.S., Euphrásio, P.C. S., Azevedo, I. A.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

**Resumo** — Redes de integração de sistemas aeronáuticos e espaciais devem apresentar baixa taxa de falha quando empregados em ambientes eletromagnéticos críticos, cuja interferência de sinais espúrios é inevitável. Este trabalho analisa a capacidade de operação de terminais de uma rede MIL-STD-1553B na presença do ruído térmico induzido, de intensidade e largura de banda controlável. Uma sequência de testes de avaliação é apresentada.

**Palavras-chaves** — MIL-STD-1553B, Barramento de Dados, Ruído, Taxa de Falha, Integração de Sistemas.

**Abstract** — Network integration of aeronautical and space systems should have a low failure rate when used in electromagnetic environments critics, whose spurious signal interference is inevitable. This paper analyzes the capability of operating a network of terminals MIL-STD-1553B in the presence of white noise induced intensity and bandwidth manageable. A sequence of evaluation tests is presented.

**Keywords** — MIL-STD-1553B, Data Bus, Noise, Failure Rate, Systems Integration.

## I. INTRODUÇÃO

A integração de sistemas militares embarcados, principalmente os sistemas provenientes da indústria aeronáutica e aeroespacial, tem sido realizada nos últimos 30 anos através de redes de dados que utilizam o padrão estabelecido pela norma MIL-STD-1553B [1]. Esse padrão foi desenvolvido no final da década de sessenta pela *U.S. Air Force* em conjunto com a *Society of Automotive Engineers* (SAE), e define os parâmetros técnicos e de projeto para processos, procedimentos, práticas e métodos que devem ser implementados nestas redes [2].

A capacidade dos terminais em operar com grande eficiência e baixa taxa de erro em ambientes ruidosos é um dos requisitos técnicos exigidos para redes MIL-STD-1553B. Esta característica é essencial para aplicações críticas, como por exemplo, sistemas de controle de armas, gravação de dados e voz em aeronaves militares.

A rede MIL-STD-1553B é constituída por um barramento de dados onde diversos terminais compartilham informações entre si através de um canal de comunicação [2]. É intrínseco ao canal de comunicação apresentar diversos fatores que limitam a taxa de transmissão e a qualidade da informação trafegada.

Entretanto, à medida que os sinais se propagam ao longo do canal, estes sofrem os efeitos devido às imperfeições do próprio canal, o que pode ocasionar a distorção da informação trafegada [3]. Há ainda o efeito do ruído proveniente de processos internos ou externos a rede de dados [4]. Quando

ocorre a presença destes sinais que interferem no canal, verifica-se que estes são acrescentados ao sinal transmitido e o sinal recebido passa a se apresentar como uma versão corrompida do sinal transmitido [4].

Os ruídos relacionados a interferências eletromagnéticas no canal de comunicação são classificados em três tipos: ambiental, térmico e o gerado internamente no próprio receptor. Dentre os três tipos, o ruído térmico está presente em qualquer sistema e seus efeitos no canal podem ser avaliados através de fontes controladas [4].

No presente trabalho, apresenta-se um estudo sobre a eficiência de terminais de rede 1553B operando na presença do ruído térmico induzido a partir de uma fonte controlada. Uma variação do nível de interferência do ruído na rede é realizada com o propósito de se reproduzir um ambiente crítico para recepção e resposta dos dados processados pelo terminal nestas condições adversas de operação. Os resultados experimentais são apresentados, assim como os parâmetros de teste e a configuração de ensaio, todos em conformidade com o proposto pela norma militar MIL-STD-1553B. Por fim, a taxa de erro de dados processados pelo terminal da rede é mensurada através de uma análise estatística.

Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos experimentalmente em condições controladas em laboratório.

## II. REDE DE DADOS MIL-STD-1553B

A topologia física da rede 1553B foi concebida na forma de barramento, o qual consiste de uma linha de transmissão composta por dois cabos blindados de impedância entre 70 a 85 Ohms com capacidade de acoplamento de três tipos de terminais: Controlador do Barramento (BC), Terminal Remoto (RT) e Monitor do Barramento (BM). A carga máxima de terminais na rede é estabelecida como sendo de 32 terminais, sendo formada por um único BC e até 31 RT's, podendo haver um ou mais BM's ativos na rede [2].

O controle de acesso ao meio dos terminais é realizado através de operações de comando/resposta utilizando a multiplexação de divisão no tempo (TDM) no modo assíncrono [6]. Neste tipo de controle, o BC deve iniciar todas as sequências de mensagens enviando comandos, gerenciando e centralizando a comunicação na rede. Já os RT's devem responder aos comandos quando solicitados, e transferir dados dentre os dispositivos acoplados [6]. A transmissão das mensagens é feita no modo semiduplex entre os terminais a uma taxa máxima de 1 Mbps [5].

O BM é o único dispositivo passivo, tendo a função de listar o tráfego do barramento e podendo gravar as mensagens trafegadas de forma a permitir uma análise posterior dos dados

Felipe Streitenberger Ivo, Pedro Carlos da Silva Euphrásio e Irany de Andrade Azevedo, Departamento de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil. E-mails: fivo@ita.br, pedrocse@ita.br, irany@ita.br. Este trabalho foi realizado e financiado pelo Laboratório de Guerra Eletrônica do ITA.

[6]. Geralmente, a análise de falhas do barramento é realizada através da verificação dos dados armazenados pelo BM.

Na integração de sistemas críticos que requerem uma alta confiabilidade, uma configuração com barramento de dados redundante ativo é normalmente utilizada, onde o segundo barramento torna-se disponível caso ocorra alguma falha crítica ou catastrófica no barramento principal [1]. A Fig. 01 ilustra a topologia física de uma rede de dados padrão MIL-STD-1553B para emprego em sistemas que requerem alta confiabilidade. Nesta figura pode-se observar o barramento redundante ativo e a interligação entre os terminais conforme descritos anteriormente.

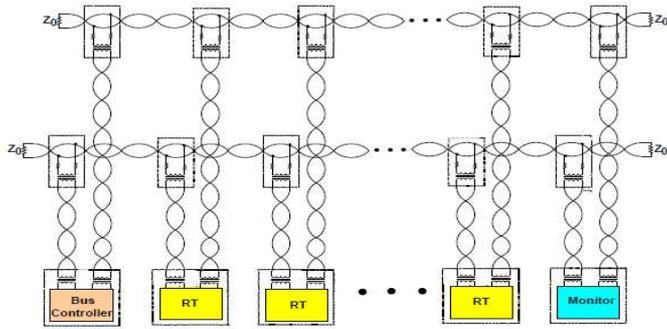


Fig. 01. Topologia Física de uma rede padrão 1553B [1]

As palavras que trafegam no barramento de dados têm um tamanho padrão de 20 bits e são divididas em três tipos: de comando, de estado e de dados [2]. A Fig. 02 apresenta o protocolo estabelecido para cada uma dessas palavras.

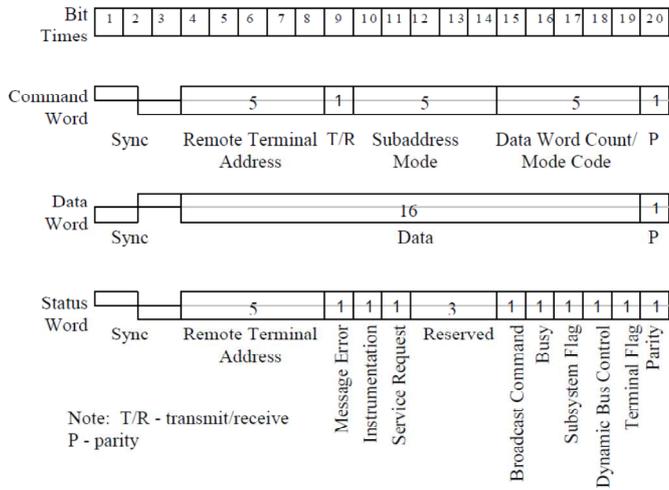


Fig. 02. Palavras MIL-STD-1553 [7]

Uma palavra de comando só pode ser enviada pelo BC dentro da rede, havendo um tempo máximo para recebimento da resposta. As respostas são enviadas dos terminais remotos para o BC através das palavras de estado e têm por finalidade indicar o sucesso ou a falha no tráfego de mensagens na rede. Caso as palavras de estado não sejam recebidas durante a janela de tempo de espera, o BC considera uma não resposta e executa a próxima ação programada [6].

A codificação bifásica *Manchester II* é utilizada como padrão na rede [2]. Nesta codificação, os bits 0 e 1 formadores

das palavras são amostrados a uma frequência máxima de clock de 1 MHz [7].

A troca de dados entre os sistemas na rede 1553B é baseada em formatos de transmissão de mensagens, os quais são definidos pela norma MIL-STD-1553B. Esses formatos são divididos em duas classes: de transferência simples e *broadcast* [6]. No formato de transferência simples - o único de interesse desse trabalho - o BC envia ao RT uma palavra de comando, o RT processa essa palavra e, caso não ocorra erro, transmite uma palavra de estado ao BC, validando a mensagem. A palavra de dados pode ser tanto no sentido BC-RT quanto no sentido RT-BC, conforme ilustra a Fig. 03.

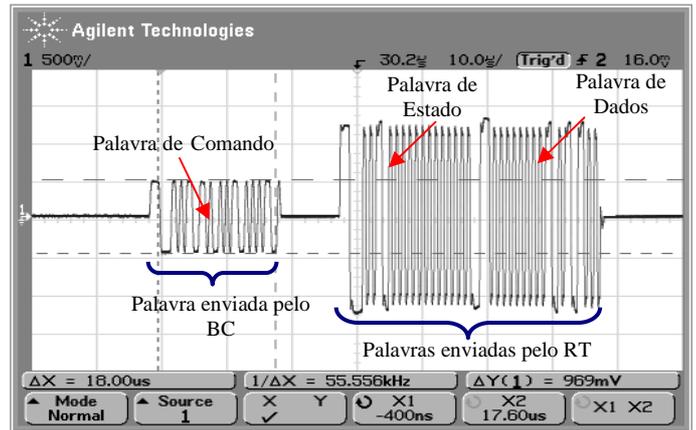


Fig. 03. Modo de Transferência Simples de Mensagens [6]

### III. O MODELO TEÓRICO DO RUÍDO TÉRMICO

O ruído em sistemas de telecomunicações é caracterizado como sinal indesejável, de natureza aleatória, de origem interna ou externa ao sistema, que pode corromper a informação. Suas origens, características e modelos têm se apresentado extensivamente na literatura. Na área de engenharia de confiabilidade o ruído tem sido estudado em função dos erros causados para transmissão e processamento de sinais [8].

Diversas são as fontes de ruído dentro de um sistema podendo classificá-los como provenientes do ambiente (*noise enviromental*), ocasionados pelo acréscimo de temperatura (*thermal noise*) ou como ruído gerado dentro do próprio receptor (*noise within in the receiver*) [8]. Apenas o ruído térmico será abordado neste artigo por representar uma limitação básica à detecção de sinais que envolvem a utilização de dispositivos eletrônicos e por estar presente em qualquer sistema de comunicação.

O ruído térmico é o nome dado ao fenômeno eletromagnético que surge em função do movimento aleatório de elétrons em um condutor. Este ruído é modelado como um ruído branco definido pela equação (1). A função autocorrelação é utilizada para se verificar a aleatoriedade do ruído e é expressa pela equação (2) [4].

$$S_w(f) = \frac{N_0}{2} \tag{1}$$

$$R_w(t) = \frac{N_0}{2} \delta(t) \tag{2}$$

O parâmetro  $N_0$  é referenciado ao nível de ruído no estágio de entrada do receptor de um sistema de comunicação. Este parâmetro é determinado pela equação (3) em função da constante de Boltzmann  $k$  e da temperatura equivalente de ruído na entrada do receptor  $T_e$ [4].

$$N_0 = kT_e \tag{3}$$

A variável  $T_e$  é a temperatura equivalente de ruído na qual um resistor tem de ser mantido a fim de que, conectando-se o resistor à entrada do sistema, ele produza a mesma potência de ruído na saída do sistema que a produzida por todas as fontes de ruído de um sistema real [4].

A partir da expressão (2) é possível verificar que  $R_w(t)$  só existe para um instante específico no tempo dado em função de  $\delta(t)$ . Essa condição implica que se for analisada duas amostras de sinais, não importando o quanto próximas no tempo elas sejam tomadas, elas não são correlacionadas. Neste sentido o ruído branco representa o que há de “aleatoriedade”.

Já a partir da função  $S_w(f)$  observa-se que a potência média do ruído branco tende ao infinito e, sendo assim, o modelo teórico não é fisicamente realizável. O modelo prático aceitável para descrever o ruído branco é o gaussiano [4]. Neste modelo, o ruído é representado matematicamente como uma função densidade de probabilidade gaussiana com tensão média de ruído nula, conforme a equação (4).

$$f(V_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{V_R^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

Esta função é representada temporalmente conforme a Fig. 04, onde o valor da tensão média quadrática do ruído ( $V_{rms}$ ) representa uma probabilidade de ocorrência de 68,7 %.

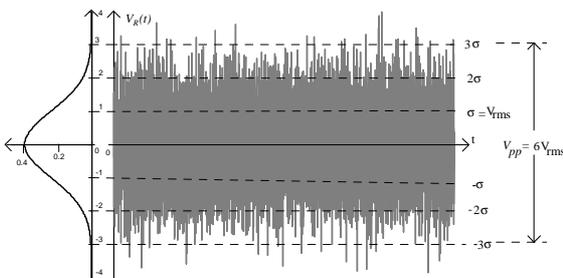


Fig. 04. Modelo Gaussiano para Ruído Branco em função do tempo

#### IV. TESTE DE REJEIÇÃO DE RUÍDO

A norma MIL-HDBK-1553B apresenta um plano de testes elétricos, de protocolo e de rejeição de ruído para verificação dos requisitos e aceitação dos terminais remotos [2]. Segundo a norma, um RT deve apresentar a taxa de 1 palavra com erro para cada  $1 \times 10^6$  palavras recebidas, quando operando na presença de um ruído aditivo branco gaussiano distribuído sobre uma banda de 1kHz até 4 MHz com intensidade de  $140mV_{rms}$  [7].

Durante o teste de rejeição de ruído o BC deve enviar uma palavra de comando e 32 palavras de dados ao RT (neste caso, a unidade sob teste), o qual deve responder com uma palavra de estado. O erro é identificado como falha na transmissão da palavra de estado pelo RT [6]. O bloco de 34 palavras (1 comando, 32 dados e 1 estado) corresponde ao tráfego de uma mensagem na rede. O teste deve prosseguir até um número particular de falhas serem encontradas, ou um número suficiente de palavras serem processadas corretamente pelo terminal avaliado. Caso o terminal não satisfaça os requisitos estabelecidos, ele deve ser rejeitado e descartado das aplicações na rede 1553B [2]. O diagrama de bloco da Fig. 05 refere-se ao modelo da rede para a realização dos ensaios. Todas as placas utilizadas na rede possuem capacidade de simular os três terminais previstos para o padrão 1553B e são certificados para utilização segundo as normas.

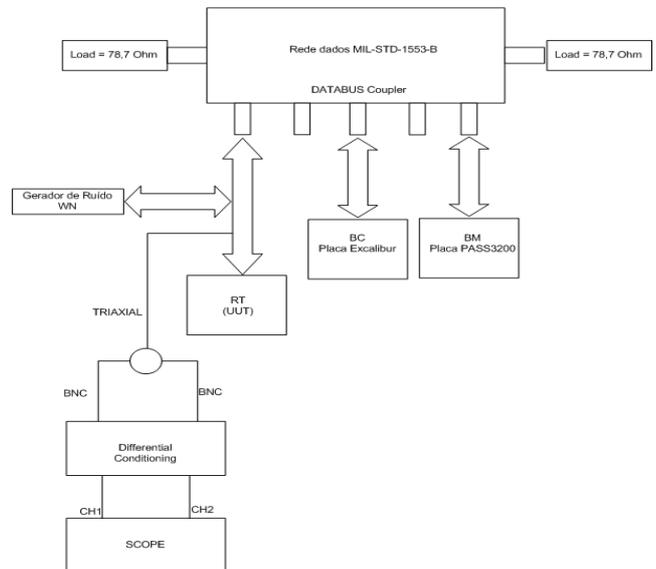


Fig.05 – Diagrama de blocos da rede 1553B utilizada para os ensaios

A Fig. 06 é a implementação do diagrama de blocos. Nesta figura são destacados: o *desktop* com a placa 1553B para a simulação do BC, o *laptop* com a placa PASS 3200 como Unidade Sob Teste - UST, o osciloscópio como instrumento de medição e análise elétrica dos sinais. O acoplador dos terminais na rede com as devidas cargas é mostrado em detalhes.

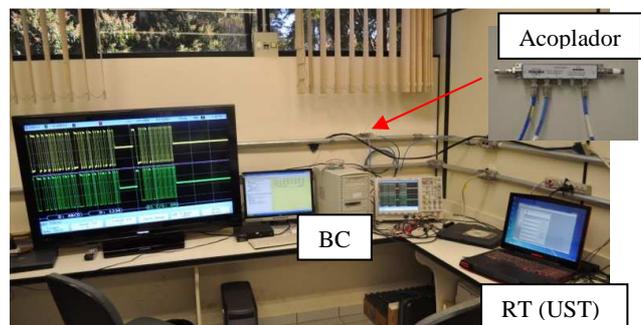


Fig. 06. Rede 1553B utilizada para os ensaios de ruído

O aplicativo para o monitoramento das mensagens disponível para a placa PASS 3200 é mostrado na Fig. 07. Nesta figura, observa-se uma sequência de mensagens monitoradas com os seguintes parâmetros: palavras codificadas em hexadecimais (comando, dados e estado), barramento ativo ou inativo (BUS A ou BUS B), tempo de duração da mensagem e ocorrência de erro.

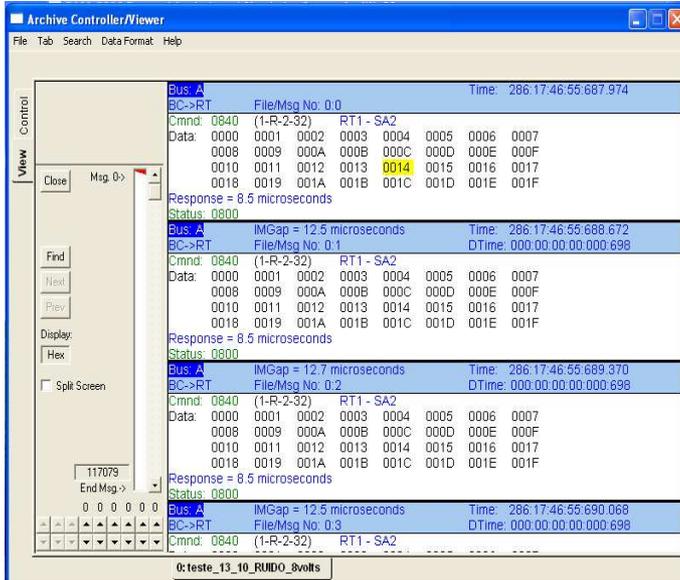


Fig. 07. Aplicativo utilizado como BM

V. TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Diversas condições críticas de interferência do ruído térmico na rede 1553B foram realizadas, e seu impacto na operação correta dos terminais foi avaliado através da taxa de falha e do intervalo de tempo médio entre falhas (MTBF).

A primeira condição avaliada foi a especificada pela norma, descrita na seção anterior. Nesta condição, não foram verificados nenhuma falha de operação da UST durante o período de observação, o qual é de uma hora de acordo com a norma. Na segunda condição elevou-se o nível de ruído na rede para 300 mVolts, não ocorrendo falha durante o período de teste. Então, uma condição mais crítica foi avaliada através do ajuste da intensidade mínima de sinal detectável sem erro na UST. A condição de intensidade mínima foi verificada para o nível de 1,75 Volts da codificação, conforme mostra Fig. 08.



Fig. 08. Nível de tensão dos sinais recebidos pela UST

A fim de se verificar o correto processamento deste sinal pela UST, e a ocorrência ou não de falhas, foram realizados

uma sequência de 4 testes sem a presença do ruído térmico, conforme mostrado na Tabela I. Em cada teste foram gravadas 1 hora de tráfego de mensagens. Após este tempo, os terminais eram reinicializados pelos aplicativos de controle e um novo ensaio era realizado. As informações foram analisadas a partir dos dados gravados pelo BM e, novamente, nenhuma falha foi verificada para cada um dos 4 testes realizados.

TABELA I: SEQUÊNCIA DE TESTES PARA O SINAL MÍNIMO DETECTÁVEL NA ENTRADA DA UST

| TESTE | Tempo (min) | Nível de Tensão(BC) (Volts) | Nível de Tensão(Ruído) (RMS) | Qtd. Mensagens | Qtd. Falhas |
|-------|-------------|-----------------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| 01    | 75          | 1,75 Volts                  | < 10 mV                      | 6 452 324      | 0           |
| 02    | 60          | 1,75 Volts                  | <10 mV                       | 5 195 222      | 0           |
| 03    | 60          | 1,75 Volts                  | <10 mV                       | 5 195 373      | 0           |
| 04    | 60          | 1,75 Volts                  | <10 mV                       | 5 181 030      | 0           |

Após esta sequência de teste, uma condição de interferência na rede foi induzida. O ruído foi adicionado ao canal BC-RT com um nível de sinal de 300 mVolts medido na entrada da UST. Este sinal foi alocado sobre uma banda de 250 KHz a 5 MHz. A Fig. 09 mostra o setup utilizado para caracterização dos sinais do ruído.

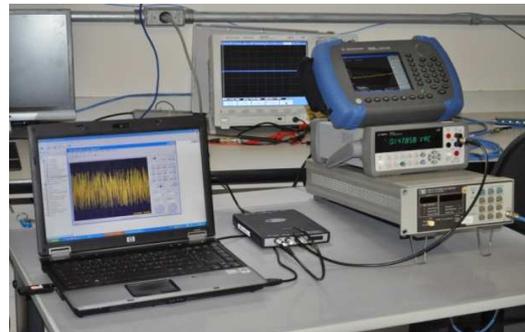
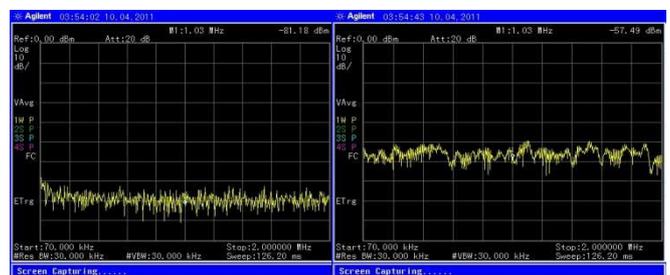


Fig. 09. Setup para caracterização do ruído

As principais componentes espectrais do código Manchester 1553B se distribuem em um canal com frequências entre 250 kHz até 2 MHz [2]. Estas componentes são diretamente afetadas pela presença do ruído branco aditivo no canal. A ausência ou não do ruído branco gaussiano no canal podem ser observados nas medições da Fig. 10. A Fig. 10 (a) mostra o espectro de frequência do canal sem a presença do ruído branco. Já na Fig. 10 (b) pode-se observar o aumento do nível de potência de ruído.



(a) (b)

Fig. 10 (a). Medição do sinal sem o ruído induzido  
Fig.10 (b). Efeito do Ruído Branco induzido no espectro

A condição de sinal mínimo detectável na presença do ruído na entrada da UST, podem ser observados na Fig. 11, onde as palavras de comando e de dados enviados do BC para UST são destacados. O sinal mínimo detectável é o menor nível de sinal processado pela UST sem falha.

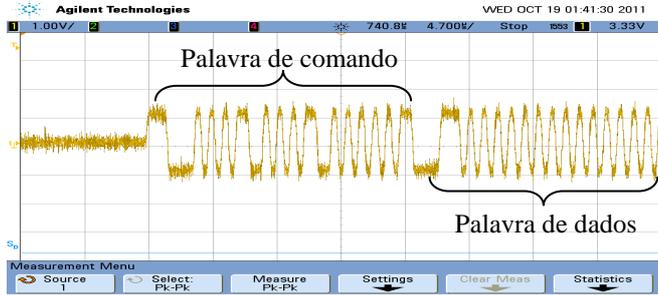


Fig. 11. Efeito do ruído nos sinais recebidos pela UST

A Tabela II apresenta os dados coletados dos ensaios realizados para esta condição. De forma similar a primeira sequência de teste, 4 ensaios de duração de 1 hora foram realizados. Em todos os ensaios ocorreram falhas.

TABELA II: SEQUÊNCIA DE TESTES PARA O SINAL MÍNIMO DETECTÁVEL COM RUÍDO ELEVADO NA ENTRADA DA UST

| TESTE | Tempo (min) | Nível de Tensão(BC) (Volts) | Nível de Tensão(Ruído) (RMS) | Qtd. Mensagens | Qtd. Falhas |
|-------|-------------|-----------------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| 01    | 60          | 1,75 Volts                  | 300 mV                       | 5 198 891      | 34          |
| 02    | 60          | 1,75 Volts                  | 300 mV                       | 5 191 944      | 29          |
| 03    | 60          | 1,75 Volts                  | 300 mV                       | 5 213 555      | 26          |
| 04    | 60          | 1,75 Volts                  | 300 mV                       | 5 251 977      | 26          |

Um valor médio de 28,75 palavras com falha para cada 5,21 10<sup>6</sup> mensagens em média recebidas pelo terminal pode ser verificado a partir dos dados da Tabela II. Estas mensagens correspondem a uma média de 177,28 10<sup>6</sup> palavras trafegadas na rede por teste. A taxa de erro média estimada é de 1erro a cada 6,17 10<sup>6</sup> palavras.

Um comparativo entre os testes a partir dos dados coletados da Tabela II é apresentado graficamente na Fig. 12. Este gráfico mostra a ocorrência das falhas em função do tempo para cada teste realizado.

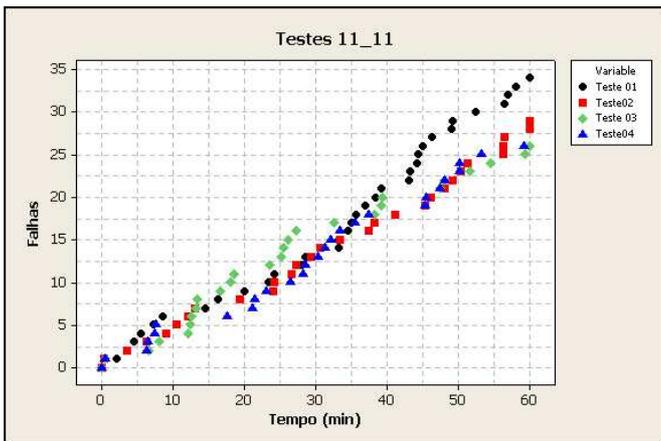


Fig. 12. Comparativo entre os testes realizados para a condição de sinal mínimo detectável com ruído elevado na entrada da UST

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma caracterização experimental da confiabilidade de um terminal de rede 1553B quando em operação na presença do ruído induzido.

A alta confiabilidade dos terminais da rede MIL-1553B foi demonstrada através dos ensaios experimentais realizados sob condições de interferência controlável. Nas condições de interferência estabelecidas pela norma, e mesmo com o aumento da intensidade do nível de ruído nestas condições, uma alta confiabilidade foi verificada na unidade sob teste. Nenhuma falha foi verificada durante o período de observação. Por outro lado, uma menor confiabilidade ocorreu quando a UST foi submetida a uma condição de operação mais crítica, caracterizada por um sinal mínimo detectável e um ruído de nível elevado na entrada do receptor da UST. Nesta condição, os testes 02 e 04, mostrados na Tabela II e Fig.12, foram os que apresentaram mais rapidamente a primeira falha, porém não os piores casos. O pior caso foi o teste 01, que exibiu 34 falhas com uma taxa de erro de 1 falha para cada 5,2x10<sup>6</sup> palavras trafegadas. Neste caso, a diferença com a média foi em torno de 1x10<sup>6</sup> palavras. Por outro lado, os melhores casos observados para esta condição foram os testes 03 e 04 que apresentaram 26 falhas, demonstrando uma tendência de melhora do terminal ao longo do tempo. Nestes casos, o erro observado foi de 1 falha para cada 6,9x10<sup>6</sup> palavras trafegadas, representando um desempenho melhor de 0,7 x10<sup>6</sup> palavras em relação a média.

O terminal caracterizado, mesmo quando submetido às condições de testes mais agressivas do que as estabelecidas pela MIL-HDBK-1553B, demonstrou uma taxa de falha inferior ao especificado, confirmando porque esta rede é uma das mais aplicadas ao setor militar.

REFERÊNCIAS

- [1] Glass, M., 2007, "Buses and Networks for Contemporary Avionics". Data Device Corporation, Bohemia, NY.
- [2] DoD, 21 Sep 1978, "MIL-STD-1553B Interface Standard for Digital Time Division Command / Response Multiplex Data Bus".
- [3] Dal Pai, L. R. M., 2010, "Projeto e construção de um canal de comunicação com ruído aditivo branco gaussiano", UFPR, Curitiba, Brasil.
- [4] Haykin, S., 2004, "Communication Systems", 4 Ed., NY.
- [5] Condor Engineering, 200, "MIL-STD-1553 Tutorial", Santa Barbara.
- [6] Euphrásio, P. C. S., Fev. 2005, "Modelagem e Avaliação de Dados de Sistema de Controle Embarcado", ITA, São José dos Campos, Brasil.
- [7] Avionics Databus Solutions AIM GmbH, novembro 2010, MIL-STD-1553 Tutorial v2.3", Freiburg, Alemanha.
- [8] Pettai, R., 1991, "Noise in Receiving Systems", 1 Ed, NY.