

Testes Não Destrutivos para *Upscreening* de Transistor com Qualificação Militar e Fora do Prazo de *Relifing*

Fabrcio Ribeiro Brandão, Priscila Custódio de Matos, Dhiego Marques Menezes Abrahão
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Este trabalho tem como objetivo apresentar a verificação da possibilidade de uso espacial de um lote de 50 transistores JANTX2N2905A com qualificação militar que não foi utilizado dentro do prazo para a sua montagem em placa eletrônica. Para isso, em concordância com normas espaciais estabelecidas, foi desenvolvida uma metodologia com a combinação entre os testes do procedimento de *relifing*, que verificam a confiabilidade de componentes eletrônicos estocados por um longo período, e os testes para a técnica de *upscreening*, utilizada para verificar a possibilidade da aplicação espacial de componentes eletrônicos que não são formalmente qualificados para esta finalidade. Com isso, foram obtidos resultados satisfatórios perante os testes não destrutivos realizados.

Palavras-Chave – qualificação, *relifing*, *upscreening*.

I. INTRODUÇÃO

Na fabricação de satélites artificiais e veículos lançadores para projetos espaciais, são utilizados componentes eletrônicos que devem funcionar com confiabilidade e eficiência perante as condições ambientais hostis em que serão submetidos durante a fase de lançamento e a operação no espaço, e para isso, esses componentes passam por um processo de qualificação para aplicação espacial. Este processo é composto pela realização de testes e análises que verificam se os componentes possuem as características necessárias para atender às normas para a aplicação pretendida.

Para o nível de qualificação espacial, as condições e os tipos de testes realizados nos componentes são mais severos do que em relação aos outros níveis existentes. Assim, os componentes altamente qualificados têm um mercado específico de fornecedores, tendo o Brasil a necessidade de importar tais componentes [1].

Com isso, no desenvolvimento atual de programas espaciais brasileiros, a aquisição de componentes eletrônicos com qualificação espacial sofre dificuldades, tais como: **custo elevado dos componentes, longo prazo de entrega e restrições para a importação de alguns componentes.** [1]

Uma das medidas adotadas pelos programas espaciais brasileiros para minimizar as dificuldades citadas é a realização de testes de *upscreening* em componentes que não são formalmente qualificados para aplicações espaciais [1]. Os programas espaciais, quando necessário, utilizam dessa técnica, pois ela possibilita verificar se componentes fabricados sem qualificação espacial, mas com maior disponibilidade e facilidade de aquisição, podem ser

utilizados com confiabilidade para tal aplicação. Para isso, são realizados testes que avaliam as características técnicas e construtivas destes componentes.

Outra medida adotada pelos programas espaciais brasileiros para minimizar as dificuldades citadas anteriormente é a compra extra de componentes quando importados, para que as peças adquiridas em quantidade sobressalente garantam que o programa espacial não sofra com indisponibilidades no estoque internacional. Esta medida preventiva acaba por gerar um estoque de componentes adquiridos que não foram utilizados dentro do prazo estipulado por norma para a montagem em placa de circuito impresso. Quando ocorre a necessidade de utilização de componentes fora do prazo citado, são realizados testes de *relifing* para verificar se as características do componente permanecem de acordo com as especificações originais, e assim, pode ser aplicado um período extra para a sua montagem em placa eletrônica conforme a norma ESCC-Q-ST-60-14C (procedimento de *relifing* para componentes elétricos, eletrônicos e eletromecânicos).

Contudo, uma medida que contribui para mitigar as dificuldades de aquisição de componentes citadas é a abordagem deste trabalho, sendo a combinação de testes de *relifing* com a sequência de testes que compõem um *upscreening*, com a finalidade de verificar se um lote de 50 peças do transistor JANTX2N2905A, que não possui qualificação espacial e que não foi utilizado dentro do prazo para montagem em placa eletrônica poderá ainda ser empregado com confiabilidade em uma eventual aplicação espacial.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Normas Estabelecidas

As normas de especificações de componentes para a aplicação espacial visam garantir a operação dos mesmos com taxas de falhas extremamente baixas, e para isso, elas asseguram todas as fases que envolvem a obtenção de um componente qualificado.

Dentre os diferentes sistemas de normas existentes, os mais aplicados e difundidos são o Sistema Militar Americano (*Military Standard - MIL*), o da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, e o da *European Space Components Coordination (ESCC)* da *European Space Agency (ESA)*. [2]

Além das normas e procedimentos das agências espaciais, os componentes eletrônicos são empregados conforme os requisitos de qualidade do programa espacial no qual eles serão utilizados.

B. Qualificação dos componentes

Para um componente ser qualificado significa que o mesmo foi produzido e selecionado em conformidade com as normas que asseguram que o componente possui as características para suportar as condições em que será submetido, sendo que essas condições variam para cada tipo de aplicação. Para a aplicação espacial, por exemplo, as principais características necessárias são: a faixa de temperatura de operação, a hermeticidade do encapsulamento, a capacidade de suportar altos níveis de vibração e a estabilidade dos parâmetros elétricos. [2]

Há diferentes níveis de qualificação para um componente que variam dependendo dos testes em que o componente é submetido na triagem (*screening*) durante a etapa de qualificação. Para a qualificação de dispositivos semicondutores encapsulados a norma MIL-PRF-19500 (especificação geral para o desempenho de dispositivos semicondutores) define quatro diferentes níveis, sendo do menor nível para o maior de exigência: JAN, JANTX, JANTXV e JANS, onde o nível de qualificação JANS é destinado ao uso espacial [3].

A nomenclatura destes níveis de qualificação é definida pela *Joint Electronics Type Designation System* (JETDS) que anteriormente era denominada *Joint Army-Navy Nomenclature System* (AN System, JAN), conforme [4]. O nível JAN indica que o componente atende aos requisitos mínimos. Quando adicionado o TX isto indica que aquele componente seguiu os requisitos da norma e também foi submetido a testes durante a fabricação e o TXV indica que além dos testes o componente também foi verificado antes do encapsulamento. O nível JANS indica que o componente é qualificado para uso em espaço ou que foi testado e que atende ao limite máximo de defeitos para o lote.

C. Dificuldades enfrentadas em programas espaciais brasileiros para a aquisição de componentes com qualificação espacial

O custo e o prazo de entrega dos componentes variam em relação ao seu nível de qualificação. Isso se deve ao fato da realização dos testes agregados ao produto final para garantir a sua alta qualificação e ao fato desses componentes não serem produzidos no Brasil [5]. A Tabela I apresenta essas variações para dois tipos de semicondutores utilizados no programa espacial do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (*China-Brazil Earth Resources Satellite - CBERS*), desenvolvido através de uma cooperação entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST).

TABELA I. COMPARAÇÃO DE PREÇOS E PRAZOS DE ENTREGA ENTRE DIFERENTES QUALIFICAÇÕES PARA DOIS TIPOS DE SEMICONDUTORES UTILIZADOS NO PROGRAMA CBERS. ADAPTADO DE [1]

Componente	Qualificação	Preço (US\$)	Prazo de entrega (semanas)
Diodo 1N5806	COMERCIAL	2,27	Em estoque
	JAN	10,95	16
	JANTX	14,54	22
	JANTXV	16,43	36
	JANS	76,86	48
Transistor 2N2222	COMERCIAL	0,75	Em estoque
	JAN	2,14	16
	JANTX	4,92	22
	JANTXV	8,59	24
	JANS	36,89	36

Na importação de componentes com qualificação espacial podem ocorrer atrasos na entrega, embargos, ou problemas de restrições para a importação, sendo um exemplo deste último, as restrições impostas pelo *International Traffic in Arms Regulations* (ITAR), um regime regulatório dos Estados Unidos da América (EUA) que, dentre outras atribuições, restringe e controla naquele país a exportação de tecnologias consideradas militares que estão presentes na *United States Munitions List* (USML). [5]

Algumas ações tomadas para solucionar os problemas de importação de componentes altamente qualificados no programa CBERS foram: a alteração de fornecedor, a modificação no projeto, e a realização de testes de *upscreening*. [1]

D. Upscreening

O *upscreening* consiste na realização de um conjunto de testes para selecionar componentes visando atender a aplicação pretendida. Assim, quando não é possível por alguma razão adquirir componentes já qualificados, realizam-se os testes de *upscreening* para verificar se componentes já fabricados e não qualificados para a aplicação pretendida possuem as características necessárias para tal nível de qualificação. [2]

A sequência de testes para o *upscreening* de um componente é definida a partir das mesmas normas e especificações seguidas pelos fabricantes de componentes para o nível de qualificação desejado. Sendo assim, o componente irá passar quase que na totalidade pelos mesmos testes que um componente formalmente qualificado passa na triagem (*screening*) em sua fabricação. [2]

Normalmente os testes de *upscreening* são aplicados em componentes eletrônicos comerciais, referenciados pelo termo *commercial off-the-shelf* (COTS). Como consta na Tabela I, os componentes de classificação comercial estão disponíveis em estoque ou são possíveis de se adquirir através de uma forma mais acessível para curto prazo além de terem o custo baixo.

Conforme mencionado em [6], o uso de COTS em aplicações militares e espaciais foi o resultado da busca por uma solução alternativa para os problemas de disponibilidade e de restrições orçamentárias, porém muitas questões são discutidas à cerca da confiabilidade na utilização de tais componentes em aplicações espaciais.

Entretanto, em [5] é afirmado que para o processo de *upscreening* em que se deseja obter componentes para a aplicação espacial, a escolha de componentes já fabricados com qualificação militar possibilita obter uma maior confiabilidade e um processo mais rápido em relação aos componentes comerciais. Isso se deve ao fato de que componentes com qualificação militar já passaram por alguns dos processos requeridos para a qualificação espacial.

E. Screening

Segundo as normas estabelecidas, os componentes devem passar por uma triagem (*screening*), composta por uma sequência de testes e análises, que deve ser seguida em toda a etapa de fabricação dos componentes para que eles detenham determinada qualificação desejada.

A norma MIL-PRF-19500P define na Tabela E-IV do Apêndice E os requerimentos do *screening* para os

dispositivos semicondutores. A sequência de testes se resume conforme apresentado na Fig. 1, porém os testes necessários variam, podendo ser obrigatórios, opcionais ou não aplicáveis de acordo com o tipo de componente e o nível de qualificação desejado.

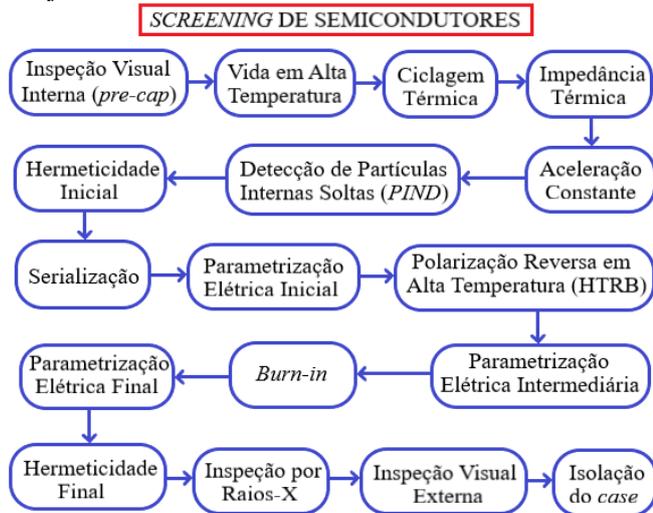


Fig. 1 – Sequência de *screening* para semicondutores segundo a norma MIL-PRF-19500P

F. Relifing

A norma ESCC-Q-ST-60-14C descreve todos os requerimentos necessários para verificar se componentes estocados por um longo período ainda podem ser utilizados na montagem em placas eletrônicas. Com isso, a data limite para que componentes estocados sejam utilizados na montagem em placas eletrônicas, assim como o período em que é necessário ou não que os componentes sejam submetidos ao processo de *relifing* antes de tal montagem são definidos pela norma conforme a Fig. 2.

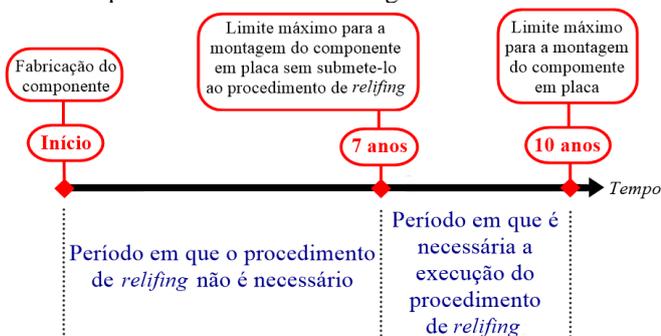


Fig. 2 – Linha do tempo para a execução do *relifing* em componentes eletrônicos segundo a norma ESCC-Q-ST-60-14C

Para que sejam utilizados na montagem de placas, os componentes fabricados há mais de sete e menos de dez anos devem passar primeiramente pelo processo de *relifing*, conforme a Fig. 2. Esse processo consiste na realização de testes que irão verificar se as características do componente permanecem de acordo com as especificações determinadas para sua fabricação.

A sequência dos testes necessários para o *relifing* é basicamente constituída por: Inspeção Visual Externa, Parametrização Elétrica, Teste de Hermeticidade e Testes Adicionais Específicos [7]. Entretanto, dependendo do tipo de componente alguns dos testes não são requeridos e alguns podem ser realizados por amostragem, conforme a Tabela 6.1 da norma ESCC-Q-ST-60-14C.

G. Transistor JANTX2N2905A

O transistor cujo *part number* - PN (código padronizado de identificação do componente) é JANTX2N2905A, foi fabricado segundo as especificações MIL e possui o nível de qualificação JANTX conforme a norma MIL-PRF-19500, sendo assim, ele já passou em sua fabricação pelos testes necessários para tal qualificação militar.

A aplicação espacial deste tipo de transistor 2N2905A é comum em satélites artificiais, sendo que este componente é um transistor bipolar PNP de silício e de comutação, com o encapsulamento do tipo TO-39.

Por ser um componente qualificado e fabricado conforme a MIL, suas características no *datasheet* do fabricante são as mesmas da norma MIL-PRF-19500/290 (ficha de especificação de desempenho que aborda o transistor 2N2905A), sendo algumas delas, exibidas na Tabela II.

TABELA II. CARACTERÍSTICAS DO TRANSISTOR 2N2905A. ADAPTADO DE [8]

Parâmetro	Valor Máximo
Potência total de dissipação (P _T) à Temperatura Ambiente (T _A) de 25°C	0.8W
Tensão entre Coletor e Base (V _{CB0})	-60Vdc
Tensão entre Coletor e Emissor (V _{CEO})	-60Vdc
Tensão entre Emissor e Base (V _{EB0})	-40Vdc
Corrente no Coletor (I _C)	-600mAdc
Temperatura de Junção (T _J) / Temperatura de Armazenamento (T _{STG})	-65 a +200°C

III. METODOLOGIA

Para este trabalho foi selecionado um lote com 50 peças do transistor JANTX2N2905A, que estava estocado por um longo período em um ambiente controlado de acordo com os requerimentos da norma ESCC-Q-ST-60-14C.

O lote de transistores selecionado foi fabricado na vigésima semana do ano de 2008, portanto há mais de dez anos, mesmo assim, foi utilizado como referência todo o procedimento de *relifing* para verificar se estes componentes, mesmo estocados por um longo período, ainda possuem suas características de fabricação.

Os transistores utilizados neste trabalho possuem a qualificação militar JANTX, porém, para uma aplicação espacial, a qualificação apropriada é JANS. Sendo assim, também foi utilizada a técnica de *upscreening*.

Com isso, a metodologia adotada para verificar se esses componentes podem ser utilizados em uma aplicação espacial foi uma combinação entre os testes de *relifing* e os testes que compõem um *upscreening*.

Para o *relifing* de transistores, a norma ESCC-Q-ST-60-14C define que eles devem passar pelos testes de Inspeção Visual Externa, de Parametrização Elétrica e de Hermeticidade.

Já para a técnica de *upscreening* desenvolvida, foram realizados os testes requeridos para a qualificação JANS dos transistores, conforme o *screening* da Fig. 1. Entretanto, há testes definidos pela norma como opcionais, e também há testes nos quais estes componentes já foram submetidos em sua fabricação, uma vez que eles já possuem a qualificação JANTX, sendo assim, ambos testes não foram realizados novamente para evitar o desgaste por estresse elétrico ou mecânico dos componentes.

Com isso, a sequência dos testes para a metodologia adotada foi desenvolvida conforme a Fig. 3.

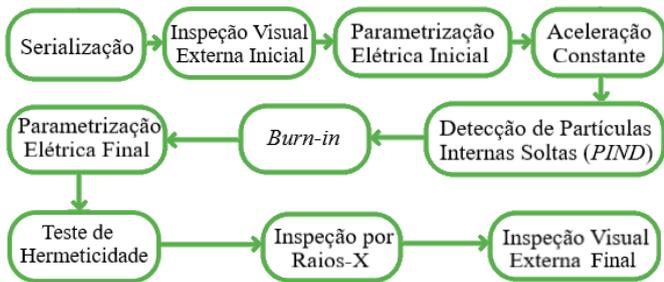


Fig. 3 – Sequência de testes para a metodologia adotada

Os testes foram realizados no período entre março e maio de 2019 na área de Qualificação e Confiabilidade de Componentes que pertence ao Laboratório de Integração e Testes – LIT do INPE.

Todos os testes realizados seguem os requisitos das normas MIL-PRF-19500P e ESCC-Q-ST-60-14C.

A. Inspeção Visual Externa

O Teste de Inspeção Visual Externa foi realizado de acordo com o Método 2071 da norma MIL-STD-750F (norma de métodos para testes em dispositivos semicondutores).

Na inspeção visual foi utilizado um microscópio óptico com ampliação de 3 a 10 vezes para verificar se os componentes estão em conformidade com a norma referida. Assim, para cada componente foram verificados: os aspectos construtivos; as dimensões; se a marcação no *case* (corpo encapsulado) permanece legível e se contém as informações necessárias para a sua identificação; se há a evidência de corrosão ou contaminação; se há buracos ou rachaduras; se há qualquer dano que exponha a base do material; se há a aderência de material estranho à superfície do componente (incluindo solda ou outra metalização); e se não há qualquer outro defeito que comprometa o desempenho do componente.

B. Parametrização Elétrica

Os testes para a verificação dos parâmetros elétricos dos componentes foram realizados de acordo com a Tabela I – subgrupo 2 da norma MIL-PRF-19500/290F.

A Tabela III exhibe os parâmetros que foram analisados e os respectivos métodos e condições que foram seguidos.

TABELA III. PARÂMETROS E CONDIÇÕES PARA OS TESTES ELÉTRICOS

Parâmetro Analisado	Método da norma MIL-STD-750F	Condições do Teste
Tensão de Ruptura entre Coletor e Emissor	3011, condição D	IC = -10mA _{dc} , pulsado
Corrente de Corte do Coletor para a Base	3036, condição D	V _{CB} = -60V _{dc}
Corrente de Corte do Coletor para o Emissor	3041, condição C	V _{CE} = -40V _{dc}
Corrente de Corte do Emissor para a Base	3061, condição D	V _{EB} = -5V _{dc}
hFE ou β (Relação IC/IB)	3076	V _{CE} = -10V _{dc} a) IC = -0,1mA _{dc} b) IC = -1mA _{dc} c) IC = -10mA _{dc}

C. Aceleração Constante

O Teste de Aceleração Constante foi realizado de acordo com o Método 2006 da norma MIL-STD-750F.

Este teste tem por finalidade aplicar uma força centrífuga em dispositivos para evidenciar possíveis fraquezas estruturais e mecânicas internas que podem não ser incitadas pelos testes de choque e vibração. [9]

Foi utilizada uma centrífuga laboratorial que opera em vácuo médio e possui um rotor capaz de atingir alta velocidade de rotação e de produzir a Força G de 20.000g (quantidade de força centrífuga a ser aplicada, em unidades de gravidade (g)).

Utilizando-se de um *fixture* (acessório para fixação do componente ao equipamento), os componentes foram dispostos com peso balanceado no rotor de tal maneira em que a força centrífuga seja aplicada no eixo Y1 dos componentes, conforme a Fig. 4.

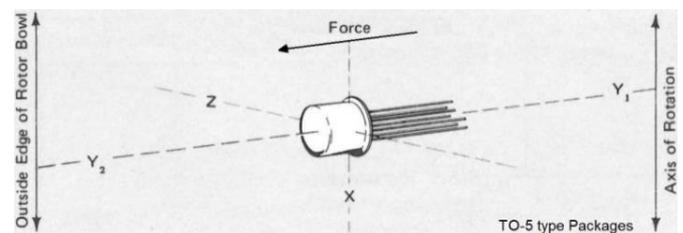


Fig. 4 – Aplicação da força centrífuga no transistor. Adaptado de [10]

D. Detecção de Partículas Internas Soltas

O Teste de Detecção de Partículas Internas Soltas (*Particle Impact Noise Detection* - PIND) foi realizado de acordo com a condição A do Método 2052 da norma MIL-STD-750F.

Este teste tem por finalidade detectar a existência de partículas soltas na cavidade interna dos componentes encapsulados. A detecção de eventuais partículas é realizada através de um sensor acústico acoplado ao componente que é monitorado por um osciloscópio enquanto o componente é submetido aos choques e vibração mecânicos.

O equipamento utilizado foi programado para realizar as seguintes operações 1 e 2 intercaladas numa sequência consecutiva de quatro ciclos para cada componente:

- 1) Três choques mecânicos consecutivos com intensidade de $1000 \pm 200g$ (em unidades de gravidade (g)) sendo que cada um dos choques tem duração menor do que 100μs;
- 2) Vibração com intensidade de 20g (em unidades de gravidade (g)), numa frequência calculada conforme a norma utilizada de 46Hz e com duração de 3 ± 1 segundos.

E. Burn-in

Durante o ciclo de vida (tempo em operação) de um componente eletrônico, o período em que mais ocorrem falhas é conhecido pelos termos “Início da Vida” ou “Mortalidade Infantil”, que é o período inicial em que o componente entra em operação. Esses defeitos são originários principalmente de eventuais falhas ocorridas no processo de fabricação. [11]

No Teste de *Burn-in* os componentes são colocados em situações severas de funcionamento, porém, respeitando as condições máximas especificadas que eles devem suportar. Este processo irá forçar possíveis falhas do período de “Início

da Vida” a ocorrer, sendo identificadas antes dos componentes serem utilizados em uma aplicação [6].

O Teste de *Burn-in* foi realizado de acordo com a condição B do método 1039 da norma MIL-STD-750F e as condições do item 4.3.1 da norma MIL-PRF-19500/290F.

Tendo em vista as características da Tabela II e o objetivo do Teste de *Burn-in* citado, os transistores do tipo 2N2905A devem ser submetidos, conforme as normas utilizadas, às seguintes condições:

- Potência dissipada no transistor (PD) de no mínimo 75% do valor máximo de PT;
- Polarização de VCB constante em um valor entre -10 a -30Vdc;
- Aplicação de TA constante juntamente com a PD selecionada para atingir no mínimo $T_J = 135^{\circ}\text{C}$.

Para determinar o valor de TA em que o componente deve ser submetido para atingir a T_J desejada, foi utilizado o gráfico da curva de delimitação de potência e de temperatura, mostrado na Fig. 5.

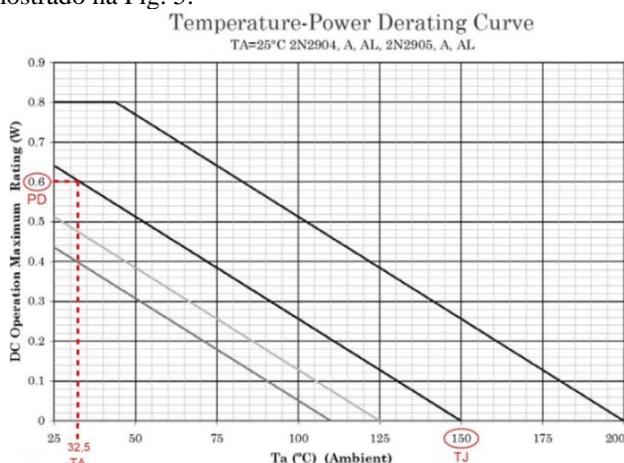


Fig. 5 – Gráfico: Curva de delimitação de potência e de temperatura para o transistor 2N2905A. Adaptado de [8]

No gráfico da Fig. 5, foi escolhida a reta para um valor de T_J igual a 150°C (interceptado no eixo X), assim, o ponto nessa reta que corresponde ao valor de PD utilizado, resulta em um valor de TA de $32,5^{\circ}\text{C}$.

Foi projetada uma placa de circuito impresso para polarizar os transistores de forma a atingir os valores das condições citadas, requeridas pela norma.

Como já possuíam a qualificação JANTX, os transistores já haviam sido submetidos a 160 horas deste teste, portanto os componentes foram submetidos a apenas mais 80 horas de teste para atingir as 240 horas requeridas para a qualificação JANS, visto que o *Burn-in* é um teste cumulativo.

F. Teste de Hermeticidade

Este teste tem por finalidade verificar se o encapsulamento do componente é totalmente hermético. Para isso, são realizados em sequência os métodos de Fuga Fina e Fuga Grossa que identificam a possível existência de fissuras no *case* do componente que possam resultar em oxidação e corrosão comprometendo o seu desempenho.

Para realizar a verificação da integridade da hermeticidade do encapsulamento, dada uma condição específica, cada método utilizado analisa uma taxa de fuga no componente que, nestes casos, é a quantidade de um gás que flui através de um vazamento, por um intervalo de tempo, em

uma determinada temperatura e para uma diferença de pressão conhecida [2].

1) Fuga Fina

O teste de Fuga Fina foi realizado de acordo com a condição H2 do método 1071 da norma MIL-STD-750F.

Nessa condição, os componentes devem ser primeiramente pressurizados com gás hélio em uma câmara durante um período de 10 horas, que foi calculado conforme os requisitos da norma. Com isso, caso houver alguma fissura o gás entrará no interior do componente.

Após o fim da pressurização, os componentes foram inseridos numa câmara de vácuo acoplada a um espectrômetro de massa para medir a taxa de vazamento de gás hélio para cada transistor, que deve ser menor que o valor de $1 \times 10^{-8} \text{ atm.cm}^3/\text{s}$, definido na Tabela 1071-V da norma.

2) Fuga Grossa

O teste de Fuga Grossa foi realizado de acordo com a condição C do método 1071 da norma MIL-STD-750F.

Nessa condição são utilizados dois líquidos perfluorocarbono, sendo os fluidos detector e indicador, onde cada um deve ter as características requeridas na Tabela 1071-II da norma MIL-STD-750F. Uma característica, por exemplo, é o ponto de ebulição do fluido detector que é menor do que o do fluido indicador. Assim, foi utilizado como fluido detector o Flurinert FC-72 e como fluido indicador o Flurinert FC-40, ambos da fabricante 3M.

Inicialmente os componentes foram submersos no líquido detector e pressurizados em 30psi em uma câmara por 23 horas e 30 minutos, conforme selecionado na Tabela 1071-III da norma MIL-STD-750F. Caso houver alguma fissura, o fluido detector penetrará no interior do componente.

Após a pressurização, os componentes foram submersos por 30 segundos no fluido indicador que se encontrava em uma temperatura de $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Pela diferença entre os pontos de ebulição entre os fluidos detector e indicador (respectivamente 56 e 165°C), caso houvesse uma fissura no *case* do componente, o líquido detector entraria em ebulição e seria possível visualizar bolhas saindo do local da fissura.

IV. RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS

A. Inspeção Visual Externa

Nos Testes de Inspeção Visual Externa não foi encontrada nenhuma anomalia nos componentes.

A marcação nos componentes contém os seus respectivos *date code* (código para identificação da data de fabricação) e PN, conforme a Fig. 6, que exhibe as imagens obtidas no teste.



Fig. 6 – Imagens obtidas no Teste de Inspeção Visual Externa

B. Parametrização Elétrica

Para analisar a conformidade das características elétricas dos transistores do tipo 2N2905A, foram utilizados como

referência os valores limites determinados pela norma MIL-PRF-19500/290R para cada parâmetro elétrico da Tabela III.

O equipamento testador de semicondutores utilizado possui uma interface de usuário através de seu *software*, onde foi possível programar o *setup* (configuração para o teste) desejado e foram gerados gráficos para cada parâmetro analisado. Todos os componentes obtiveram valores dentro dos limites máximos e mínimos determinados pela norma.

C. Detecção de Partículas Internas Soltas

O teste de PIND analisa a possível existência ou o surgimento de partículas internas soltas nos componentes após serem submetidos à aplicação da força centrífuga no Teste de Aceleração Constante e à aplicação dos choques e vibração mecânicos do próprio teste de PIND.

Neste teste realizado não foi detectada a existência de partículas internas soltas que poderiam causar falhas e comprometer o desempenho elétrico dos componentes.

Os resultados foram analisados através do osciloscópio de monitoramento acoplado ao sensor acústico, onde foram obtidos sinais de frequência estáveis e semelhantes para todos os componentes, conforme a Fig. 7, não identificando nenhuma partícula solta.

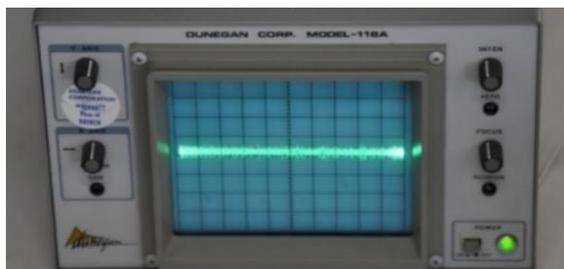


Fig. 7 – Sinal obtido no osciloscópio no Teste de PIND

D. Burn-in

Durante a execução do teste, a corrente total prevista fornecida para o *setup* foi monitorada através da fonte de alimentação utilizada e se manteve estável até o final do teste.

Os resultados sobre o efeito do teste de *Burn-in* nos componentes foram analisados nos testes posteriores a ele.

E. Teste de Hermeticidade

Os componentes obtiveram taxa de fuga de gás hélio menor do que 1×10^{-8} atm.cm³/s no teste de Fuga Fina, e não foi detectada nenhuma ocorrência de bolhas enquanto submersos no fluido indicador no teste de Fuga Grossa.

V. COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Na Inspeção por Raios-X realizada não foi possível visualizar os fios de ligação internos por serem de alumínio (Al). O alumínio, devido ao seu número atômico ($Z = 13$), absorve pouca quantidade de raios-x, por isso os fios internos não foram visualizados na inspeção radiográfica.

Os componentes obtiveram resultados positivos em todos os testes requeridos pelo procedimento de *relifing* e em todos os testes não destrutivos requeridos pelo *screening* para a qualificação espacial. Entretanto, não foram realizados os testes de análise física destrutiva e de radiação, que também são requeridos pela norma MIL-PRF-19500P para a

qualificação espacial, portanto, ainda não foram analisadas todas as características requeridas para a aplicação espacial.

VI. CONCLUSÃO

Embora o lote de componentes esteja fora do prazo determinado pela norma ESCC-Q-ST-60-14C para a montagem em placa eletrônica, todas as peças obtiveram êxito tanto nos testes requeridos no procedimento de *relifing* quanto nos testes não destrutivos requeridos para um nível de qualificação maior em relação ao que eles foram fabricados.

A confiabilidade dos componentes para o uso espacial foi confirmada apenas através dos testes não destrutivos de *upscreening*, onde foi possível avaliar que todas as peças possuem as características requeridas nesses testes para a qualificação espacial. Entretanto a norma MIL-PRF-19500P ainda especifica os testes para a análise física destrutiva e os testes de radiação em que uma determinada amostra do lote de componentes deve ser submetida para assim, serem analisadas outras características requeridas para a aplicação espacial. Com isso, é necessário o estudo para tal metodologia em trabalhos futuros.

Contudo, a metodologia criada possibilitou a análise das características dos componentes de uma forma eficiente e rápida, em vista que os componentes já possuíam uma qualificação militar, dessa maneira já tinham sido submetidos a alguns testes requeridos para a qualificação espacial, tendo assim uma maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Muraoka, "Componentes Eletrônicos para Uso Espacial: Visão da Aplicação", 2010. Disponível em: <http://www.ieav.cta.br/peice2010/Apresentacoes_PEICE%202010_pdf/2010-11-29/0104-Issamu.pdf>. Acesso em 04 de abril de 2019.
- [2] M. C. F. S. G. Ribeiro, "Upscreening em Componentes Eletrônicos Comerciais para Aplicação Espacial", 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade de São Francisco, São Paulo, 1999.
- [3] DEPARTMENT OF DEFENSE (United States of America). "MIL-PRF-19500P: Performance Specification Semiconductor Devices, General Specification For", Columbus, 2018, 160p.
- [4] DEPARTMENT OF DEFENSE (United States of America). "MIL-STD-196G: Standard Practice. Joint Electronics Type Designation Automated System", Columbus, 2018, 58p.
- [5] D. E. Braga, "Testes de Up-Screening em Diodo 1N6638", 2013. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – ETEP Faculdades, São José dos Campos, 2013.
- [6] D. Friedlander, "COTS EEE parts in space applications: evolution overview", 2016. Disponível em: <<https://wpo-altertechnology.com/cots-eee-parts-in-space-applications-evolution-overview/>>. Acesso em 20 de maio de 2020.
- [7] EUROPEAN SPACE AGENCY (Netherlands), "ESCC-Q-ST-60-14C: Relifing procedure – EEE components", Noordwijk, 2008, 29p.
- [8] DEPARTMENT OF DEFENSE (United States of America). "MIL-PRF-19500/290R: Performance Specification Sheet Transistor, PNP, Silicon, Switching, Types, 2N2904, 2N2904A, 2N2904AL, 2N2905, 2N2905A, AND 2N2905AL, JAN, JANTX, JANTXV, JANS", Columbus, 2018, 29p.
- [9] DEPARTMENT OF DEFENSE (United States of America). "MIL-STD-750F: Test Method Standard. Test Method for Semiconductor Devices", Columbus, 2013.
- [10] BECKMAN INSTRUMENTS INC., "The Component-test Bowl Rotor", Palo Alto, California (USA), 1980, 12p.
- [11] L. P. Martin, "Electronic Failure Analysis Handbook: Techniques and Applications for Electronic and Electrical Packages, Components, and Assemblies", McGraw-Hill, 1999.