



Caracterização DC de transistor para aplicações em Amplificadores de Potência de Estado Sólido (SSPA,s) embarcados em satélites radares do tipo SAR

Pedro Henrique Santos¹, Rodolfo Antônio da Silva Araújo¹, Luciano Barros Cardoso da Silva¹, Dênio Lemos Panissi¹, Oscar Fernando Gaidos Rosero¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Programa de Capacitação Institucional - (PCI)

pedro.santos@inpe.br

Resumo. *Amplificadores de Estado Sólido são sistemas que fornecem sinais eletromagnéticos para as antenas dos radares SAR. Para otimizar o ganho, eficiência e vida útil, a caracterização DC dos transistores em pequenos sinais se faz necessária na etapa de projeto. Assim, em condições estáticas, obtém-se a resposta às condições de tensão e corrente aplicadas no mesmo, fornecendo curvas características do dispositivo e permitindo análises detalhadas em condições de operação. Nesse contexto, o trabalho descreve as etapas realizadas para a caracterização DC de um transistor RF. Foram geradas as curvas características do transistor e uma análise termográfica qualitativa do dispositivo sobre teste. Os resultados obtidos foram comparados com as simulações e com isso, permitem avaliar o potencial da técnica utilizada.*

Palavras-chave: SSPA; Curva característica IxV do transistor em pequenos sinais; Efeitos térmicos.

1. Introdução

A operação satisfatória de um projeto que utiliza circuitos não lineares, como transistores que operam nos sistemas amplificadores de potência de estado sólido (SSPA,s), utilizados em radares de Abertura Sintética (SAR), está diretamente relacionada às medições dos parâmetros de entrada e saída do dispositivo. Com isso, a otimização dos SSPA,s, pode permitir que ocorra uma distribuição flexível de energia do sinal de RF no solo à partir da formação de um feixe digital na transmissão e alternância dos modos de operação do RADAR, bem como, a utilização de técnicas como a (HRWS), que fornecem uma Largura de Faixa com Alta Resolução, combinando uma antena de transmissão com uma variedade de receptores (SANTOS, ARAÚJO (2020)).



Um dos processos mais utilizados para a otimização se dá na caracterização DC dos transistores à partir das análises obtidas em função das curvas características I_xV dos dispositivos em pequenos sinais (BOYLESTAD, NASHELSKY, (2018)).

As medidas obtidas dos transistores em pequenos sinais fornecem informações relevantes, que servem como parâmetros de projeto para os testes e análises em grandes sinais, que operam de forma pulsada (GONZALEZ, (1997)). Neste caso, para análises CA, pulsos com baixos ciclos de trabalho podem ser utilizados para os testes do transistor, que podem variar e assim gerar as respostas provenientes do mesmo. As tensões pulsadas podem ser analisadas em diferentes pontos de operação e com isso avaliar os valores das correntes inerentes ao sistema (BOYLESTAD, NASHELSKY, (2018)). A temperatura de operação é outro fator a ser observado no projeto de amplificadores, pois afeta diretamente o ganho de corrente do transistor β_{ca} , a corrente de fuga I_{ceo} , e a indução de uma corrente na saída do dispositivo devido ao seu aquecimento. Com isso, o projeto deve contemplar um circuito de polarização que não acarrete mudanças consideráveis no ponto de operação do dispositivo, permitindo que se estabeleça um fator de estabilidade e assim forneça uma especificação do ponto de operação mais próximo do ideal para diferentes condições de operação (BOYLESTAD, NASHELSKY, (2018); GONZALEZ, (1997)).

A limitação de energia que se pode aplicar no transistor para testes DC é outro aspecto que está vinculado ao desempenho e vida útil do dispositivo, pois a elevação dos níveis superiores àqueles definidos pode prejudicar e induzir a inutilização do mesmo (ATHERTON, SNOWDEN, RICHARDSON, (1993)). Outro fator que influencia o desempenho do transistor que opera na região de micro-ondas é a dissipação de energia térmica do mesmo, o que pode levar a uma redução significativa tanto no desempenho quanto em sua confiabilidade.

Observa-se que os métodos para a geração de modelos que fazem uma separação entre a temperatura ambiente e os efeitos de auto aquecimento não permitem a precisão necessária para validar de forma coesa os resultados obtidos de forma experimental (GONZALEZ, (1997); ATHERTON, SNOWDEN, RICHARDSON, (1993)). Nos trabalhos realizados em Atherton, Snowden, Richardson, (1993), à partir de simulações, os autores perceberam que o aquecimento do dispositivo também pode gerar outros inconvenientes como, por exemplo, uma mudança significativa nos valores de capacitância intrínsecos ao dispositivo, o que modifica os parâmetros estabelecidos no projeto, e a consequente alteração nos resultados.

Sendo assim, para avaliar o desempenho do transistor em pequenos sinais, foi desenvolvido um algoritmo para a simulação de um transistor RF que opera na faixa de micro-ondas, gerando as curvas tanto de acionamento quanto as características I_xV para pequenos sinais, a partir do modelo Ebers-Moll. Posteriormente, foi realizada a caracterização elétrica do mesmo para a análise de desempenho e a devida comparação com o modelo simulado. Por fim, outra etapa foi realizada para a análise do desempenho térmico nas diferentes configurações adotadas, e com isso, utilizou-se uma câmera termográfica para avaliar a dissipação de calor do dispositivo ao longo da estrutura de teste desenvolvida e as influências existentes que possam prejudicar as etapas do projeto.

Os resultados obtidos nos testes elétricos se mostraram satisfatórios e servem de modelo para futuras caracterizações.



Observou-se um pequeno desvio entre os valores simulados e os valores medidos, que se justifica pela integração de espúrios inerentes à testes em bancada, devido à correntes parasitas dos dispositivos ativos. Os testes térmicos demonstraram pouca influência do aquecimento do transistor e troca de calor para com suas interfaces nas configurações adotadas para os testes.

Com isso, os resultados obtidos foram satisfatórios e servem como parâmetros para otimização dos algoritmos de simulação desenvolvidos. Também interessam como ferramentas para gerar condições de contorno nas etapas de caracterização elétrica dos dispositivos em pequenos sinais, reduzindo o tempo de execução, o custo do desenvolvimento de SSPA,s e melhorando assim o seu desempenho, rendimento e ganho dos dispositivos e sistemas de radares SAR embarcados em satélites, que requerem alto ganho, desempenho, menor volume e redução de massa nas cargas úteis.

2. Metodologia

2.1 Etapa de simulação do transistor.

Para a devida caracterização do transistor, inicialmente foram utilizadas equações recursivas para o cálculo numérico de alguns parâmetros do transistor, que podem ser consultadas em (TAYEL, AL-MSLMANY, (2011)). As equações se baseiam no modelo Ebers-Moll, sendo descritas na sequência.

$$I_F = I_{ES} \left[\exp^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_R = I_{CS} \left[\exp^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right] \quad (2)$$

Onde:

$$I_E = I_R - \alpha_R I_R$$

$$I_C = \alpha_F I_F - I_R$$

$$I_B = (1 - \alpha_F) I_F + (1 - \alpha_R) I_R$$

$$V_T = \left(\frac{kT}{q} \right)$$

Sendo:

k = Constante de Boltzmann = $(1,381 \cdot 10^{-23})$ V.C/°K

q = Carga do elétron = $(1,602 \cdot 10^{-19})$

T = Temperatura de operação do dispositivo - 300 K°.

α_R = Ganho de corrente reversa na configuração base comum.

α_F = Ganho de corrente direta na configuração base comum.



Com base nas equações recursivas, foi desenvolvido um algoritmo utilizando o software Octave para a simulação de alguns parâmetros do dispositivo. Com isso foi possível determinar as curvas de operação do transistor, além das curvas características I_xV para pequenos sinais. As mesmas foram plotadas e seguem descritas nos resultados para a devida comparação com os valores obtidos em laboratório a partir da caracterização.

O desenvolvimento desta etapa permitiu uma análise prévia do sistema a ser desenvolvido e, após a coleta dos dados dos testes elétricos realizados em laboratório, uma comparação de desempenho do dispositivo para otimização do modelo de simulação e melhor precisão em projetos futuros.

2.2 Etapa de caracterização do transistor

Para o desenvolvimento de um SSPA que possa ser utilizado como prova de conceito, uma etapa de caracterização foi realizada. Para isso utilizou-se um transistor MRF 2001M operando em pequenos sinais. O modelo de circuito em série para o transistor utilizado pode ser visto na Figura 1.

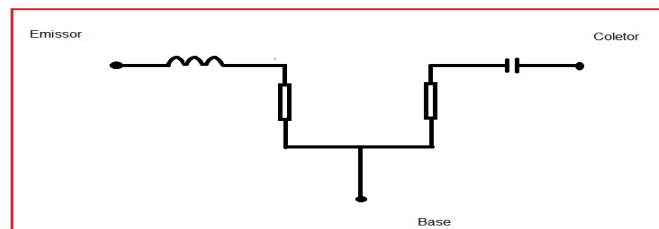


Figura 1. Modelo do circuito em série do transistor MRF 2001M.

Nota-se que entre o emissor e a base existe uma indutância em série com um resistor e entre o coletor e a base existe uma capacitância em série com um resistor. Este modelo fornece informações que foram utilizadas para a simulação e para a devida análise na melhoria de desempenho do transistor. A etapa de caracterização foi realizada no laboratório de testes de RF da Divisão de Eletrônica Espacial e Computação (DIEEC)/INPE. Para isso adotou-se o modelo de setup da Figura 2.

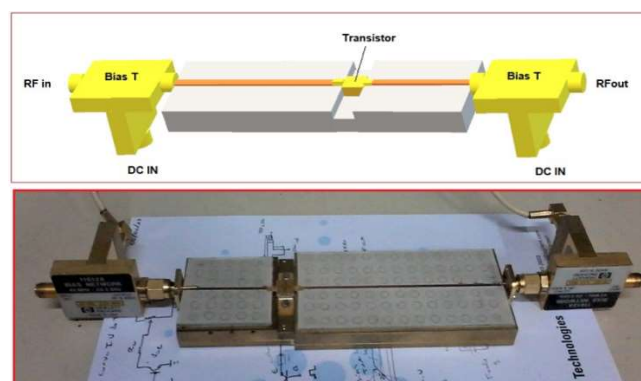


Figura 2. Modelo de setup de teste para a caracterização do transistor

Na Figura 2, na parte superior, temos um modelo CAD que ilustra as interações de forma sistemática. Na parte inferior, podemos perceber o transistor montado na base de teste e com



os Bias Tee acoplados, para permitir a análise dos sinais.

O transistor está diretamente fixado a uma base de teste, composta de uma liga de metal e acoplado a duas linhas de transmissão de marca ROGERS, modelo de substrato RT/DUROID, com permissividade efetiva de 10,5, que foram simuladas, projetadas e caracterizadas com impedâncias de 50 Ohms, podendo ser consultado em (SANTOS, ARAÚJO, MARQUES, (2022)).

Para a conexão com a fonte DC e com os sinais de RF são utilizados dois Bias Tee, onde os mesmos possibilitam a análise dos sinais em um osciloscópio e também em um Analisador de Rede Vetorial (VNA), em diferentes condições de projeto, permitindo o ajuste em níveis DC necessários para a análise de desempenho do sistema. Inicialmente foram selecionados diferentes configurações e níveis de tensão nas fontes de entrada e saída do transistor, sendo a tensão base emissor V_{be} , Tensão base coletor V_{cb} , e Tensão emissor base V_{eb} .

A configuração adotada é a de base comum, pois confere maior ganho, menor impedância de entrada e maior impedância de saída (GONZALEZ, (1997)). Para cada um dos valores aplicados sobre o dispositivo de teste coletou-se as correntes e tensões nos terminais do transistor. Os valores aplicados foram então levantados e podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Valores utilizados na caracterização

	Tensão base emissor V		Tensão coletor emissor V				
Configuração 1	0	0	1	2	3	4	5
Configuração 2	0,5	0	1	2	3	4	5
Configuração 3	1	0	1	2	3	4	5
Configuração 4	1,5	0	1	2	3	4	5
Configuração 5	2	0	1	2	3	4	5
Configuração 6	2,5	0	1	2	3	4	5

Para consolidar as respostas obtidas foram realizadas três repetições. Os dados foram devidamente processados e posteriormente analisados, para que, à partir da média dos resultados obtidos para cada ponto observado, fosse possível estabelecer e plotar as curvas de acionamento e as curvas DC características do transistor ($I_x V$) para pequenos sinais, conferindo assim as análises de desempenho do transistor e também informações necessárias às próximas etapas de projeto do SSPA a ser desenvolvido.

2.3 Testes de imageamento termográfico

Em um terceiro momento, foi realizada uma avaliação qualitativa referente ao aquecimento do transistor em função dos valores de tensão aplicados no mesmo. Um ensaio de imageamento termográfico foi realizado no Laboratório de Integração e Testes (LIT-INPE), na área de qualificação do Laboratório de Testes Vácuo Térmicos e Ensaio Climáticos (LVT), com classe de área limpa 100 mil (ISO 7-ISO14644-1 Part 1) e se encontrava nas seguintes condições ambientais de temperatura $22 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 5\%$.

Nesta etapa foi utilizada uma Câmera termográfica FLIR ThermoCam SC640, onde a mesma foi posicionada a uma distância de 0.5[m] do dispositivo a ser caracterizado e, com isso, as imagens foram coletadas e posteriormente processadas para a análise qualitativa da resposta do sinal. O setup de teste para as imagens termográficas pode ser visualizado na Figura 3.

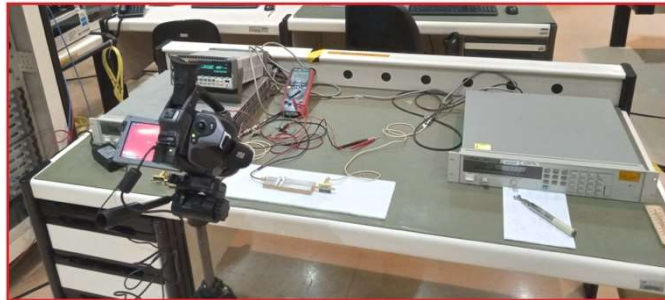


Figura 3. Setup de testes utilizando a câmera termográfica.

Foram repetidos os valores de tensão e corrente já definidos na etapa de caracterização inicial. Com isso, avaliou-se a influência da dissipação de temperatura ao longo da estrutura de fixação do transistor e também do substrato que contém as linhas de transmissão, que se encontram acopladas no transistor.

No tratamento da superfície a ser analisada, foram aplicadas 7 camadas de verniz da marca ISOTEC, específico para proteção de circuitos eletrônicos, para que houvesse uma homogeneização e elevação da emissividade na banda do infravermelho das superfícies dos diferentes materiais presentes na região a ser imageada, permitindo que a câmera termográfica realizasse a leitura das temperaturas presentes na região de interesse com relativa precisão. As imagens e os dados foram coletados e, com isso, foi possível avaliar a influência dos diferentes valores de tensão e corrente aplicados no transistor para o experimento, além das trocas de calor no sistema de teste. Os resultados servem como base para o desenvolvimento das próximas etapas, que contém maior quantidade de elementos distribuídos nas regiões próximas ao transistor, e os mesmos podem ser conferidos nos resultados obtidos nos testes.

3. Resultados e Discussão

3.1 Resultados da etapa de simulação do transistor

Para os resultados obtidos na primeira etapa, a partir do algoritmo desenvolvido para simulação do dispositivo a ser utilizado, observou-se inicialmente o ponto de operação do transistor, sendo que a curva de acionamento simulada pode ser observada na Figura 4.

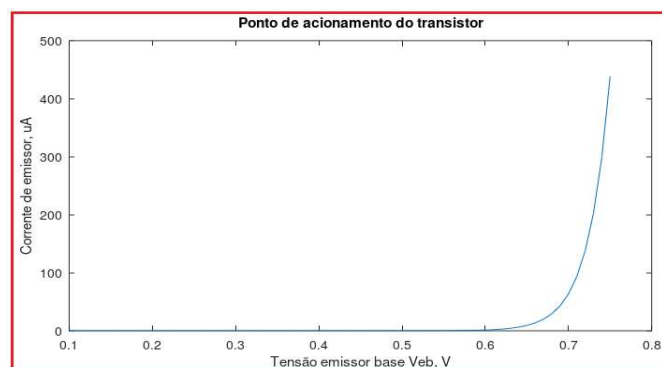


Figura 4. Curva de acionamento do transistor simulada



Podemos observar que a curva de acionamento do transistor começa a fornecer corrente do emissor de forma significativa à partir de uma tensão na base emissor V_{be} de 0,6 V. A partir desta curva, avaliamos como o transistor inicia sua operação, isso em relação a um sinal aplicado em sua base.

Posteriormente, para a devida análise de desempenho do transistor, foi gerada uma curva característica estática, em diferentes condições, conforme as equações recursivas descritas. Com isso, foi possível traçar a curva em diferentes configurações adotadas para o experimento. A curva característica simulada pode ser vista na Figura 5.

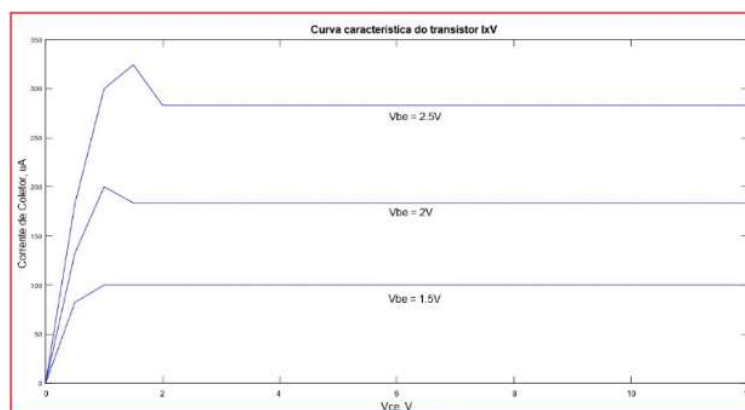


Figura 5. Curva característica I_xV simulada para diferentes valores

3.2 Resultados da etapa de caracterização elétrica do transistor

Após o processamento dos dados obtidos nos ensaios, foram analisadas diferentes condições para o ponto de acionamento do transistor. O gráfico que descreve a operação do transistor em diferentes configurações é apresentado na Figura 6.



Figura 6. Curva de acionamento do transistor obtido nos testes elétricos.

Nas curvas obtidas dos testes elétricos, podemos perceber que a curva de acionamento descreve diferentes valores de corrente de emissor (I_e) para diferentes valores de tensão de entrada (V_{be}) e em diferentes valores de tensão de saída (V_{cb}). Logo, a tensão entre o coletor



e a base (V_{cb}) pouco influencia na resposta do transistor a partir do ponto de acionamento do mesmo, e isso ocorre quando V_{be} se encontra próximo de 0,7V.

De acordo com Gonzalez (1997), a partir da linearização da curva, é possível se desprezar as resistências da junção polarizada diretamente e, para a análise em pequenos sinais, podemos considerar o valor de 0,7V, o que pode ser observado nas curvas obtidas nos testes.

Para a análise de desempenho do transistor em diferentes configurações estáticas, gerou-se uma curva característica $I_x V$ do transistor para diferentes valores de V_{ce} e V_{be} . Com isso, observou-se a corrente de coletor I_c do dispositivo. A mesma pode ser vista na Figura 7.

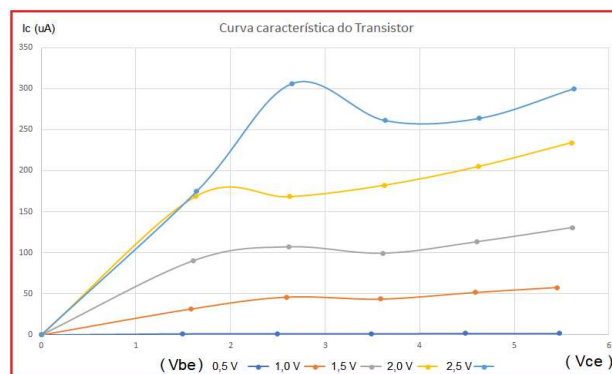


Figura 7. Curva característica $I \times V$ do transistor obtida nos testes.

Avaliando a curva característica do transistor, é possível perceber que a mesma segue uma tendência, onde conforme se aumenta o valor da tensão V_{be} , a corrente de coletor I_c tende a aumentar. Também devemos notar que a corrente I_c no extremo inferior, para V_{be} 0,5, é praticamente igual a zero. Nesta etapa, também se observou que, para uma tensão V_{ce} entre 2V e 3V, a curva se comporta de forma não linear.

É possível perceber que as curvas obtidas nas medidas experimentais são condizentes com as obtidas na simulação utilizando o software Octave, visto que a simulação não contemplou os elementos distribuídos nas linhas e os Bias Tee utilizados para conexão. Segundo Gonzalez (1997), os desvios existentes e as não linearidades ocorrem devido aos efeitos parasitas existentes nos sistemas acoplados, tais como indutores, capacitores e resistências, presentes nos cabos utilizados, bem como nas conexões, e servem como parâmetros para a geração de condições de contorno para otimização das simulações e das melhorias do sistema.

Os resultados obtidos permitem fazer o devido ajuste no algoritmo para as posteriores simulações e com isso permitir maior acurácia e a devida modelagem do transistor a ser caracterizado.

Para transistores que operam de forma pulsada, o valor de V_{be} , que aciona o transistor, se baseia na curva de acionamento do transistor. Como foi observado nos parâmetros de entrada, os valores de V_{be} para o transistor caracterizado estão próximos de 0,7V, devido às características do transistor utilizado.



3.3 Resultado dos Testes de imageamento termográfico

Para a análise de desempenho térmico, utilizando imagens de uma câmera termográfica, foram selecionadas algumas imagens que representam a evolução das temperaturas do processo de caracterização para diferentes tensões de acionamento do transistor e suas respectivas variações. A Figura 8 demonstra o exposto.

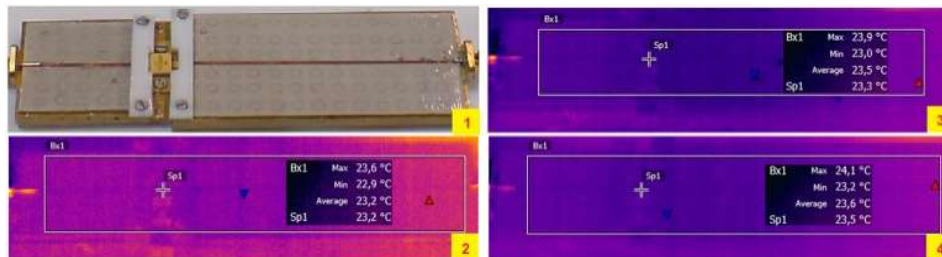


Figura 8. Resultado dos testes térmicos utilizando uma câmera termográfica.

Observando a Figura 8, podemos perceber que na imagem 2, início dos testes, temos uma leitura de 23,2°C na parte superior do transistor, e uma média ao longo da superfície de fixação na mesma temperatura. Para a imagem 3, ponto intermediário dos testes, percebemos uma variação de 23,3°C na parte superior do transistor e uma média de 23,5°C. Para a imagem 4, final dos testes, uma variação de 23,5°C sobre o transistor e uma média da placa de 23,6°C.

A pequena diferença média de 0,4 °C, observadas ao longo do experimento, pode estar também relacionada à variação de temperatura do ambiente, bem como a troca de calor entre os operadores do ensaio realizado, entre a placa ou da precisão da câmera termográfica utilizada. Com isso, inferimos que o transistor causou pouca influência térmica nas regiões próximas da fixação do mesmo, indicando que nestas condições, a temperatura dissipada pelo transistor não influencia significativamente as regiões adjacentes, conferindo maior acurácia na resposta dos dispositivos a serem construídos e montados sobre a superfície do substrato, garantindo assim, maior precisão e efetividade nas respostas do sistema a ser desenvolvido.

O aquecimento do dispositivo gera outros inconvenientes, como por exemplo, uma mudança significativa nos valores de capacitância, intrínseca ao dispositivo (ATHERTON, SNOWDEN, RICHARDSON, (1993)). Tais mudanças devem ser avaliadas durante operação do sistema, para devida otimização, fornecendo os níveis desejados e precisão nas respostas.

4. Considerações

A partir da caracterização do dispositivo foi possível obter os dados que são necessários para uma devida otimização do SSPA a ser desenvolvido para a prova de conceito.

Os dados permitem a geração de informações que não estão presentes no datasheet do dispositivo e que são necessários para uma implementação em grandes sinais, onde a curva DC característica do transistor, a curva de acionamento e a temperatura relativa ao dispositivo para os valores de tensão e corrente testados, possibilitam uma análise preliminar da operação do transistor, permitindo assim, maior precisão no desenvolvimento dos elementos distribuídos no substrato, como capacitores, indutores, resistores e também uma análise prévia, de como os mesmos podem contribuir para a performance do amplificador e garantir maior ganho e eficiência do sistema a ser desenvolvido. A etapa de simulação se mostrou eficiente para a avaliar os parâmetros que deveriam ser utilizados na etapa de caracterização elétrica.



Os desvios ocorridos, em grande parte, se deram devido aos ruídos inerentes à etapa de caracterização elétrica como atenuação do sinal e também, efeitos parasitas entre os componentes ativos do sistema, como indutores e capacitores que são externos ao transistor, como por exemplo nos elementos distribuídos nas linhas de transmissão utilizadas para a conexão do transistor e também dos conectores Bias Tee e dos cabos utilizados para o teste. Para a etapa de análise do desempenho térmico, foi observado que, para a condição de pequenos sinais, e considerando o setup utilizado o transistor não teve variação significativa de temperatura, possibilitando uma análise de desempenho mais precisa, pois, tal variação, pode modificar os parâmetros que foram utilizados para a caracterização gerando dados incoerentes, como por exemplo, alteração da capacitância do transistor, já descritos na literatura.

5. Conclusão

Foram realizadas as caracterizações elétricas do transistor para pequenos sinais, onde foi possível validar as técnicas e obter os resultados para o dispositivo sobre teste. Os resultados obtidos serão utilizados para o desenvolvimento de um SSPA que opera de forma pulsada, onde testes preliminares, como a variação da Frequência de Repetição do Pulso (PRF) e da temperatura, serão realizados para a devida modelagem de sistemas que operam em maior potência. As imagens termográficas geradas fornecem informações qualitativas das respostas para diferentes configurações adotadas no experimento.

Sendo assim, os resultados obtidos servem como parâmetros de entradas para realimentar os algoritmos desenvolvidos para as simulações realizadas, permitindo que a etapa de modelagem do SSPA a ser desenvolvido esteja mais próxima das condições observadas em bancada, fornecendo assim maior precisão nas respostas obtidas, redução do custo, maior eficiência no sistema e posteriormente na etapa de construção do modelo de engenharia.

Agradecimentos: *Aos colegas da DIEEC que participaram das etapas de desenvolvimento e desempenho deste trabalho. Ao Laboratório de Integração de Teste – COLIT, pela disponibilização da sala limpa onde ocorreu o ensaio, e equipamentos de teste. Ao CNPQ, pelo investimento em Pesquisa e neste Programa de Capacitação Institucional (PCI).*

Referências

- ATHERTON, J. S.; SNOWDEN, C. M.; RICHARDSON, J. R. Characterization of thermal effects on microwave transistor performance using an efficient physical model. In: 1993 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 1993. p. 1181-1184.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHIELSKY, Louis. Electronic Devices and Circuit Theory 11th ed. 2018.
- GONZALEZ, Guillermo. Microwave transistor amplifiers: analysis and design. New Jersey: Prentice hall, 1997.
- SANTOS, P. H. ARAÚJO R.A.S; Radares de abertura sintética embarcados em satélites: Visão geral e estado da arte: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG). 2020.
- SANTOS, P. H.; ARAÚJO, R. A. S.; MARQUES, E. Caracterização da permissividade dielétrica efetiva em Placas de Circuito Impresso que operam em microondas utilizando linhas de microstrip e o método de diferença de fase. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 13. (WETE). 2022, São José dos Campos.
- TAYEL, Mazhar B.; AL-MSLMANY, Amir. Biasing effect on improvement of linearity and efficiency of RF linear power amplifier. In: 2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPCP). IEEE, 2011. p. 1-4.