UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-AMP] Amplificadores de RF e Estabilidade Ativa

Engenharia de RF e Circuitos Planares de Banda Larga

Prof. Marcelo E. V. Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário Executivo do Módulo

- **Transistores Ativos em mmWave:** GaN HEMT, GaAs pHEMT e parasitismos intrínsecos (C_{gs}, C_{gd}, g_m).
- **Estabilidade Linear de Rollett:** Critério clássico ($K > 1, |\Delta| < 1$) e mapeamento na Carta de Smith.
- **Critério Geométrico μ de Edwards-Sinsky:** Condição única, necessária e suficiente.
- **Ganhos de Potência em Micro-ondas:** G_T, G_P, G_A, Máximo Ganho Disponível (MAG) e MSG.
- **Amplificadores de Baixo Ruído (LNA):** Círculos de ruído ($F_{\min}, R_n, \Gamma_{\text{opt}}$) e compromisso com ganho.
- **Topologias de Banda Larga:** Amplificador Balanceado com híbridos de 3 dB e Amplificador Distribuído (TWA).

Transistores de Estado Sólido em Micro-ondas

- **GaN HEMT (Nitreto de Gálio):**
  - Elevada densidade de potência (> 5 W/mm), alta tensão de ruptura (> 100 V).
  - Ideal para amplificadores de potência (PA) de estações rádio-base 5G/6G.
- **GaAs pHEMT (Arsenieto de Gálio Pseudomórfico):**
  - Alta mobilidade de elétrons no canal 2DEG, excelente figura de ruído ($NF < 1$ dB).
  - Escolha padrão para LNAs em ondas milimétricas (Ka/V/W-band).
- **Figuras de Mérito em Frequência:**

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}, \qquad f_{\max} \approx \frac{f_T}{2\sqrt{\frac{R_g + R_{in} + R_s}{R_{ds}} + 2\pi f_T R_g C_{gd}}}$$

O Mecanismo da Instabilidade em RF

- **A Realimentação Parasita $S_{12} \neq 0$:**
  - Originada primordialmente pela capacitância gate-drain C_{gd}.
  - Em RF, a impedância de carga Z_L afeta a impedância de entrada Z_{in} (e vice-versa).
- **Transformações Bilineares Fundamentais:**

$$\Gamma_{\text{in}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}, \qquad \Gamma_{\text{out}} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S}$$

Condição Crítica de Oscilação

Se para alguma terminação passiva ($|\Gamma_L| \leq 1$ ou $|\Gamma_S| \leq 1$), tivermos $|\Gamma_{\text{in}}| \geq 1$ ou $|\Gamma_{\text{out}}| \geq 1$, a parte real da impedância torna-se negativa ($\text{Re}\{Z\} \leq 0$), disparando auto-oscilação!

Critério de Estabilidade de Rollett (1962)

- O amplificador é **incondicionalmente estável** se $|\Gamma_{\text{in}}| < 1$ para todo $|\Gamma_L| \leq 1$ e $|\Gamma_{\text{out}}| < 1$ para todo $|\Gamma_S| \leq 1$.
- **Teorema de Rollett:** Exige a verificação simultânea de duas condições:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1$$

- Se $K < 1$ ou $|\Delta| > 1$, o dispositivo é **potencialmente instável**:
  - Existem certas combinações de carga Γ_L ou fonte Γ_S que induzem oscilação.
  - Exige mapeamento detalhado dos círculos de estabilidade.

Círculos de Estabilidade na Carta de Smith

- As fronteiras $|\Gamma_{\text{in}}| = 1$ e $|\Gamma_{\text{out}}| = 1$ definem círculos no plano Γ_L e Γ_S:

Círculo de Carga (Γ_L):

$$C_L = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11}^*)^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2}$$

$$r_L = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

Círculo de Fonte (Γ_S):

$$C_S = \frac{(S_{11} - \Delta S_{22}^*)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2}$$

$$r_S = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

- Se $|S_{11}| < 1$, o centro da Carta ($\Gamma_L = 0$) é estável; a região externa ao círculo de carga é estável se o círculo engloba a fronteira.
- Para estabilidade incondicional, os círculos de estabilidade devem situar-se **completamente fora** do círculo unitário $|\Gamma| \leq 1$.

Critério Geométrico μ de Edwards-Sinsky (1992)

- **Limitação do teste de Rollett:** Necessidade de calcular duas grandezas (K e Δ), sem indicação direta da margem de distância da instabilidade.
- **O Fator μ_1 de Carga (Edwards & Sinsky, IEEE Trans. MTT):**

$$\mu_1 = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta S_{11}^*| + |S_{12}S_{21}|} > 1$$

Propriedades Exclusivas do Fator μ

- $\mu_1 > 1$ é condição **única, necessária e suficiente** para estabilidade incondicional.
- μ_1 representa geometricamente a distância da origem $|\Gamma_L| = 0$ até o círculo de carga.
- Quanto maior μ_1, maior a robustez contra variações térmicas e tolerâncias.

Técnicas de Estabilização Resistiva

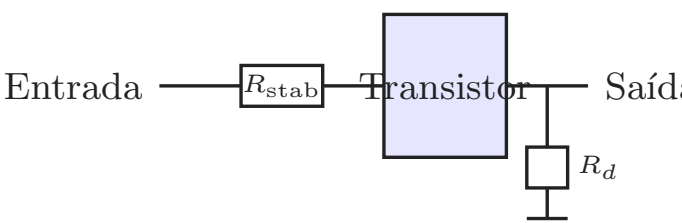
- Quando o transistor é potencialmente instável ($K < 1$ ou $\mu_1 < 1$):

1. Resistor Série na Porta (R_s):

- Eleva a parte real da impedância vista pelo gerador.
- Degrada a figura de ruído se inserido na entrada.

2. Resistor Shunt no Dreno (R_p):

- Consome potência refletida na saída.
- Reduz levemente o ganho, mas preserva a figura de ruído do LNA.



Definições Rigorosas de Ganho de Potência

- **1. Ganho do Transdutor (G_T):**
  - P_L/P_{avs} (potência entregue à carga / potência disponível da fonte):

$$G_T = \frac{1-|\Gamma_S|^2}{|1-\Gamma_{\text{in}}\Gamma_S|^2}|S_{21}|^2\frac{1-|\Gamma_L|^2}{|1-S_{22}\Gamma_L|^2}$$

- **2. Ganho de Potência Operacional (G_P):**
  - P_L/P_{in} (potência entregue à carga / potência absorvida na entrada):

$$G_P = \frac{1}{1-|\Gamma_{\text{in}}|^2}|S_{21}|^2\frac{1-|\Gamma_L|^2}{|1-S_{22}\Gamma_L|^2}$$

- **3. Ganho Disponível (G_A):**
  - $P_{\text{avn}}/P_{\text{avs}}$ (potência disponível na saída / potência disponível da fonte):

$$G_A = \frac{1-|\Gamma_S|^2}{|1-S_{11}\Gamma_S|^2}|S_{21}|^2\frac{1}{1-|\Gamma_{\text{out}}|^2}$$

MAG (Máximo Ganho Disponível) e MSG

- **Casamento Conjugado Simultâneo:**
  - Sob estabilidade incondicional ($K > 1, |\Delta| < 1$), existe uma solução única para:

$$\Gamma_S = \Gamma_{\text{in}}^*, \qquad \Gamma_L = \Gamma_{\text{out}}^*$$

- **Máximo Ganho Disponível (MAG):**

$$\text{MAG} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}\left(K - \sqrt{K^2 - 1}\right)$$

- **Máximo Ganho Estável (MSG) [quando $K < 1$]:**
  - Limite teórico obtido com $K = 1$ após estabilização resistiva:

$$\text{MSG} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}$$

Amplificadores de Baixo Ruído (LNA)

- A sensibilidade de qualquer receptor de RF é regida pelo LNA do estágio inicial.
- **Equação de Ruído de Dois Portais:**

$$F = F_{\min} + \frac{4R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_S - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{(1 - |\Gamma_S|^2)|1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2}$$

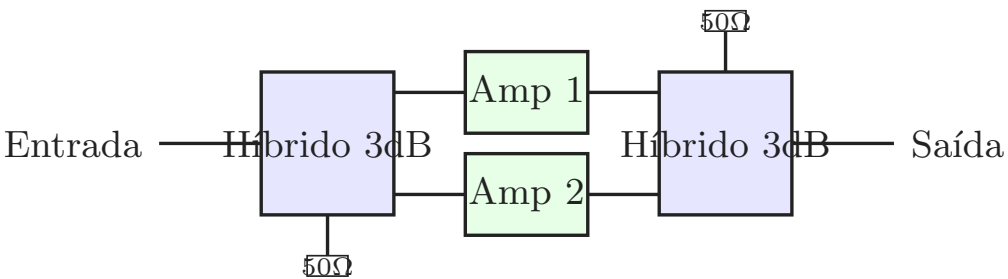
- Parâmetros intrínsecos de ruído do transistor:
  - $F_{\min}$: Figura de ruído mínima realizável.
  - Γ_{opt}: Coeficiente de reflexão ótimo da fonte.
  - R_n: Resistência equivalente de ruído (sensibilidade a desvios de Γ_S).

O Trade-off Ruído vs. Ganho

Quase sempre $\Gamma_{\text{opt}} \neq S_{11}^*$. Projetar para mínimo ruído degrada a perda de retorno na entrada (S_{11}); projetar para máximo ganho degrada o ruído ($F > F_{\min}$).

Topologias de Banda Larga: O Amplificador Balanceado

- Conexão de dois amplificadores idênticos através de acopladores híbridos de 90° (3 dB):

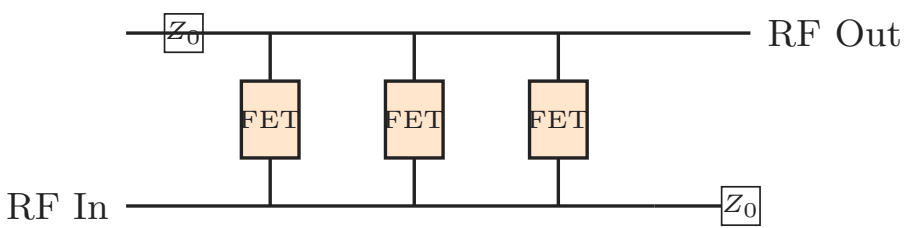


- **Vantagens Imediatas:**
  - Reflexões de entrada retornam com defasagem de 180° e cancelam-se: $S_{11} \approx 0$.
  - Potência de saída 3 dB superior ($P_{\text{out}} = 2P_1$).
  - Estabilidade incondicional garantida mesmo com transistores marginais.

O Amplificador Distribuído de Onda Viajante (TWA)

- Para operar de DC a dezenas de GHz, as capacitâncias parasitas dos transistores são absorvidas como elementos shunt de linhas de transmissão artificiais:

$$Z_{\text{gate}} = \sqrt{\frac{L_g}{C_g + C_{gs}/l_g}} \approx 50\,\Omega, \qquad Z_{\text{drain}} = \sqrt{\frac{L_d}{C_d + C_{ds}/l_d}} \approx 50\,\Omega$$

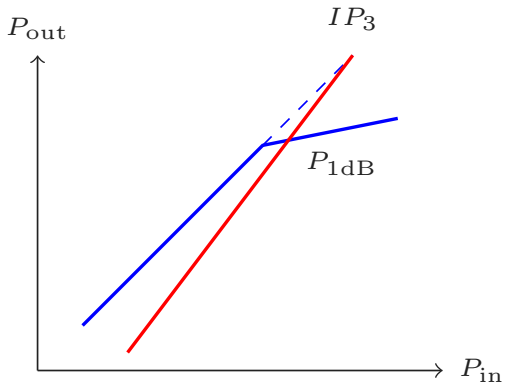


- **Sincronismo de Fase:** Quando $v_{\text{fase,gate}} = v_{\text{fase,drain}}$, as ondas de dreno somam-se construtivamente em direção à carga.

Distorção Não-Linear: $P_{1\mathbf{dB}}$ e IP_3

- Amplificadores reais saturam quando a excursão de sinal atinge as tensões de alimentação.
- **Ponto de Compressão de 1 dB ($P_{1\mathbf{dB}}$):** Potência de saída onde o ganho cai 1 dB em relação ao ganho linear de pequeno sinal.
- **Ponto de Interceptação de 3ª Ordem (IP_3):**

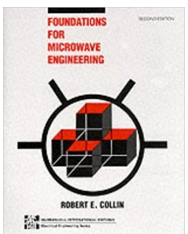
- Quando dois tons próximos (f_1, f_2) são excitados:
- Produtos de intermodulação (IMD3): $2f_1 - f_2$ e $2f_2 - f_1$.
- Caem dentro da banda de recepção e não podem ser filtrados!
- Regra prática: $OIP_3 \cong P_{1\mathrm{dB}} + 10$ à 12 dB

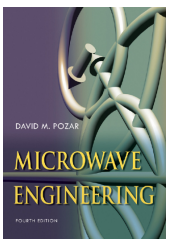


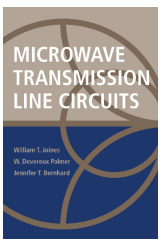
Laboratório Virtual no Navegador

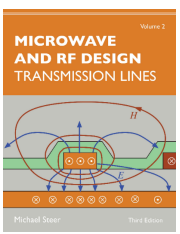
Simulador de Estabilidade & Carta de Smith

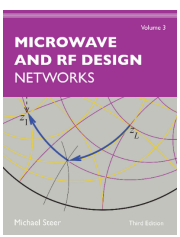
- Ajuste dinâmico de $[S]$ complexo: $|S_{11}|, \angle S_{11}, |S_{21}|, |S_{12}|, |S_{22}|$.
- Cálculo imediato de K, $|\Delta|$ e critério μ_1.
- Traçado dos círculos de carga (C_L, r_L) e fonte (C_S, r_S) em tempo real.
- Diagnóstico instantâneo de estabilidade incondicional e cálculo de MAG/MSG (dB).





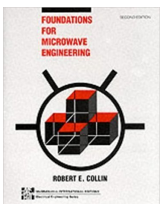


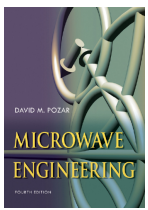


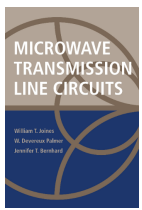


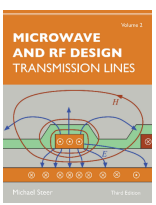
Disponível no portal interativo.

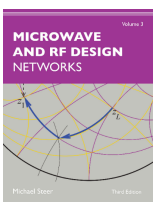
Obras Clássicas e Bibliografia Canônica











Literatura canônica de RF e micro-ondas.

Referências Fundamentais Recomendadas:

1. **Steer, M. B.** *Microwave and RF Design, Volume 5: Amplifiers and Oscillators*, 3rd ed., NC State Open Textbook Library, 2019.
2. **Pozar, D. M.** *Microwave Engineering*, 4th ed., John Wiley & Sons, 2011. (Capítulo 12).
3. **Rollett, J. M.** "Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports", *IRE Trans. Circuit Theory*, vol. 9, 1962.
4. **Edwards, M. L. & Sinsky, J. H.** "A new criterion for linear 2-port stability", *IEEE Trans. MTT*, 1992.
5. **Ayasli, Y. et al.** "A Monolithic GaAs 1-13-GHz Traveling-Wave Amplifier", *IEEE Trans. MTT*, 1982.