

1. Publicação nº <i>INPE-2480-PRE/165</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1982</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DEE/DTL</i>	Programa <i>ESTER2</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>LINEARIZADOR</i> <i>TWT</i>			
7. C.D.U.: <i>621.3.029.6</i>			
8. Título <i>LINEARIZADORES PARA TWT EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE</i>		10. Páginas: 26	
		11. Última página: 19	
		12. Revisada por <i>Janio Kono</i> <i>Janio Kono</i>	
9. Autoria <i>Eduardo Antonio Parada Tude</i> <i>Eduardo Antonio Parada Tude</i> Assinatura responsável		13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>	
14. Resumo/Notas <i>Relata-se uma pesquisa desenvolvida recentemente pelo autor na ESTEC (European Space Research and Technology Center) para avaliar o uso de linearizadores para TWT em sistemas de comunicação por satélite. As possibilidades de redução do "back-off" (recuo) e dos produtos de intermodulação, em sistemas FDMA, e de redução da taxa de erros por bit, em sistemas TDMA, são apresentados juntamente com as técnicas de construção de linearizadores atualmente empregadas.</i>			
15. Observações <i>Submetido para apresentação na 34ª Reunião Anual da SBPC, em Campinas, SP, de 6 a 14 de julho de 1982.</i>			

ABSTRACT

A research developed recently by the author in ESTEC (European Space Research and Technology Center) to evaluate the use of TWT linearizers in communications system by satellite is reported the possibilities of reducing "back-off" and intermodulation products, in FDMA systems, and of reducing the bit error rate, in TDMA systems, are presented together with the techniques now used to build linearizers.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 - <u>TWT</u>	2
3 - <u>MÉTODOS DE LINEARIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE</u>	5
4 - <u>LINEARIZADORES EM SISTEMAS FDMA E TDMA</u>	8
5 - <u>CIRCUITOS DE TESTE</u>	12
6 - <u>CONCLUSÕES</u>	17
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	19

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Sistema de comunicação por satélite	1
2 - Circuito básico para TWT	2
3 - Características da TWT: a) compressão de amplitude, b) variação de fase	5
4 - Linearizador da Thomson-CSF	6
5 - Diagrama de operação	6
6 - Linearizadores a FET (KDD)	7
7 - Diagrama de operação	8
8 - Linearizador para TDMA	9
9 - Características da TWT com o linearizador: a) na estação terrestre; b) no satélite	10
10 - Performance com o linearizador: a) C/N; b) recuo ("back off")	11
11 - Circuito de teste	12
12 - Amplificador a FET nº 2	14
13 - Amplificador a FET nº 3	15
14 - Amplificador a FET nº 4	16

1 - INTRODUÇÃO

Em sistemas de comunicação por satélite convencionais, representados na Figura 1, o satélite funciona como um repetidor ativo, colocado em órbita geoestacionária a 35800 km da terra, unindo duas estações terrenas.

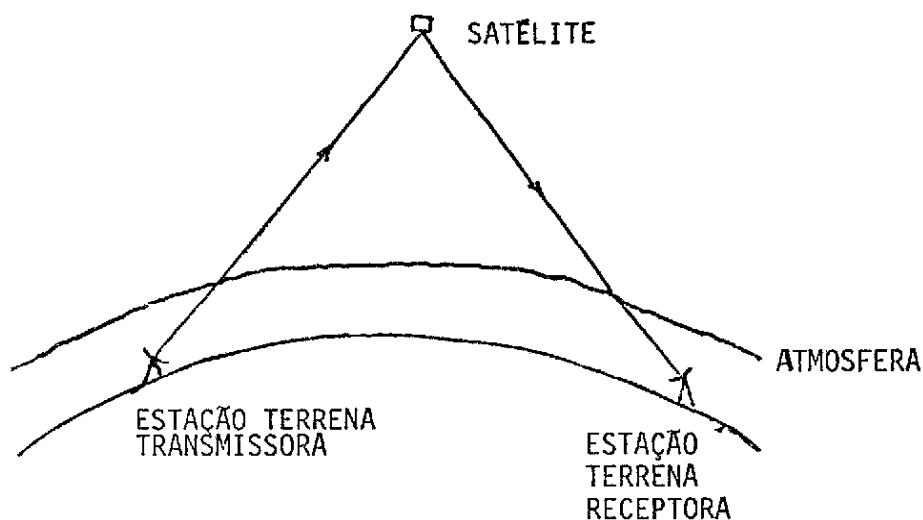


Fig. 1 - Sistema de comunicação por satélite.

As frequência em uso por sistemas de comunicação comerciais envolvem uma banda de 500 MHz, em 6/4 GHz e 14/12 GHz para subida/ /descida. O acesso ao satélite por várias estações terrenas pode ser organizado através da alocação de frequências, FDMA (Frequency Division Multiple Access), ou de tempo, TDMA (Time Division Multiple Access).

O projeto do sistema envolve uma solução de compromisso entre o ganho da antena, a figura de ruído dos receptores e a potência dos transmissores. Neste quadro, amplificadores a TWT (Traveling Wave Tube) apresentam-se como a melhor opção para os transmissores, devido à largu ra de faixa e a potência fornecidas, superando outras alternativas como amplificadores a Klystron e GaAs Fet.

A TWT é, no entanto, um dos pontos críticos no projeto de um sistema de comunicação por satélite, devido a seu alto custo, potência DC consumida, probabilidade de falha e não-linearidades introduzidas no sistema. Para evitar a região não-linear, a TWT é operada com um recuo ("back-off") em relação ao seu ponto de saturação.

O objetivo deste trabalho, realizado durante estágio na ESTEC (European Space and Technology Center) é investigar as vantagens e desvantagens do uso de linearizadores para TWT em sistemas de comunicção por satélite. A pesquisa envolveu um levantamento bibliográfico através da ESANET (rede de pesquisa bibliográfica da ESA) para se verificar o estágio atual de desenvolvimento do assunto; a análise para operação em sistemas FDMA e TDMA; e finalmente a montagem de um protótipo para avaliar o funcionamento e as dificuldades de construção, conforme apresentado nas Seções 3, 4 e 5. Na Seção 2 discute-se a TWT como elemento não-linear, e na Seção 6 apresentam-se as conclusões.

Considerar-se-á neste trabalho o amplificador de potência composto de apenas uma TWT, mas os resultados aqui obtidos se aplicam ao caso de combinações de duas ou mais TWTs.

2. TWT

Apresenta-se agora, de forma sumária, o funcionamento da TWT e suas características. A Figura 2 é um diagrama simplificado da estrutura de uma TWT do tipo hélice, tal como foi criada por Kompfner em 1944.

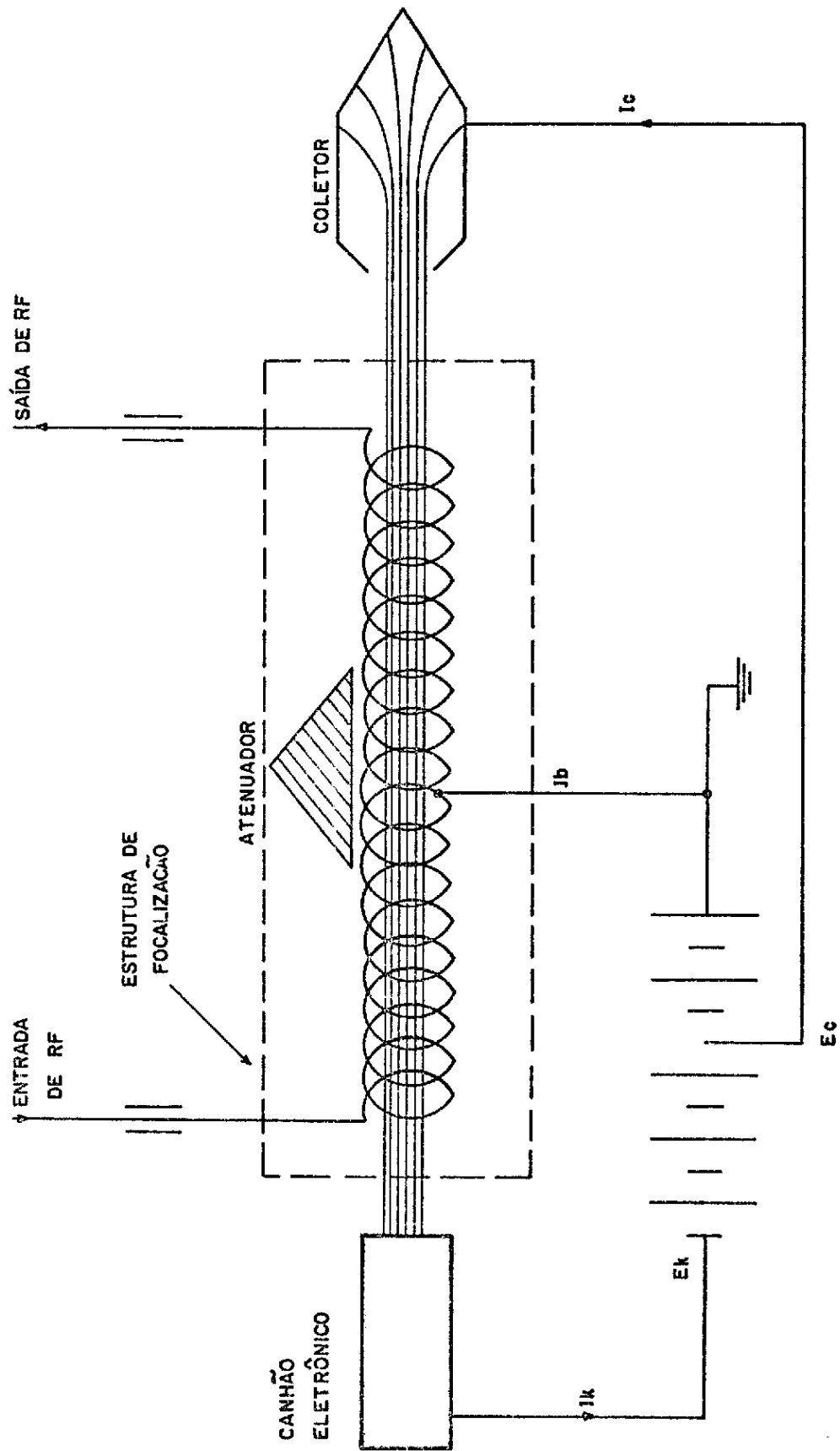


Fig. 2 - Circuito básico para TWT.

Os elementos principais da TWT são: o canhão eletrônico, o circuito de interação de RF, a estrutura de focalização de feixe de elétrons e o coletor. O canhão eletrônico produz um feixe de elétrons que é focalizado por um campo magnético constante na direção do coletor, percorrendo todo o comprimento do tubo. Ao mesmo tempo, a energia de RF caminha pelo fio em hélice na velocidade da luz. Entretanto, em virtude da forma de hélice, a energia avança na direção axial do tubo a uma velocidade consideravelmente mais baixa, que é determinada pelo peso e diâmetro da hélice. Esta estrutura produz as chamadas ondas lentas, que podem ser então sincronizadas para ter a mesma velocidade do feixe eletrônico, o que permite a interação entre ambos. Esta interação é tal que alguns elétrons no feixe são desacelerados pelo campo de RF e outros, acelerados. Estes elétrons modulados em velocidade, movendo-se através da hélice, passam a interagir com o sinal de RF fornecendo energia DC, o que resulta em grande amplificação do sinal, atingindo-se ganhos maiores que 70 dB. Este circuito proporciona também a obtenção de bandas largas de utilização, sendo o projeto da TWT uma solução de compromisso entre ganho e banda desejados.

As TWTs em sistemas de comunicação por satélite geralmente utilizam a hélice como estrutura de ondas lentas. TWTs com cavidades acopladas, que apresentam maior potência, são usadas no entanto em sistemas de radiodifusão de TV por satélite.

A Figura 3 apresenta curvas típicas para a potência de saída e fase em função da potência de entrada de TWT. A variação de fase ocorre devido à dependência do comprimento elétrico da TWT com a velocidade do feixe, que varia com a potência de entrada.

A operação da TWT fora da região linear de suas características provoca distorções, tanto em fase como em amplitude, ocasionando o aparecimento de produtos de intermodulação, conversão AM/PM, etc; a análise matemática destas distorções pode ser encontrada em Hecken e Heide (1980) e Lenz (1981). Para operar na região não-linear, é preciso compensar estas distorções com métodos de linearização, como se verá a seguir.

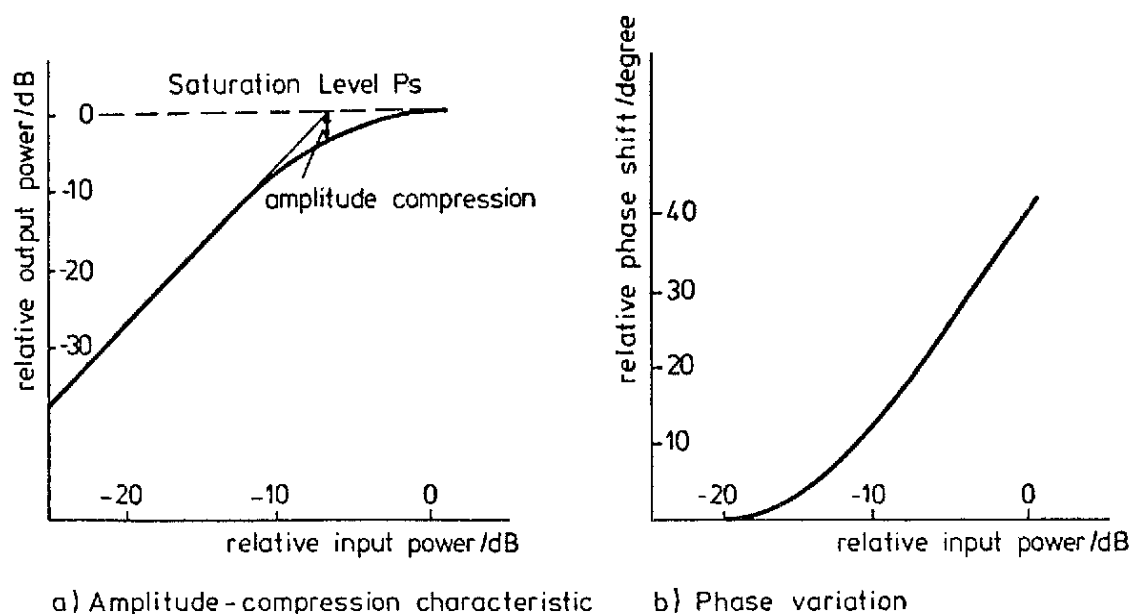


Fig. 3 - Características da TWT: a) compressão de amplitude, b) variação de fase.

FONTE: Lenz (1981).

Fase e amplitude variam também com a frequência, principalmente nas TWTs com cavidades acopladas, exigindo, de acordo com a aplicação, o uso de equalizadores.

3 - MÉTODOS DE LINEARIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE

Wolti et alii (1980) historia a aplicação de linearizadores em sistemas de comunicação por satélite, cujos estudos começaram em 1969. As tentativas vão desde o uso de métodos tradicionais de linearização, como por realimentação e predistorção, até outras opções que exploram o fato de se ter uma multiplicidade de cadeias e amplificadores, e a linearização é feita através de matrizes auxiliares. No entanto, só recentemente conseguiu-se chegar a circuitos simples o suficiente para tornar atrativo o uso de linearizadores em sistemas de comunicação por satélite. Um destes circuitos foi desenvolvido por Bremenson e Jaubert (1974) da Thonson-CSF, contando mais tarde com a colaboração da COMSAT,

e é apresentado na Figura 4. Nele a não-linearidade é gerada por um par de diodos que funcionam como expensor e tem seu funcionamento discutido por Bremenson e Jaubert (1974).

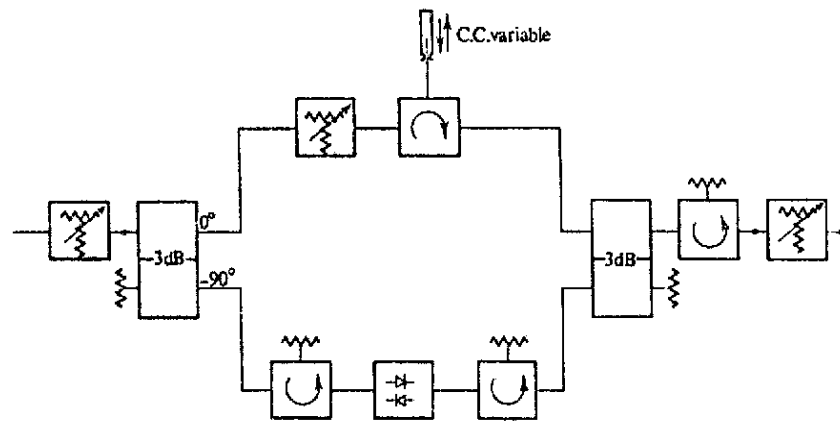


Fig. 4 - Linearizador da Thomson-CSF.

FONTE: Bremenson and Jaubert (1974).

A operação do circuito é representada na Figura 5.

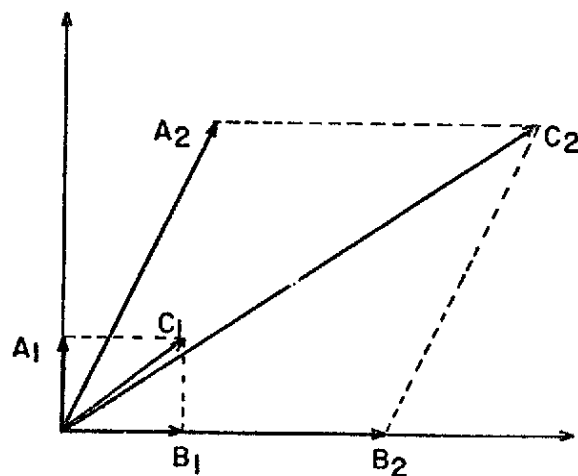


Fig. 5 - Diagrama de operação.

Na Figura 5 o sinal na entrada é dividido por um acoplador de 3 dB (90°), gerando A e B que, combinados por outro acoplador de 3 dB (180°), geram C. A situação para sinais de baixo nível é representada por A_1 , B_1 , C_1 . À medida que aumenta a potência de entrada ocorre um deslocamento para A_2 e B_2 , produzindo um C_2 maior e defasado.

Variações tecnológicas deste mesmo circuito básico foram também desenvolvidas pela KDD, Satoh et alii (1980), o qual utiliza, em uma destas opções, amplificadores a FET como elemento não-linear dos diodos, conforme a Figura 6.

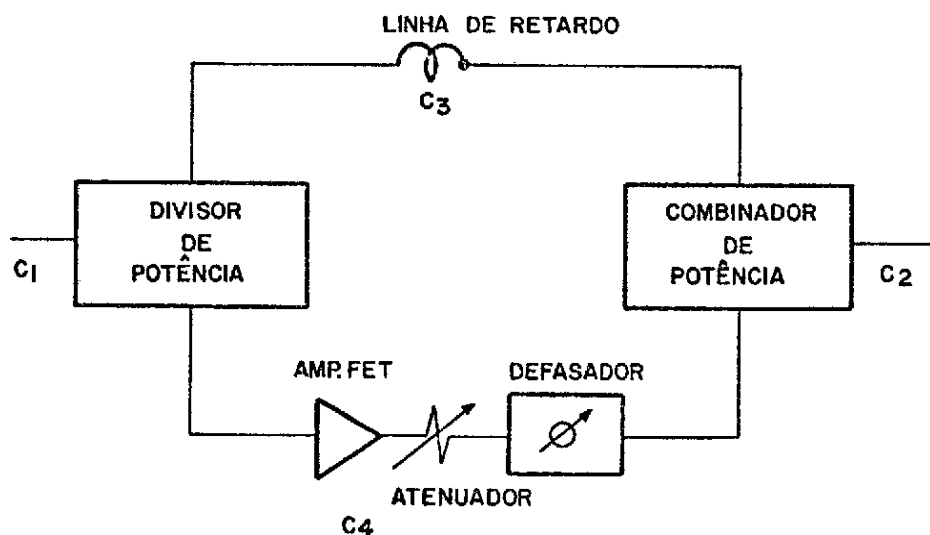


Fig. 6 - Linearizadores a FET (KDD).

A teoria de operação deste circuito é mostrada na Figura 7.

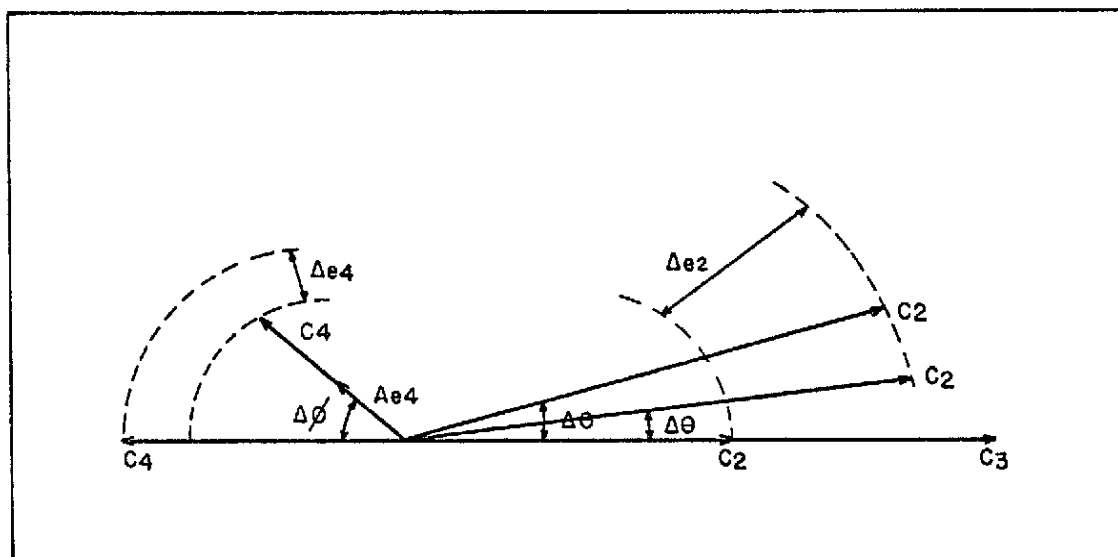


Fig. 7 - Diagrama de operação.

Este circuito gera uma predistorção, pela combinação do sinal do amplificador a FET, operando na região não-linear (ramo 2), com a componente linear do ramo 1. Quando o sinal de entrada é pequeno, o FET opera na região linear e $e_3 = e_4 = e_1 = \text{cte}$. No entanto quando e_1 cresce, o FET passa a operar na região não-linear e e_4 muda para e_4' , com uma redução de amplitude Δe_4 e uma defasagem $-\Delta\theta$, aumentando o sinal na saída e_2 defasando-o de $+\Delta\theta$. Gera-se deste modo a não-linearidade inversa a da TWT. A característica da não-linearidade gerada em e_2 é determinada pelas condições de combinação de e_3 e e_4 , controladas pelo defasador e pelo atenuador, e pela não-linearidade do amplificador a FET.

4 - LINEARIZADORES EM SISTEMAS FDMA E TDMA

O uso de linearizadores em sistemas de comunicação por satélite FDMA foi testado por Gray e Alstyne (1980), que concluíram o seguinte:

- É possível conseguir um crescimento de aproximadamente 3 dB na potência de RF da TWT com a adição de um linearizador, admitindo-se que a relação entre a potência do sinal e a potência da intermodulação (C/I) mantêm-se constante. Ou, se for preferível, pode-se obter um crescimento de 6 dB em C/I mantendo-se constante a

potência de saída. Supõe-se um recuo ("back off") de saída de pelo menos 3 dB.

- Uma redução de consumo de potência DC de 40% pode ser alcançada pela adição de um linearizador e redução da corrente de feixe, assumindo-se que a potência de saída e o C/I permanecem constantes.
- Obtém-se uma melhora na interferência entre canais adjacentes.
- Os espúrios fora da banda podem necessitar filtragem.

Os testes mostraram também que, em virtude das variações de ganho e fase com a frequência na TWT, o ajuste ótimo do linearizador é muito sensível a uma configuração específica da portadora.

Para sistemas TDMA, Satoh e Mezirie (1981) acrescentaram um limitador ao circuito, conforme a Figura 8.

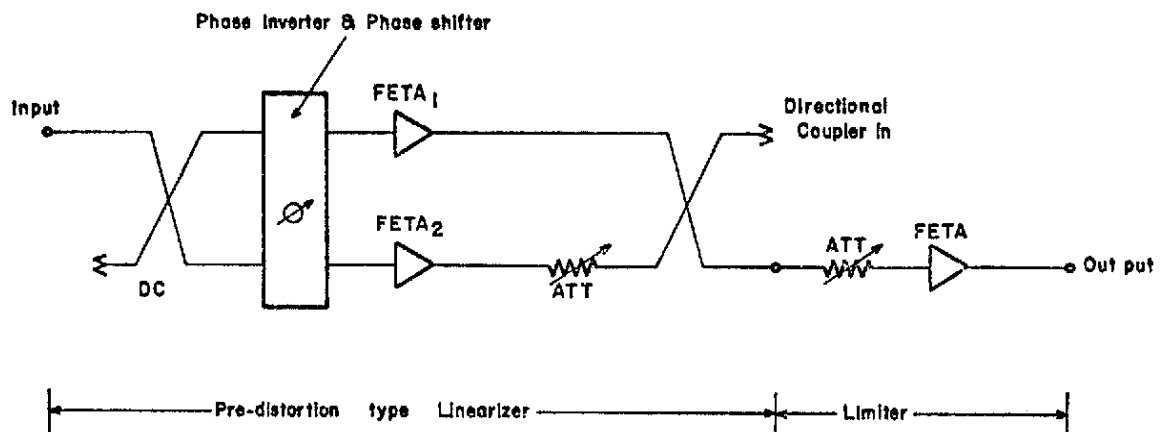


Fig. 8 - Linearizador para TDMA.

FONTE: Satoh and Mezirie (1981).

Desse modo, a característica do conjunto TWT linearizador tomou a forma representada na Figura 9.

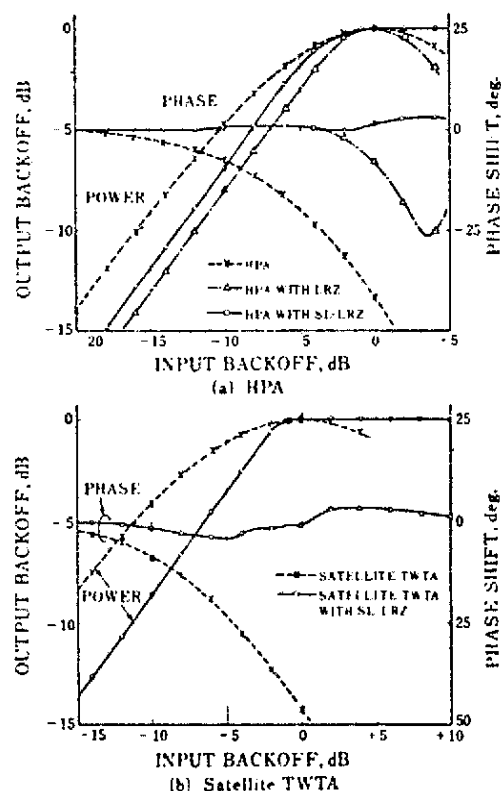


Fig. 9 - Características da TWT com o linearizador:
a) na estação terrena; b) no satélite.

FONTE: Satoh and Mezirie (1981).

Consegue-se assim uma melhora sensível na taxa de erro por bit, podendo-se aproximar o ponto de operação de 2 a 3 dB do ponto de saturação, sem afetar a performance do sistema.

A Figura 10 apresenta algumas curvas que mostram a melhora no produto de intermodulação e no BER (Bite Error Rate), com o uso de linearizadores.

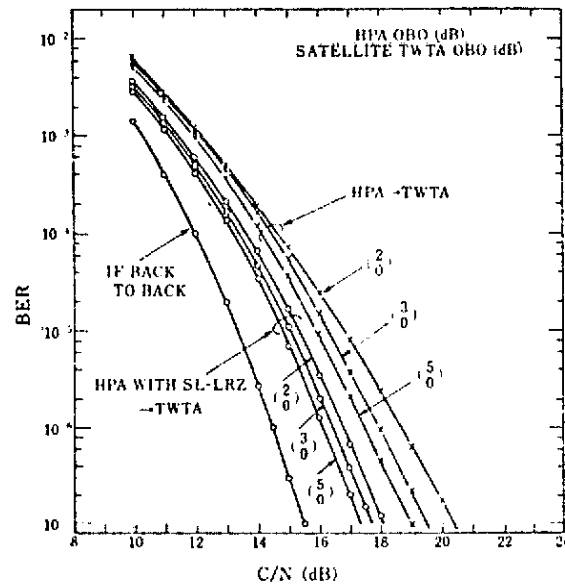


Fig. 6 BER Performance Operated through
INTELSAT V Satellite Simulator

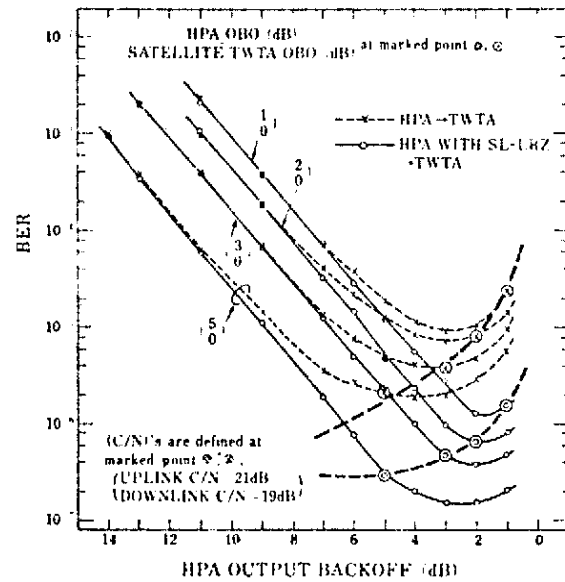


Fig. 10 - Performance with a linearizer:
a) C/N; b) recuo ("back off").

FONTE: Satoh and Mezirie (1981).

5 - CIRCUITO DE TESTE

De modo a verificar o funcionamento do circuito proposto para o linearizador e identificar os pontos críticos de projeto, foi simulado no laboratório da ESTEC o circuito representado na Figura 11.

A frequência de operação (12 GHz) é escolhida na banda das TWT do ECS, satélite de comunicações da ESA. Os amplificadores a FET utilizados são da Plessey e estão descritos em ESA (1974).

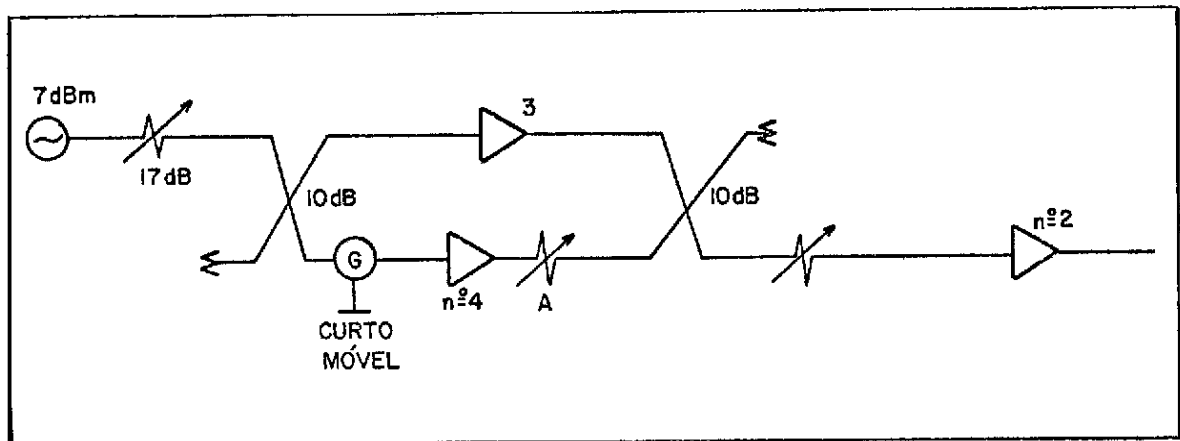


Fig. 11 - Circuito de teste.

A TWT foi simulada pelo amplificador n° 2, cujas características de amplitude e fase são apresentadas na Figura 12. Os amplificadores de n°s 3 e 4, cujas características são apresentadas nas Figuras 13 e 14, foram dispostos de forma a gerar a não-linearidade inversa do n° 2. Para tanto, escolheu-se o acoplador de 10 dB, de forma que o sinal na região não-linear do amplificador n° 4 correspondesse à região linear do n° 3. Conseguiu-se, assim, a linearização para uma potência de entrada no amplificador n° 2 de 0 a +10 dBm. Esta variação foi controlada pelo atenuador variável (0 - 17 dB) na entrada do circuito. O defasador formado pelo curto móvel e o circulator, juntamente com o atenuador A, serviram para ajustar o sinal, de modo a se obter o ponto de calibração desejado. Fez-se a calibração da posição do curto, verificando-se a po

sição de mínima saída com baixa potência de entrada (-10 dBm), e com o atenuador na posição de máxima saída para máxima potência de entrada (ponto de compressão do amplificador nº 2).

Testou-se a operação deste circuito, verificando-se principalmente a compensação em fase. Identificaram-se como pontos críticos a serem levados em consideração quando do projeto definitivo os seguintes:

- As características de amplitude e fase dos amplificadores a FET devem ser capazes de gerar a não-linearidade inversa da TWT.
- No caso de operação TDMA, o amplificador usado como limitador não deve introduzir não-linearidades.
- Deve haver coerência de fase entre os dois ramos.
- O curto móvel do defasador deve ser muito sensível.

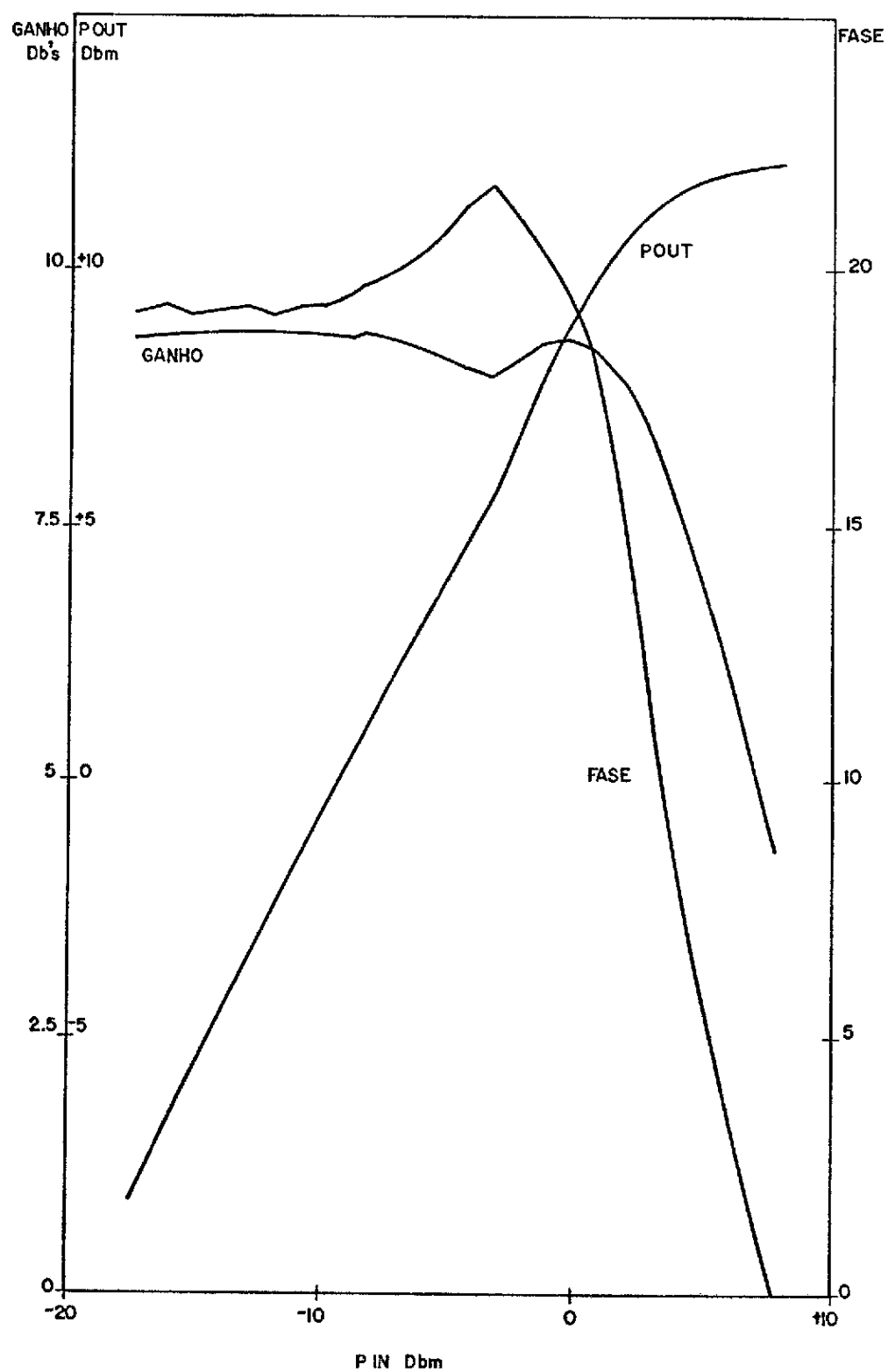


Fig. 12 - Amplificador a FET nº 2.

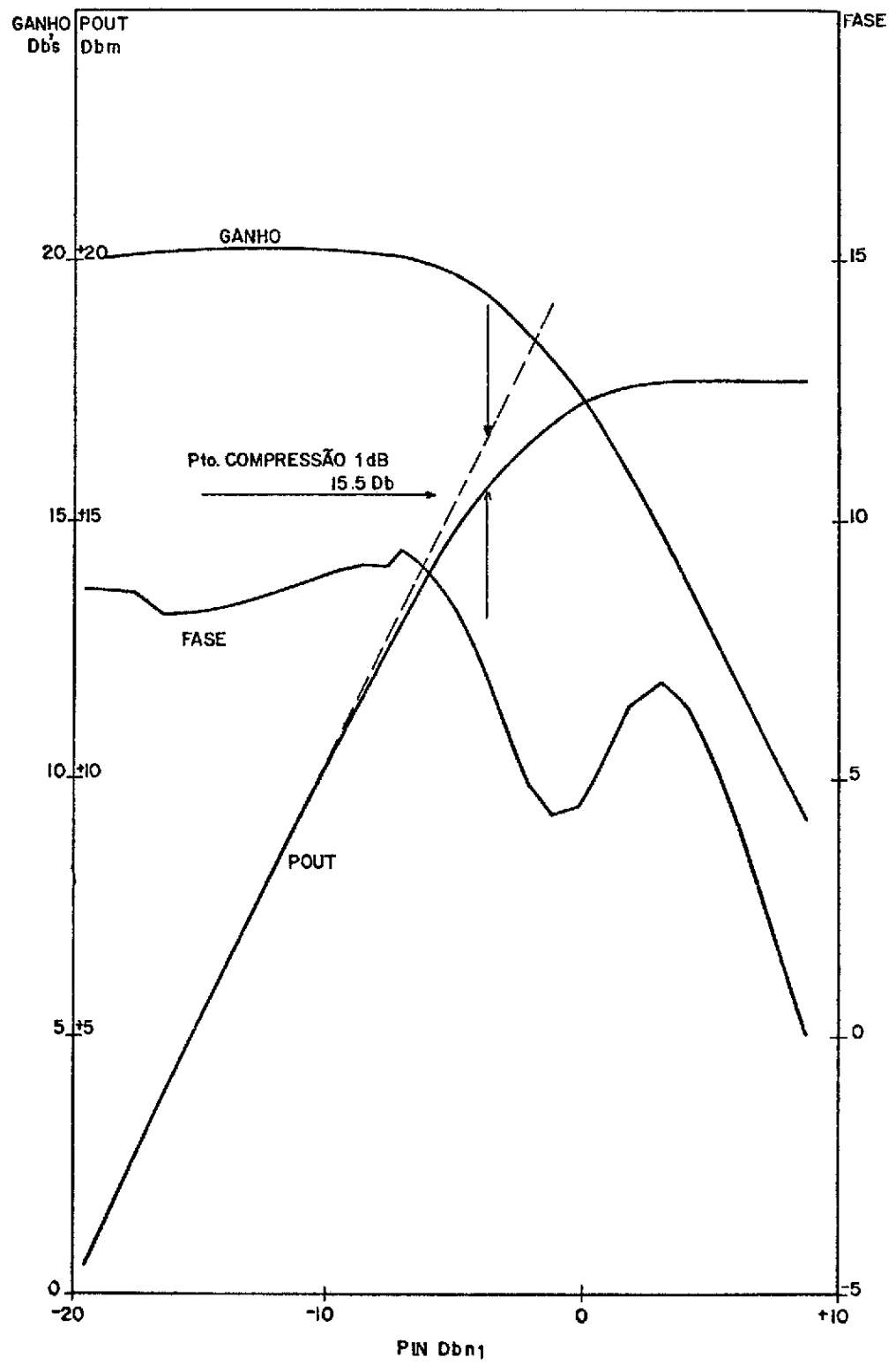


Fig. 13 - Amplificador a FET nº 3.

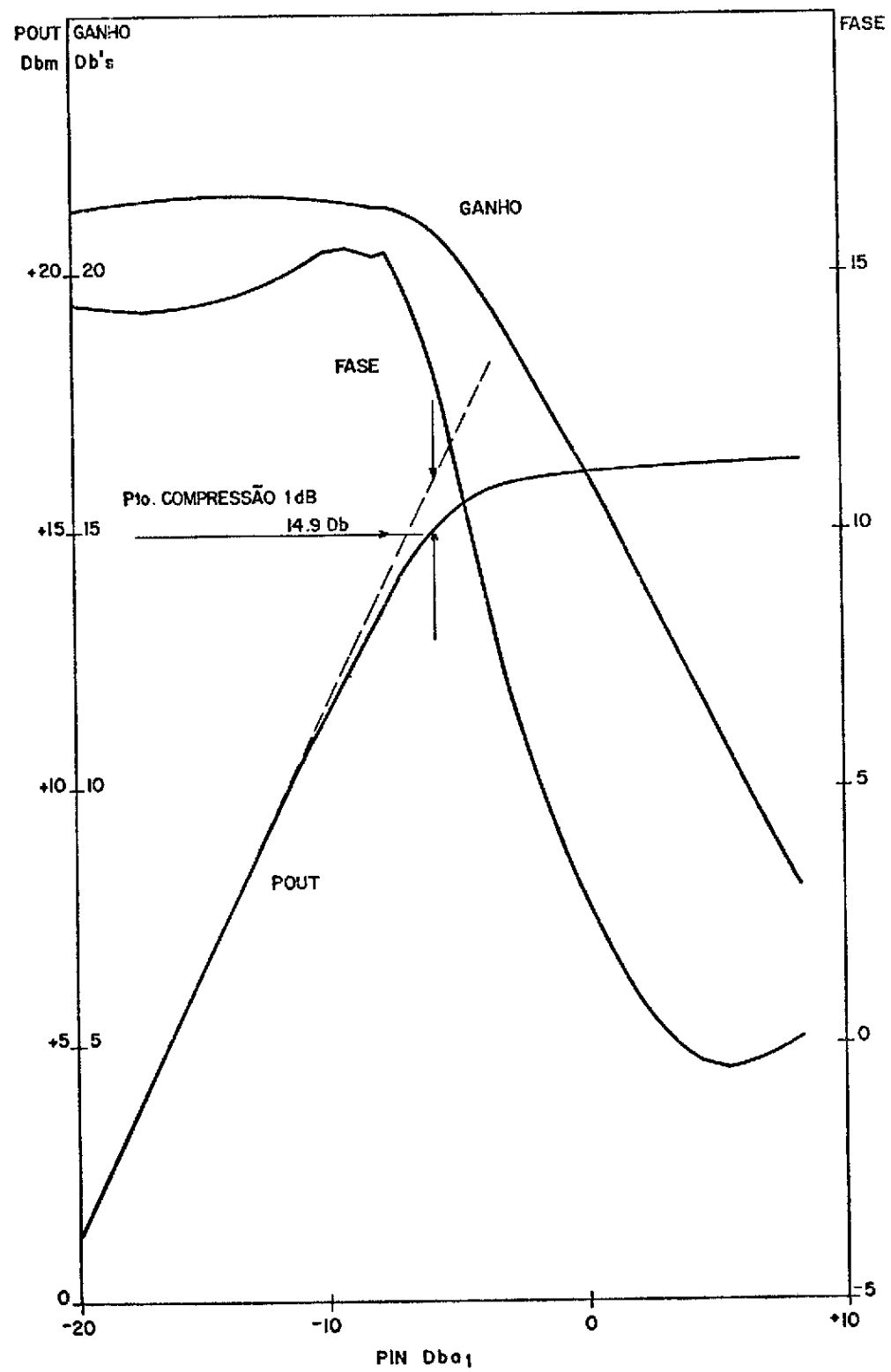


Fig. 14 - Amplificador a FET nº 4.

6 - CONCLUSÕES

Levantou-se o estado atual de construção e utilização de linearizadores em sistemas de comunicações por satélite. Dos dados apresentados, pode-se afirmar que o uso de linearizadores apresenta vantagens em duas situações:

- para estender a capacidade de tráfego do sistema ou relaxar seu controle de potência, sem alterar a performance; e
- para diminuir o consumo de potência DC pela TWT.

Verifica-se também que o linearizador seguido de limitador produz melhoras sensíveis na taxa de erro por bit em sistemas TDMA.

Analisaram-se os circuitos propostos atualmente para linearizadores, simulando-se em laboratório uma das opções e levantando-se os pontos críticos de projeto. Os esforços de pesquisa devem se dirigir agora no sentido de encontrar uma forma simples de realização deste circuito, que propicie ajuste fácil da configuração de portadoras no caso FDMA.

O uso de linearizadores para TWT em estações terrenas oferece vantagens e está sendo adotado pelas estações do INTELSAT. O emprego de linearizadores no satélite envolve a construção de um linearizador de fácil ajuste remoto.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BREMENSON, C.; JAUBERT, P. Réseau lineariseur pour tube à onde progressive. *Revue Technique Thomson-CSF*, 6(2):529-548, June 1974.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *GaAs FET driver amplifier*, final report Caswell, Plessey, 1974.
- GRAY, L.F.; ALSTYNE, J. VAN Application of broadband linearizers to satellite earth stations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, Seattle, WA, 1980. *Conference Record*. New York, IEEE, 1980, v.2, p. 33.5.1-33.5.2.
- HECKEN, R.P.; HEIDE, R.C. Predistortion of the AR6A transmitter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, Seattle, WA, 1980. *Conference Record*. New York, IEEE, 1980, v. 2, p. 33.1.1-33.1.6.
- LENZ, S. Linearization of radio-relay transmitters by a predistortion up converter. In: EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE, 11, Amsterdam, 1981. *Conference Proceedings*, Kent, Microwave Exhibitions, 1981, p. 209-214.
- SATOH, G.; MEZIRIE, T. Nonlinear satellite channel design for QPSK/TDMA transmission. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION DIGITAL SATELLITE. Mar. 1981.
- _____; SHIBAZAKI, H.; ASAI, T.; KUROKAWA, T. A linearizer of satellite communications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, Seattle, WA, 1980. *Conference Record*, New York, IEEE, 1980, v. 2; p. 33.3.1-33.3.2.
- WELTI, G.R.; SANDRIN, W.A.; NEYER, R. Application of predistortion linearization to satellite transponders. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION, Seattle, WA, 1980. *Conference Record*, New York, IEEE, 1980, v. 2, p. 33.5.1-33.5.2.