

BR 770J088



ELETRÔMETROS

Eutiquio López Puente

INFORMAÇÃO IEA 52
CIEN 1

AGOSTO/1976

ELETRÔMETROS

Eutíquio López Puente

COORDENADORIA DE INSTRUMENTAÇÃO E ELETRÔNICA NUCLEAR
(CIEN)

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM MARÇO/1976

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL**

ELETRÔMETROS

Eutiquio López Puente*

RESUMO

Este trabalho visa a apresentar um estudo sobre "o projeto de eletrômetros", abordando os seguintes itens, considerados de importância para uma compreensão básica do assunto:

(i) Introdução à teoria de eletrômetros, constando da conceituação e noções iniciais sobre eletrômetros em geral, usando-se para isso o modelo do picoamperímetro com realimentação que estudemos;

(ii) O projeto do eletrômetro;

(iii) Problemas de ordem prática na construção de eletrômetros relativos às medidas, com sugestões para soluções;

(iv) Apresentação do projeto desenvolvido em laboratório;

(v) Observações importantes que permitem concluir as considerações reais de construção dos eletrômetros para medidas por exemplo em faixas de correntes baixíssimas

Sendo um trabalho de caráter prático, reduzimos ao máximo todas as fases do estudo teórico, preocupados que estamos em abordar os problemas do projeto e a construção de eletrômetros

INTRODUÇÃO

O eletrômetro é um circuito destinado a realizar medidas D. C., a saber: tensões D. C. baixíssimas, como por exemplo a medida da tensão sobre capacitores, da ordem de picofarads, sem descarga significativa, ou a medida do potencial de cristais piezelétricos etc.; correntes D. C. baixíssimas (é possível detectar-se até 10^{-17} A); resistências altíssimas (é possível medir-se acima de 10^{15} Ohms) Também como medidor de carga, o eletrômetro pode ser usado para medir cargas muito baixas, da ordem de 10^{-16} C.

Em conseqüência, podemos adiantar, desde já que a impedância de entrada de um eletrômetro é muito elevada, típica, da ordem de 10^{14} Ohms e que, portanto, a corrente de "offset" de entrada é muito baixa ($5 \cdot 10^{-12}$ A, exemplificando). Essa corrente de "offset" de entrada é a corrente que flui pela entrada do amplificador, quando sua saída esta em zero Volts.

Como um detector de corrente, o eletrômetro é capaz de monitorar níveis muito baixos, limitados somente pela estabilidade da corrente de "offset" de entrada do amplificador.

Comecemos com a utilização de módulos de amplificadores operacionais indicados para possibilitar a construção de eletrômetros: são circuitos integrados monolíticos com FET (transistor de efeito de campo) na entrada, e a seguir, um amplificador linear. Esse tipo de dispositivo possui altíssima impedância de entrada e uma corrente de "offset" de entrada baixíssima, o ruído é muito baixo, a relação de rejeição em modo comum é típica, o ganho de malha aberta varia muito, de operacional para operacional.

Para fixarmos melhor as idéias dos parâmetros característicos desse tipo de amplificador operacional, vejamos a tabela abaixo, do módulo 42 K da Analog Devices:

*: Coordenador de Instrumentação e Eletrônica Nuclear - Instituto de Energia Atômica - São Paulo - Brasil

GANHO EM MALHA ABERTA	10^6 (c/carga de 10 K Ω)
TENSÃO DE "OFFSET" DE ENTRADA	$\pm 2\text{mV}$
VARIAÇÃO DA TENSÃO DE "OFFSET" DE ENTRADA COM A TEMPERATURA	$\pm 15\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE ENTRADA	$- 100\ \text{fA}$ (25 $^\circ\text{C}$) $- 4\ \text{pA}$ (70 $^\circ\text{C}$)
IMPEDÂNCIA DE ENTRADA	$10^{11}\ \Omega$ / 3 pF
RUÍDO NA ENTRADA	8 μV (5 Hz a 50KHz)
ALIMENTAÇÃO	\pm (12 a 18 V) Típica \pm (15 Volts)
RELAÇÃO DE REJEIÇÃO EM MODO COMUM	66 dB
FAIXA DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	0 a 70 $^\circ\text{C}$

O PROJETO DO PICOAMPERÍMETRO.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como se viu no capítulo anterior, o uso de um amplificador operacional com FET na entrada garante as características desejadas de alta impedância de entrada e baixa corrente de "offset" de entrada para o eletrômetro.

Na figura 1, vê-se um bloco representando um amplificador operacional. A tensão de saída é $e_o = -A(e_2 - e_1)$, onde A é o ganho do amplificador, muito elevado, em geral maior do que 10^4 .

Especificamente, para os picoamperímetros, existem 2 modelos importantes: o picoamperímetro tipo "shunt" e o picoamperímetro com realimentação.

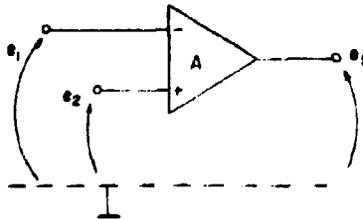


Figura 1

As figuras 2 e 3 mostram seus esquemas, respectivamente:

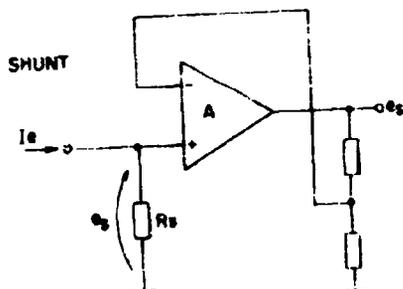


Figura 2

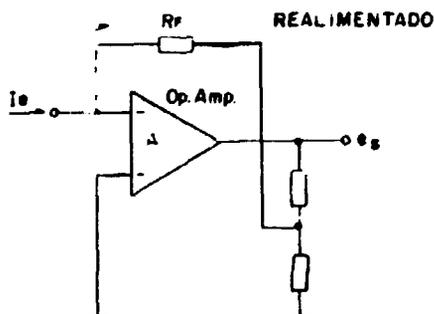


Figura 3

Considerando o esquema da figura 3, a corrente de entrada I_e não pode fluir pelo amplificador operacional, dado que ele possui uma altíssima impedância de entrada e uma ultra-baixa corrente de "offset" de entrada. Dessa forma, quase toda a corrente de entrada I_e flui por R_f , desde que R_f seja menor do que a impedância de entrada. A queda de tensão através de R_f é $R_f \cdot I_e$, então, a tensão de saída e_s sobre R_f é proporcional à corrente de entrada I_e .

Em virtude do melhor comportamento do picoamperímetro realimentado quanto ao tempo de resposta e impedância de entrada, para a maioria das aplicações, será esse o modelo escolhido para o nosso projeto.

Então, conforme se vê na figura 4, para o amplificador realimentado, a capacitância de entrada do dispositivo é dada por $(C_p // A \cdot C_f)$, onde C_p é a capacitância parasita na entrada, A é o ganho do

amplificador em malha aberta, que é muito alto e A . C_F é a capacitância de realimentação refletida na entrada, ou seja $C_e = (C_p / A) \cdot C_F = C_p + A \cdot C_F \cong A \cdot C_F$. Por outro lado, a resistência de entrada $R_e = Z_e / R_F/A \cong R_F/A$.

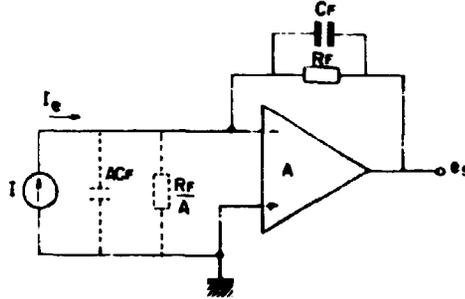


Figura 4

O resultado é que a medida do tempo de subida não é função da constante de tempo $R_e \cdot C_e$, mas depende da resistência de realimentação R_F e do capacitor C_F em paralelo. Portanto, $\tau = R_F/A$. $AC_F = R_F \cdot C_F$. Exemplificando, para $R_F = 10^{11}$ Ohms e $C_F = 1$ pF, dá o tempo de subida de 1 segundo.

CÁLCULO DOS CIRCUITOS

Como a especificação era para um picoamperímetro capaz de medir até 10^{-12} A, procuramos um amplificador operacional com impedância de entrada superior a 10^{11} Ohms e corrente de entrada inferior a 1 pA. O módulo escolhido foi o amplificador operacional com FET na entrada e ultra-baixa corrente de entrada, 42 K da Analog Devices, com as seguintes características: impedância de entrada = $10^{13} \Omega / 3$ nF e corrente de polarização de entrada = - 100 fA máx.

Escolheu-se o elo de realimentação formado por $R_F // C_F$, de modo a ter-se 1 Volt de fundo de escala e uma constante de tempo da medida variável entre 2s e 8s. Portanto, temos:

$$V_{\text{fundo de escala}} = R_F \cdot I_{\text{fundo de escala}} \Rightarrow V = R_F \cdot 10 \text{ pA} \Rightarrow 1 = R_F \cdot 10 \cdot 10^{-12} \Rightarrow$$

$$R_F = 10^{11} \text{ Ohms.}$$

Esses resistores ultra-elevados são fabricados pela Victoreen e possuem uma tolerância de 1% de erro.

Sabemos que $\tau_{\text{min}} = R_F \cdot C_{F \text{ min}}$ e $\tau_{\text{max}} = R_F \cdot C_{F \text{ max}}$, daí:

$$2s = 10^{11} C_{F \text{ min}} \Rightarrow C_{F \text{ min}} = 2 \cdot 10^{-11} = 20 \text{ pF e}$$

$$8s = 10^{11} \cdot C_{Fmax} \Rightarrow C_{Fmax} = 8 \cdot 10^{-11} = 80 \text{ pF.}$$

Usamos um capacitor de 10 pF, de poliestirolo, em paralelo com um trimmer (0 a 100 pF), de alta isolamento. Os capacitores devem ser de alta qualidade e com fuga mínima e utilizados muito bem limpos e secos.

POLARIZAÇÃO. DESACOPLAMENTO DAS FONTES. AJUSTE DA TENSÃO "OFFSET" DE ENTRADA.

Escolhemos ± 15 Volts para as fontes de polarização embora o amplificador opere no intervalo ± 12 V a ± 18 V.

$R_1 = R_2 = 33$ Ohms (valor baixo entre as fontes de polarização e as entradas de polarização do amplificador). Ver a figura 10.

$C_{e1} = C_{e2} = 10 \mu\text{F} / 35$ V para desacoplamento das fontes.

$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 47$ KpF em paralelo com C_{e1} e C_{e2} para permitir uma boa filtragem das freqüências mais elevadas.

O potenciômetro indicado para o ajuste da tensão "offset" de entrada no manual de características da A. D. é de 10 K Ω . Usamos um "helipot" de 10 voltas. O valor típico para a tensão "offset" de entrada neste amplificador é da ordem de ± 2 mV

AJUSTE DE ZERO

Usamos um "reed"-relé de alta isolamento (da ordem de 10^{14} Ohms) e uma bobina, para possibilitar o ajuste de zero da tensão "offset". O ajuste de zero poderia ser feito sem o "reed"-relé, bastando para isso abrir a entrada do amplificador (entrada sem sinal) e ajustar pelo potenciômetro, a saída em zero Volts. Ocorre que, quando o amplificador estiver longe do painel de entradas e saídas isso não pode ser feito; assim, preferimos implementar o circuito de zero-medição mostrado na figura 5. A chave CH acionada permite que o "reed"-relé seja energizado pela passagem da corrente I_B pela bobina, o que vai provocar seu fechamento. Dessa forma a corrente de entrada I_E fluirá para o "terra", visto que R_Z é menor do que a resistência de realimentação R_F ($R_F \cong 100 R_Z$), e o ajuste de zero é possível.

É importante que a chave seja de alta isolamento e R_Z de valor mais alto possível.

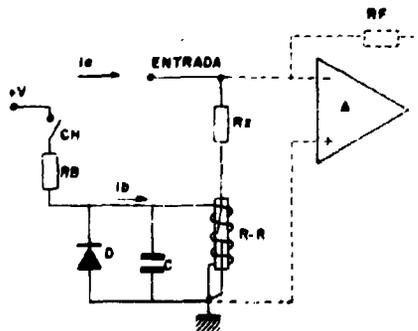


Figura 5

Fez-se o cálculo de R_Z , adotando-se o valor 100 para o ganho de conversão G , o que implica $G = R_F/R_Z = 100$, resultando disso:

$$R_Z = R_F/G = 10^{11}/10^2 \Rightarrow R_Z = 10^9 \text{ Ohms}$$

O diodo D_1 (1N4004) de características $V_F = 1,6$ Volts e $I_F = 1$ Ampère é colocado para evitar picos inversos de corrente. A bobina possui resistência ôhmica aproximada de 50Ω . O capacitor C (470 nF) é para filtrar a tensão da fonte, quando a chave CH for acionada.

Na figura 6 temos o esquema completo do picoamperímetro realimentado que foi construído para medir 10^{-12} A e, cujos resultados foram considerados satisfatórios. Na tabela mostrada na figura 11 encontram-se alguns resultados obtidos no ensaio.

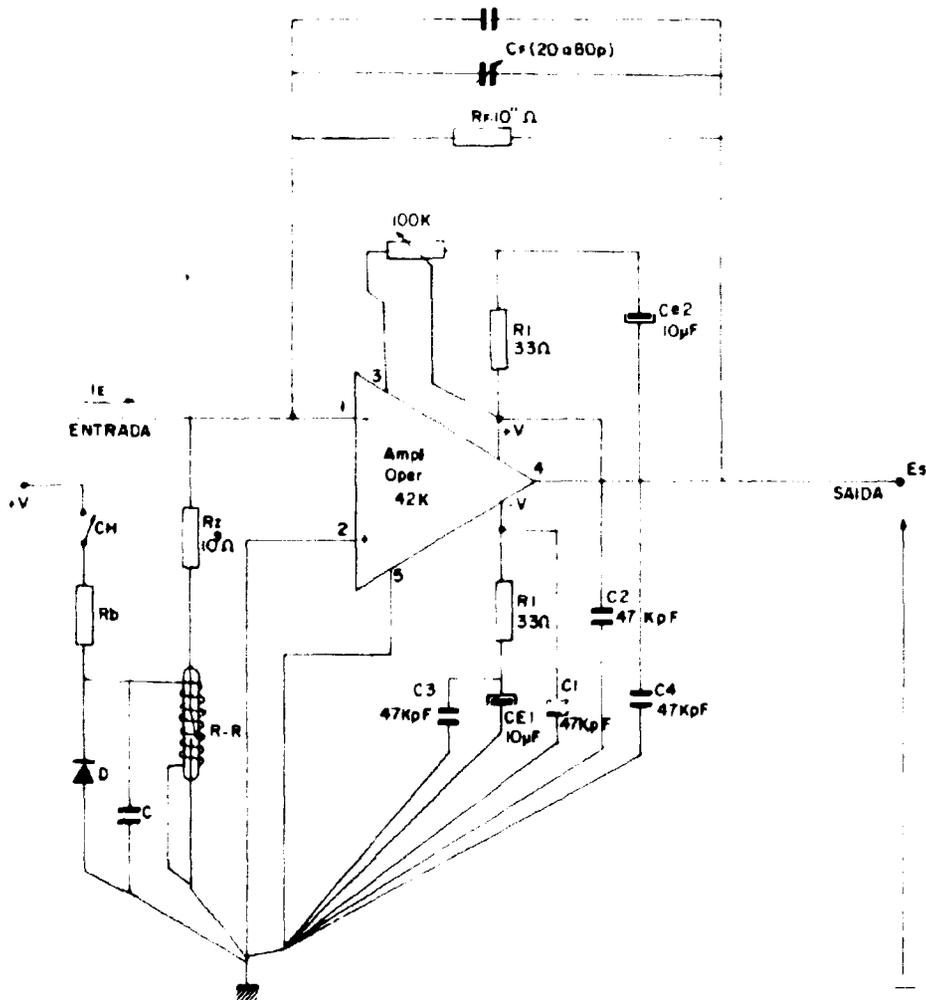


Figura 6

CUIDADOS ESPECIAIS NA MONTAGEM

É muito importante selecionar o material de contacto das entradas condutoras. Vejamos, por exemplo, com uma impedância de 10^{12} Ohms para 15 Volts, tem-se uma corrente de fuga de 15 pA, muito maior do que a corrente de entrada do amplificador (100 fA max). Essa corrente de fuga pode ter sido causada, inadvertidamente, por fuga no soquete do eletrômetro, má qualidade ou imperfeições na placa de circuito impresso. O soquete do eletrômetro deve ser de material bem isolante. Comumente são usados pinos de teflon porque é o material mais indicada quanto aos valores de impedância encontrados nos eletrômetros.

Todos os cuidados que devem ser tomados para evitar problemas com fugas, isolamento, "terras" mal feitas, blindagem, cabos etc., serão mostrados mais adiante, no projeto.

As considerações relativas a guarda a ser feita no circuito impresso do picoamperímetro são as mesmas dos medidores convencionais, somente que com maiores cuidados. Conforme se vê na figura 7, a guarda feita entre as entradas e outros pontos do circuito serve para evitar que possíveis correntes de fuga fluam para o circuito através delas, isolando a entrada de alta impedância do picoamperímetro.

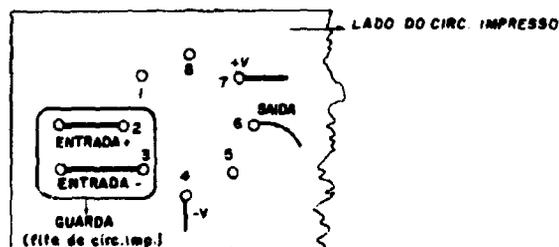


Figura 7

Outro tipo de guarda possível, para exemplificar, é o que fizemos para nosso amplificador operacional 42 K da A. D. Segundo as figuras 8 e 9 onde são mostradas as duas faces do circuito, vemos que a guarda isola as duas entradas e que o fio de sinal para a entrada de alta impedância é em ligação aérea.

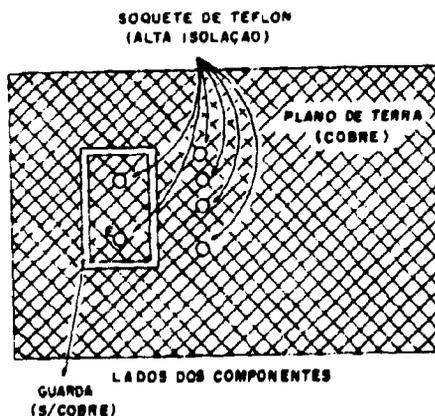


Figura 8

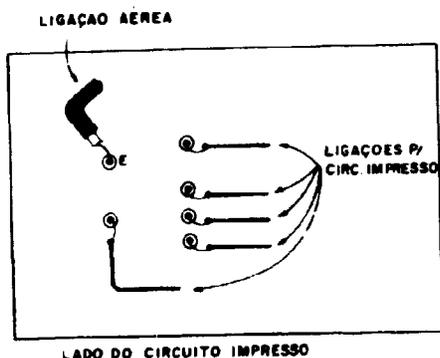


Figura 9

Um outro cuidado a ser tomado na confecção do circuito é o de evitar os chamados "loops de terra", laços ocasionados ao tomar-se a referência de terra em vários pontos, o que pode causar erro nas medidas. Para corrigir-se isso, costuma-se eleger um único ponto de terra para os circuitos, sejam do eletrômetro, do amplificador a seguir e também da blindagem, que é ligado ao plano de terra da placa do circuito impresso.

Os resistores ultra-elevados do elo de realimentação são muito sensíveis a choques mecânicos, poeira, gordura, filmes de água superficiais, oxidação etc., que alteram seu valor. Ao serem usados devem ser perfeitamente limpos com álcool metílico ou água destilada. Após a limpeza é conveniente a secagem por várias horas em atmosfera de baixa umidade.

Recomendam-se conectores e cabos de alta qualidade para minimizar possíveis efeitos de vibração e movimento e para manter a mesma alta isolamento entre a entrada e a saída do picoamperímetro. Um tipo de conector usado freqüentemente é o tipo UHF com isolamento de teflon; os cabos coaxiais devem ter, também, isolamento de teflon ou polietileno.

É importante fazer uma boa blindagem do circuito do picoamperímetro para que o ruído ambiente não interfira na medida das correntes. Consegue-se isso com uma caixa de alumínio ou cobre, bem vedada, como mostra a figura 10.

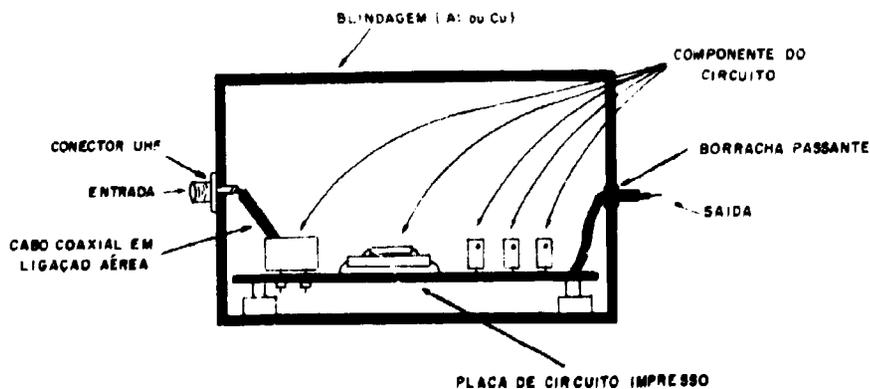


Figura 10

TABELA DE DADOS

	CORRENTE I_0 (A)	TENSÃO e_s (V)	OBSERVAÇÕES
$R_F = 10^{10} \Omega$	10^{-9}	- 10,0	
	10^{-10}	- 1,0	
	10^{-11}	- 0,1	
$R_F = 10^{11} \Omega$	10^{-10}	- 10,0	Este é o resistor mais conveniente devido à faixa de corrente pedida
	10^{-11}	- 1,0	
	10^{-12}	- 0,1	
$R_F = 10^{12} \Omega$	10^{-11}	- 10,0	
	10^{-12}	- 1,0	
	10^{-13}	- 0,1	

CONCLUSÃO

Pode dizer-se que o projeto de um eletrômetro não é, em teoria, muito complexo, ainda mais da forma como foi desenvolvido na Coordenadoria de Instrumentação e Eletrônica Nuclear do Instituto de Energia Atômica, usando-se um amplificador operacional de altíssima impedância de entrada e um resistor de realimentação ultra-elevado. O que é realmente difícil de conseguir, quando a corrente que se deseja medir é da ordem de picoampéres, é uma construção perfeita de "lay-out", o uso de contatos de alta isolamento, o uso de componentes mais precisos e confiáveis.

Conclui-se, portanto que a construção prática do eletrômetro é a parte mais delicada e onde devem ser tomados todos os cuidados mencionados.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to provide important informations about electrometers design, as presented as follow:

(i) *Basic electrometers theory.* Here we attempt a short analysis about electrometers from a general point of view, as an exemple a feedback picoammeter is given.

(ii) *The electrometer design.*

(iii) *Some practical problems related to the electrometers building.*

(iv) A practical example developed at CIEN laboratory.

(v) Some important informations Some results from the above project are examined here, some of them are related to the building and others to ranges, for example, low current ranges.

Because of the practical approach of this work, we limited the information just to the necessary, for the understanding of physical phenomena, reducing the theoretical information.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, Mountain View, Calif. *The linear integrated circuits data catalog*. Mountain View, Calif , Nov 1971.
2. GRAEME, J. G. et alii. *Operational amplifiers: design and applications*. Tokyo, McGraw-Hill-Kogakusha, 1971.
3. KEITHLEY INSTRUMENTS, Cleveland, Ohio. *Electrometer measurements*. Cleveland, Ohio, 1972.
4. MORRISON, R. *Grounding and shielding techniques in instrumentation*. New York, Wiley, 1967.
5. MOTOROLA SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC., Phoenix, Ariz. *The semiconductor data book* 5. ed. Pkoenix, Ariz , Oct 1970.
6. UNDERWOOD, R. K. New design techniques for FET op amps In: NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION, Santa Clara, Calif. *New design operational amplifiers book*. Santa Clara, Calif , Mar. 1972. p. 1-12

