2005 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005
Santos, SP, Brazil, August 28 to September 2, 2005
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
ISBN: 85-99141-01-5

DESENVOLVIMENTO DE PRÉ-AMPLIFICADOR SENSÍVEL À TENSÃO PARA APLICAÇÃO EM SONDA CIRÚRGICA RADIOGUIADA

Fábio Eduardo da Costa, Paulo Roberto Rela e Margarida Mizue Hamada

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
fecosta@ipen.br

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um pré-amplificador sensível à tensão adequado para aplicação em sondas cirúrgicas. Utilizando esta configuração o pré-amplificador pode ser montado parte no interior da sonda e parte na unidade de contagens. Construída desta maneira, a eletrônica incorporada à sonda apresenta poucos componentes, proporcionando a construção de sondas de reduzidas dimensões. O desempenho da sonda, utilizando o pré-amplificador em duas partes, foi avaliado conectando-o a um detector de CsI(Tl) acoplado a um fotodiodo tipo PIN. A sonda, com a largura de 12,7mm e 160mm de comprimento, apresentou uma resolução espacial de 17mm, atendendo as condições exigidas para aplicação como sonda radioguiada.

1. INTRODUÇÃO

A cirurgia radioguiada consiste de uma técnica de marcação de lesões não palpáveis com uma substância radioativa. A afinidade desta com o tecido acometido, permite que ao ser injetado um radioisótopo no paciente, este se concentre no tumor. Este processo permite ao cirurgião localizar e determinar com melhor precisão a quantidade do tecido que deve ser extraído. Um exemplo é a detecção radioguiada do linfonodo sentinela, cuja técnica é usada em carcinomas de pequenos tamanhos nos seios e envolve a localização, remoção e o imediato exame histológico. Especificamente, um radiofármaco com ^{99m}Tc é inoculado na região da lesão no seio ou próximo a ela, e com auxílio de uma sonda cirúrgica radioguiada de pequenas dimensões, as lesões ou os linfonodos sentinelas acometidos são localizados e removidos. Nestes procedimentos cirúrgicos, é solicitado que a sonda possa detectar linfonodos que estão à milímetros uns dos outros [1], requerendo sondas de pequeno diâmetro e alta resolução espacial.

Para atender estes requisitos a sonda deve ser constituída de um conjunto detector e pré-amplificador associado de pequenas dimensões para obter um diâmetro final reduzido com uma resolução energética adequada que somada a um sistema de colimação eficiente obtenha uma resolução espacial alta [2]. A resolução energética é necessária para que a sonda possa rejeitar raios gama originados da dispersão provocada pelo efeito Compton dentro do organismo e portanto evitar contagens indesejadas vindas de direções diferentes do ponto de emissão. Para atingir este objetivo o pré-amplificador deve estar o mais próximo possível do detector e portanto deve apresentar dimensões compatíveis para poder ser incorporado a sonda, além de estabilidade, baixo ruído e ganho suficiente para o detector utilizado. Atualmente não são encontrados no mercado internacional pré-amplificadores nas dimensões exigidas para esta aplicação e os fabricantes de sondas não os disponibilizam para venda. Neste trabalho, foi desenvolvido um pré-amplificador sensível à tensão, que permitiu que

parte do pré-amplificador esteja incorporado a sonda e parte esteja dentro da unidade de contagens. Utilizando esta configuração obteve-se uma sonda com boa resolução energética e com reduzido volume de componentes eletrônicos.

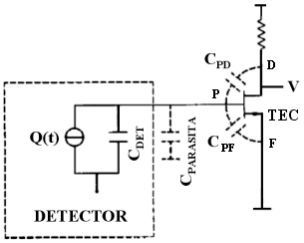
2-PRÉ-AMPLIFICADORES

Os circuitos integrados pré-amplificadores, disponíveis comercialmente, apresentam dimensões elevadas para serem inseridos em sondas e necessitam ainda componentes adicionais para serem utilizados. A Tabela 1 compara as dimensões de alguns dos circuitos integrados utilizados em pré-amplificadores comerciais e a observação destes valores poderia sugerir como mais adequado por seu menor tamanho, o circuito integrado A250F da Amptek. A menor dimensão deste componente é de 12mm e deveria ainda ser acrescida de componentes periféricos que elevariam o diâmetro interno da sonda a cerca de 15mm. Esta dimensão não atendia às necessidades, uma vez que o objetivo deste trabalho limitava a sonda em 12,7mm de diâmetro externo. Este valor escolhido é justificado pela facilidade de encontrar um tubo metálico nestas dimensões e de estar desenvolvendo uma sonda com dimensões próximas as melhores comercialmente disponíveis, que estão entre 10 e 14mm de diâmetro.

Tabela 1- Quadro comparativo das dimensões de circuitos integrados utilizados em pré-amplificadores para instrumentação nuclear.

Modelo	**Fabricante**	**Dimensões (mm)**
CS AMP-2	Soshin	22x42
CS520	Clear Pulse	18x42
H4083	Hamamatsu	21x24
A250F	Amptek	12x16

Com a impossibilidade de obter pré-amplificadores comerciais de dimensões reduzidas foi desenvolvido uma eletrônica que permitiu que o pré-amplificador fosse construído em duas partes; uma dentro da sonda e o restante na unidade de contagens. Esta configuração utilizou um pré-amplificador sensível a tensão e não sensível a carga como é usado na maioria da instrumentação nuclear. O pré-amplificador construído como na Figura 1, apresenta um ganho de conversão de tensão (V) para as cargas coletadas no detector (Q) que é dependente da capacidade do detector, da capacidade distribuída no transistor de efeito de campo entre porta e fonte (C_{PF}) e da capacidade parasita do acoplamento até o detector ($C_{PARASITA}$) [3]. O sinal negativo é proveniente da inversão de fase que o transistor promove no sinal quando a saída é pelo dreno.

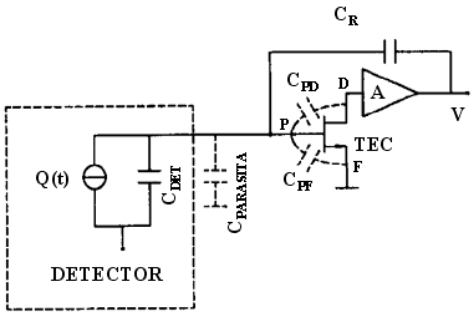


$$-V\alpha\frac{Q}{C_{DET}+C_{PF}+C_{PARASITA}}$$

Figura 1- Pré-amplificador sensível à tensão em um esquema elétrico simplificado. Figura modificada de Bertuccio [3].

A análise original deste pré-amplificador por Bertuccio [3] foi feita com a saída do sinal pela fonte do transistor. Neste trabalho foi escolhido a saída de sinal pelo dreno que proporciona um maior ganho e uma menor interferência dos parâmetros do cabo de acoplamento entre sonda e unidade de contagens [4]. O pré-amplificador sensível à tensão tem o ganho mais dependente das tensões de polarização do transistor e da tensão de polarização do detector, mesmo que este esteja acoplado capacitivamente. Na construção de uma sonda radioguiada tanto a polarização do transistor como a polarização do detector não são alteradas em nenhuma circunstância e portanto não é afetado por problemas de variações de tensão.

O comprometimento do pré-amplificador sensível à tensão fica restrito a um menor ganho de conversão quando comparado ao amplificador sensível à carga, Figura 2, cujo ganho de conversão só depende do capacitor de realimentação (C_R), o que torna o ganho do conjunto mais elevado para o mesmo nível de ruído.



$$V=\frac{Q}{C_R}$$

Figura 2- Pré-amplificador sensível a carga em um esquema elétrico simplificado. Figura modificada de Bertuccio [3].

Por outro lado, a configuração sensível à tensão não necessita do capacitor de realimentação (C_R) entre a entrada e a saída, o que possibilita dividir o pré-amplificador nesta região. Esta alternativa não é viável para um amplificador sensível à carga, pois o cabo de conexão introduziria uma capacidade elevada ao circuito, reduzindo o ganho e aumentando o nível de ruído a ponto de inviabilizar o circuito.

3-PARTE EXPERIMENTAL

Na montagem do pré-amplificador procurou-se escolher o transistor de efeito de campo e o amplificador operacional que proporcionassem o menor ruído. Para a entrada do detector foram testados os seguintes transistores de efeito de campo: 2SK152, 2N4416A, 2N4220A e BF245A e para o primeiro amplificador na unidade de contagens, os circuitos integrados constantes na Tabela 1. Estes circuitos integrados pré-amplificadores embora construídos para operarem como sensíveis à carga, foram polarizados como sensíveis à tensão. O ajuste de polarização da porta do transistor de efeito de campo de entrada foi incluída na unidade de contagens e não na própria sonda como seria o convencional. Este recurso permitiu ajustar a polarização deste transistor com a sonda finalizada. A Figura 3 mostra o circuito completo do pré-amplificador inserido dentro da sonda e da parte restante dentro da unidade de contagens. O sinal na saída deste conjunto tem valor suficiente para ser amplificado por uma unidade convencional e ser enviado a um contador ou multicanal. Para as medidas do nível de ruído e resolução energética, o pré-amplificador foi conectado a um conjunto detector constituído por um cristal de CsI(Tl) cúbico de 5mm de aresta acoplado com graxa de silicone a um fotodiodo tipo PIN modelo S5106 da Hamamatsu, com 32V negativos de polarização. A resolução espacial foi medida utilizando duas fontes de ^{99m}Tc separadas 25mm uma da outra, isoladas da sonda por uma placa de plástico de 10mm de espessura para simular um meio de dispersão.

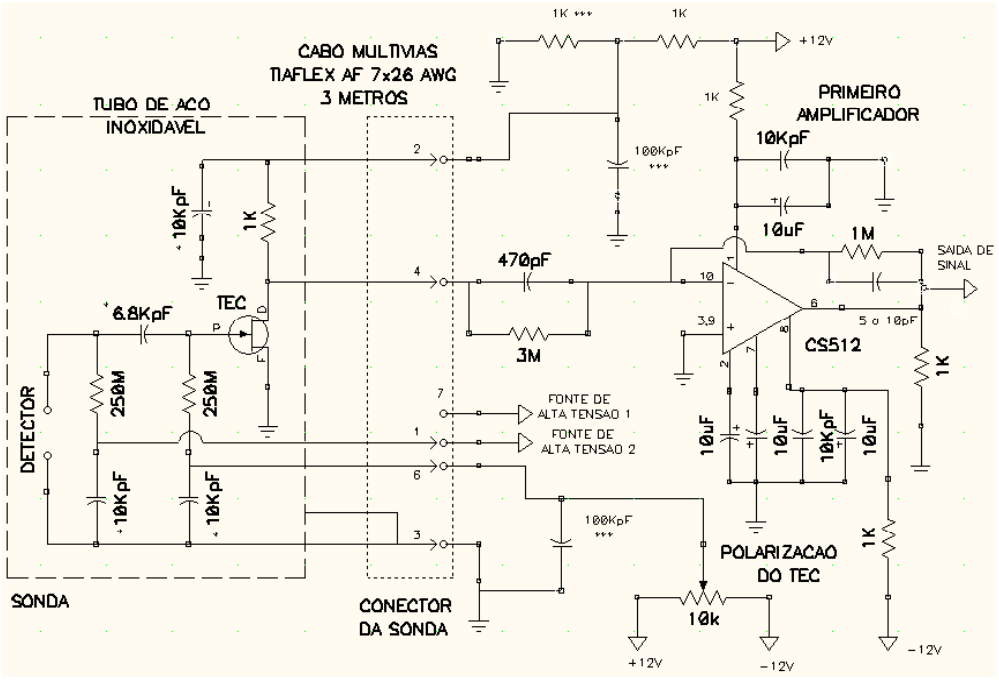


Figura 3- Esquema completo do circuito pré-amplificador dentro da sonda e seu estágio complementar na unidade de contagens. A conexão à duas fontes de alta tensão distintas é para permitir a utilização de sondas com detectores diferentes.

4-RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, é mostrado o pré-amplificador desenvolvido neste trabalho conectado ao conjunto detector pronto para ser inserido no tubo de revestimento que constitui a sonda. Foram mostrados também nesta figura os quatro modelos de pré-amplificadores citados na

Tabela 1 para comparação em tamanho com o pré-amplificador desenvolvido. A montagem e a posterior inserção dentro de um tubo de vidro tornou o conjunto mecanicamente mais robusto e propiciou a desejada isolação elétrica para com as paredes metálicas da sonda. As reduzidas dimensões do conjunto permitiram que a sonda fosse construída com um colimador interno de chumbo que revestiu o detector, com exceção da parte frontal da sonda, que apresenta uma janela de 5mm de diâmetro. As curvas da altura de pulso para cada um dos transistores testados é apresentada na Figura 5, ordenados pelo custo de aquisição no país. Estas curvas estão normalizadas no ganho e no número de contagens para permitir inferir que a curva obtida com o transistor que apresente o *vale* mais profundo (Figura 5) entre ruído e o fotopico seja a do transistor de menor ruído eletrônico. Na Figura 5 também estão incluídos os resultados de resolução energética percentual obtida com cada um dos transistores testados. Como pode ser observado nesta figura, a elevação do custo de aquisição destes transistores coincidiu com a redução do nível de ruído total do conjunto. Os ensaios para escolha do transistor de efeito de campo com o objetivo de minimizar o ruído do conjunto mostrou que embora os melhores resultados tenham sido obtidos com o 2SK152, o decréscimo em resolução energética final do conjunto não é maior que 10% para os demais transistores, o que viabiliza a utilização de qualquer um dos transistores sem comprometer as qualidades finais da sonda. Para os pré-amplificadores comerciais testados como primeiro amplificador (Figura 3) não observou-se diferenças no nível de ruído. O transistor de efeito de campo na sonda apresenta um sinal na saída com baixa impedância, o que permitiu a utilização de 3 metros de cabo para conexão até a unidade de contagens sem perdas perceptíveis, tornando a sonda adequada para utilização em uma intervenção cirúrgica.

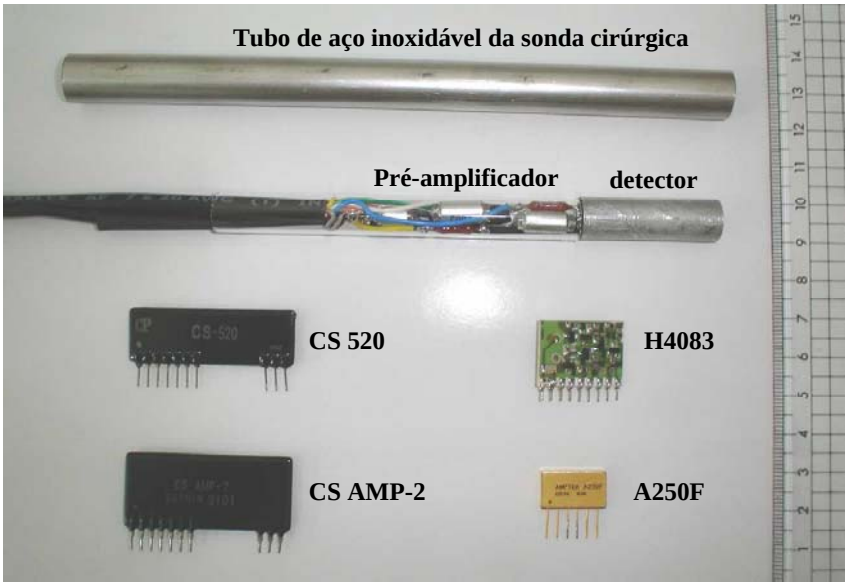


Figura 4 –Pré-amplificador sensível á tensão montado no tubo de vidro e conectado ao conjunto detector e o tubo de aço inoxidável que reveste a sonda; a foto permite ainda comparar as dimensões do conjunto desenvolvido com os circuitos integrados pré-amplificadores comerciais.

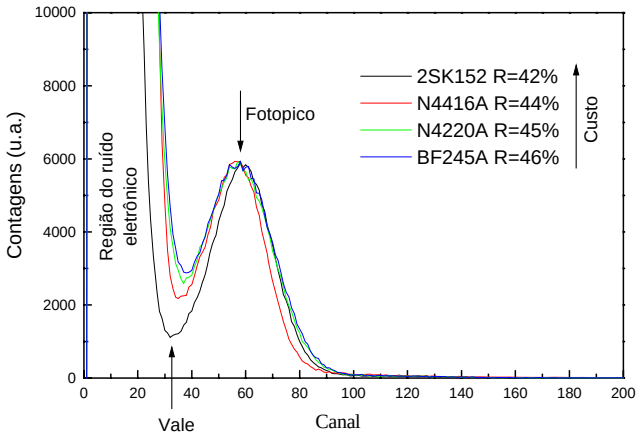


Figura 5 – Quadro comparativo dos quatro modelos de transistores testados no pré-amplificador dividido, utilizando detector de CsI(Tl) com fotodiodo e fonte de Co^{57} (122keV); R é a resolução energética percentual em 122keV obtida com cada transistor testado.

Para efeito de comparação com um amplificador sensível á carga convencional, a resolução em energia foi medida tendo como referência o pré-amplificador A250F da Amptek, que apresenta o menor ruído entre os comerciais quando polarizado como sensível a carga. A Tabela 2 apresenta os resultados desta comparação. Os resultados mostraram que a perda em resolução é aceitável para a utilização, não comprometendo o desempenho da sonda. O ganho de conversão foi de 50mV/MeV com o BF245A a 110mV/MeV com o 2SK152. Um pré-amplificador sensível à carga comercial com o conjunto detector utilizado apresenta cerca de 45mV/MeV. O maior valor do ganho de conversão do pré-amplificador desenvolvido não melhorou o resultado de resolução pois conjuntamente houve um acréscimo no nível de ruído total.

Tabela 2 – Quadro comparativo dos resultados de resolução energética percentual para um pré-amplificador comercial e para o desenvolvido neste trabalho. O transistor utilizado foi o 2SK152.

	Resolução energética percentual		
Pré-amplificador	**122keV**	**51keV**	**662keV**
A250F sensível á carga	38%	13%	11%
Sensível á tensão (parte na sonda e parte no contador)	41%	14%	12%

Com a resolução obtida e a colimação utilizada, a sonda desenvolvida com 160mm de comprimento e 12,7mm de largura, apresentou uma resolução espacial de 17mm que atende às exigências para aplicação como sonda radioguiada para localização de linfonodos sentinela [2].

5-CONCLUSÕES

A utilização do pré-amplificador sensível á tensão permite a redução do conjunto de componentes eletrônicos incorporados à sonda, reduzindo seu volume e atingindo dimensões adequadas para uso na aplicação. O circuito eletrônico desenvolvido não exige um transistor de efeito de campo de excelente qualidade, facilitando as manutenções. A tecnologia desenvolvida propiciou uma redução substancial no custo de uma sonda cirúrgica radioguiada permitindo ser construída inteiramente com componentes disponíveis no mercado.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a CNPq e a FAPESP pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. G. Aras, P. Arican, et al, “Identification of sentinel lymph node in breast cancer by lymphoscintigraphy and surgical gamma probe with peritumoral injection of scintimammographic agent ^{99m}Tc MIBI”, *Annals of Nuclear Medicine*, **Vol. 16**, No.2, pp. 121-126, 2002.

2. M.Kotzassarlidou, M. Hatzipavlidou et al, “Practical considerations in selecting and using intraoperative gamma probes”. *Nucl. Inst. Met. In Physics Research,* **Vol. A 527**, pp. 110-312, 2004.

3. BERTUCCIO, G.; FASOLI, L.; SAMPIETRO, M. Stability of amplification in detectors with integrated electronics, *Nucl. Inst. Met. In Physics Research*, **Vol. A 380**, p. 331-334, 1996.

4. MILLMAN, J.;HALKIAS, C.C. *Eletrônica Dispositivos e Circuitos.* São Paulo, S.P.:McGraw-Hill, 1991.