

# DESENVOLVIMENTO DE UM CONJUNTO ELETRÔNICO PARA MEDIDA DE REATIVIDADE E ANÁLISE DE RUIDO DE REATORES

Claude Emile Strohl\* e Adalberto José Soares\*\*

\*CTMSP- Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cid. Universitária  
CEP: 05508-900, S.Paulo/SP - Brasil

\*\*IPEN-CNEN/SP - Caixa Postal: 11049  
05422-970, S.Paulo/SP - Brasil

## RESUMO

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um condicionador de sinal ou conjunto eletrônico, a ser montado numa placa padrão para IBM-PC, composto por um eletrômetro de alto ganho com isolamento e saídas AC e DC e finalmente um filtro anti-aliasing. Este conjunto juntamente com uma placa de aquisição de dados padrão IBM-PC, serão conectados em slots do PC, de forma que o conjunto sirva para realização tanto de medidas de análise de ruído de reatores como também medidas de reatividade, a partir de detetores tipo câmara de ionização ou SPD's.

## INTRODUÇÃO

Para reatores nucleares de potência operarem de forma segura e eficiente, é necessário que haja uma monitoração constante de sua operação, através de uma instrumentação confiável e precisa.

Os detetores de neutrons constituem importantes elementos da instrumentação de reatores nucleares, sendo utilizados para determinação do nível de potência e da distribuição de potência dentro do núcleo do reator. O sinal gerado pelo detetor, na forma de pulsos, tensão ou corrente, é diretamente proporcional ao número de fissões e portanto ao nível de potência gerada.

O sinal proveniente dos detetores, cujo valor médio é proporcional ao fluxo de neutrons no reator, apresenta flutuações que são conhecidas como ruído neutrônico. A correta avaliação do valor médio do sinal do detetor, bem como de seu ruído associado permitem entre outras coisas, medir de forma eficaz a potência gerada no reator, calcular a reatividade do reator, estimar o grau de subcriticalidade e detectar anomalias dentro do vaso do reator como por exemplo movimentos do barril e possíveis vibrações dos elementos combustíveis.

Para isto é necessária uma investigação das flutuações em torno do valor médio dos sinais provenientes dos detetores, instalados dentro ou fora do núcleo do reator, num processo que denominamos de análise de ruído.[1]

Desta forma foi proposto o desenvolvimento de um condicionador de sinal ou conjunto eletrônico, a ser montado numa placa padrão para IBM-PC, composto por um eletrômetro de alto ganho com isolamento e saídas AC e DC e, finalmente, um filtro anti-aliasing.

Este conjunto, juntamente com uma placa de aquisição de dados padrão IBM-PC, serão conectados em slots do PC, de forma que o conjunto sirva para realização tanto de medidas de análise de ruído de reatores como também medidas de reatividade, a partir de detetores de neutrons tipo câmara de ionização.

Desta forma aproveita-se a plataforma do PC com sua IHM (Interface Homem/Maquina) com 2 objetivos: o primeiro, monitorar o valor médio do sinal do detetor para determinação da potência do reator em medidas de reatividade; e o segundo permitir a análise de ruído propriamente dita graças a utilização de um software aplicativo adequado, responsável por todo o processamento do sinal proveniente da placa de aquisição de dados.

## CONCEITO DE RUIDO NEUTRÔNICO

A fim de melhor compreender o conceito de análise de ruído neutrônico, dividimos os sinais provenientes dos detetores nucleares em 2 componentes: uma componente DC também chamada de componente estacionária ou estática, proporcional ao fluxo neutrônico médio; e uma componente AC também chamada de componente alternada ou dinâmica, superposta ao sinal DC. A componente AC, ilustrada na figura 1 denominamos de ruído neutrônico.

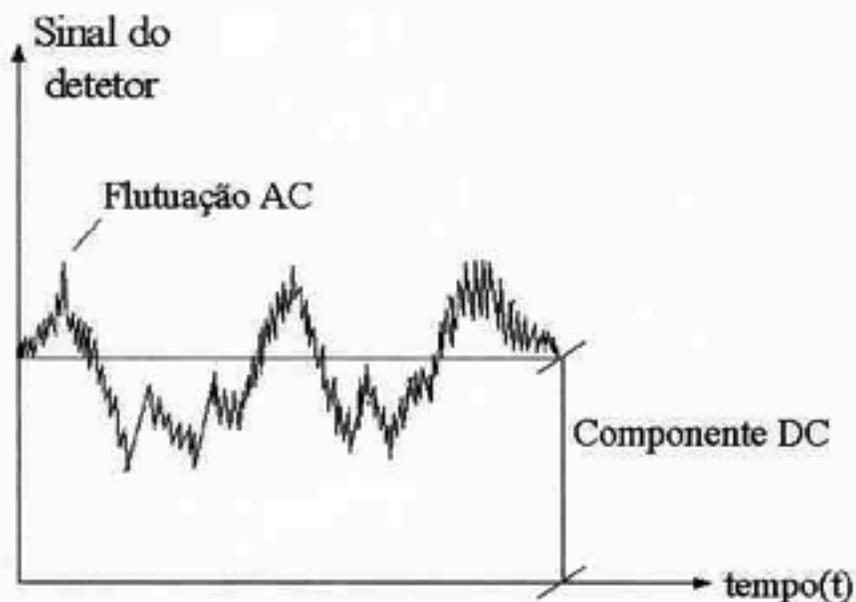


Figura 1. Sinal Típico de um Detetor de Neutrons

Assim como no caso de outras variáveis, como pressão e temperatura, a medida da componente DC do sinal fornece uma indicação sobre o valor médio do fluxo neutrônico, enquanto que a medida da componente AC nos fornece a medida da variação do fluxo, geralmente causada por perturbações aleatórias, como vibrações de elementos combustíveis, variação na densidade do moderador e refrigerante, deficiência de troca de calor com formação de bolhas e interação da bomba do primário com fluido refrigerante.[2]

Podemos tomar como exemplo a flutuação da corrente proveniente de um detetor tipo câmara de ionização durante um tempo  $t$ , conforme mostrado na figura 1. Esta flutuação apresenta vales e picos de corrente, os quais estão intimamente relacionados com processos tais como: vibração da estrutura, processos termohidráulicos e efeitos de realimentação, principalmente da temperatura na reatividade e conseqüentemente na potência do reator. O registro destes vales e picos num espectro de frequência caracteriza o que chamamos de "assinatura do reator". Esta "assinatura" seria na verdade a medida da Densidade Espectral de Potência.[2] Detetada uma possível alteração na "assinatura do reator", pode-se averiguar qual variável ou variáveis estão introduzindo mudanças no espectro de frequência, permitindo diagnosticar as possíveis causas.[3]

A informação proveniente dos detetores, seja ela na forma de tensão ou corrente, proporcional a interação do fluxo de neutrons com o detetor, será transformada em parâmetros estatísticos variáveis ao longo do tempo. É o chamado espectro de frequência do ruído neutrônico. Neste

trabalho o espectro de frequência de interesse para análise é o de alta frequência, de 1 a 100 Hz, onde predominam flutuações causadas por vibrações estruturais tais como: vaso de pressão, estruturas mecânicas suporte, elemento combustível e barra de controle.

## INSTRUMENTAÇÃO DESENVOLVIDA

A arquitetura de hardware do canal de instrumentação eletrônica, proposto neste trabalho para análise de ruído e medida de reatividade é constituída pelo detetor e pelo microcomputador tipo IBM-PC (fig. 2). O microcomputador tipo IBM-PC/AT possuirá no seu interior uma placa de condicionamento de sinais, a ser desenvolvida e uma placa de aquisição de dados, padrão comercial, a ser adquirida, que deverá executar o programa de aquisição de dados com análise espectral (AQDADOS). Desta forma o sinal proveniente do campo (detetor) entra diretamente no PC, através das placa de condicionamento e aquisição de dados disponíveis nos slots do PC. Isto facilita o processo de condicionamento de sinais e aquisição, deixando-os disponíveis para utilização por programas aplicativos próprios de análise de ruído, compatíveis com PC.

**Detetor** O detetor utilizado, junto ao núcleo do reator, é do tipo câmara de ionização, com função de fornecer uma corrente proporcional ao fluxo de neutrons. Eventualmente pode-se utilizar detetores auto-energizados tipo SPD's. A escolha da câmara de ionização justifica-se por ser o tipo de detetor utilizado para monitorar o reator na faixa de potência, em geral a partir de 1% da potência nominal.

**Microcomputador** O microcomputador é do tipo IBM/PC-AT ou similar comercial.

**Placa de aquisição de dados** A placa de aquisição de dados, padrão de mercado, realiza as seguintes funções:

- seleciona o sinal analógico da placa condicionadora de sinais;
- realiza a conversão analógica /digital do sinal;
- deixa o sinal convertido guardado numa memória ou registrador de forma que esteja disponível para ser acessado e processado pelo PC.
- permite a interface de entrada ou saída digital com PC

**Placa condicionadora de sinais** A placa condicionadora de sinais realiza as seguintes funções:

- executa o condicionamento do sinal de corrente proveniente do detetor, transformando-o em tensão amplificada através de módulos amplificadores, isoladores e filtros, de forma a separar a componente AC e DC do sinal.
- permite a seleção de ganhos por software através do teclado do PC;
- envia o sinal devidamente condicionado e filtrado para a placa de aquisição de dados.

## CONDICIONADOR DE SINAIS

A placa condicionadora de sinais é constituída por um módulo eletrômetro, um módulo filtro anti-aliasing e possui alimentação isolada do PC.

**Eletrômetro** O eletrômetro utilizado é do tipo derivação (shunt) [4] e realiza as seguintes funções:

- mede correntes muito baixas ( $1 \times 10^{-10}$  A);
- amplifica em modo diferencial o sinal de entrada através da programação do ganho dos amplificadores pelo software aplicativo do PC;
- isola os sinais de saída do sinal de entrada;
- executa a separação do sinal AC e do sinal DC;
- gera tensões ( na faixa de 0 a 10V) proporcionais à corrente medida;
- limita a faixa de frequências para análise de ruído em 100 Hz e para medida de reatividade em 1Hz;

**Filtro Anti-Aliasing (FAA)** O FAA é um filtro passa-baixa que tem a função de limitar a banda de passagem do sinal da saída AC do eletrômetro, para que não ocorra o fenomeno do aliasing, nas seguintes frequências de corte:

1,0Hz; 10Hz; 30Hz; 60Hz e 100Hz. Além destas frequências o sinal deverá sofrer atenuação suficiente para não interferir na resolução do conversor A/D.

**Alimentação isolada do PC** Este circuito tem a função de realizar a alimentação da placa condicionadora de sinais de forma isolada da alimentação do PC, como por exemplo na forma de um conversor DC/DC apropriado.

## ESPECIFICAÇÕES

Os dados a seguir mostram os parâmetros que nortearam o desenvolvimento da placa condicionadora de sinais.

### Eletrômetro

Escalas (F.E) (A)	Resolução (% F.E.)	Corrente Mínima (A)
$1 \times 10^{-9}$	1% F.E	$1 \times 10^{-10}$
$1 \times 10^{-8}$	0,1 % F.E	$1 \times 10^{-10}$
$1 \times 10^{-7}$	0,024 % F.E	$2,44 \times 10^{-10}$

Impedância de Entrada: 400Kohms

Medida de Correntes (DC): sinal de: 0 a 10V

Impedância de Saída: 50 ohm

Medida de Corrente (AC): sinal de 0 a 100 Hz e 10Vpp.

Impedância de saída: 50 ohm

Corrente de polarização na entrada: da ordem de  $10^{-12}$  (A) à 25 C

Corrente mínima medida:  $1 \times 10^{-10}$  (A)

Corrente máxima medida:  $1 \times 10^{-7}$  (A)

Faixa de Frequências para análise de ruído: 1Hz à 100Hz;

Ajuste de ganho por software, com os seguintes valores:

GANHO(DC) : de 100 a 20.000

GANHO(AC): de 100 a  $2 \times 10^6$

Alimentação: + 15Vcc, - 15Vcc ; + 15Visol. e - 15Visol. através de um conversor CC/CC.

### Filtro Anti-Aliasing

Alimentação: +/- 15Vcc

variação do ganho na banda de passagem +/- 0,5 dB;

nível de sinal na banda proibida: < -60dB;

Filtro Ativo Butterworth de ordem:  $n = 12$ ; Ganho unitário;

Topologia: Multiplas Realimentações

Amplificador Operacional utilizado: TL072;

Frequências de corte desejáveis: 1, 10; 30; 60; 100Hz;

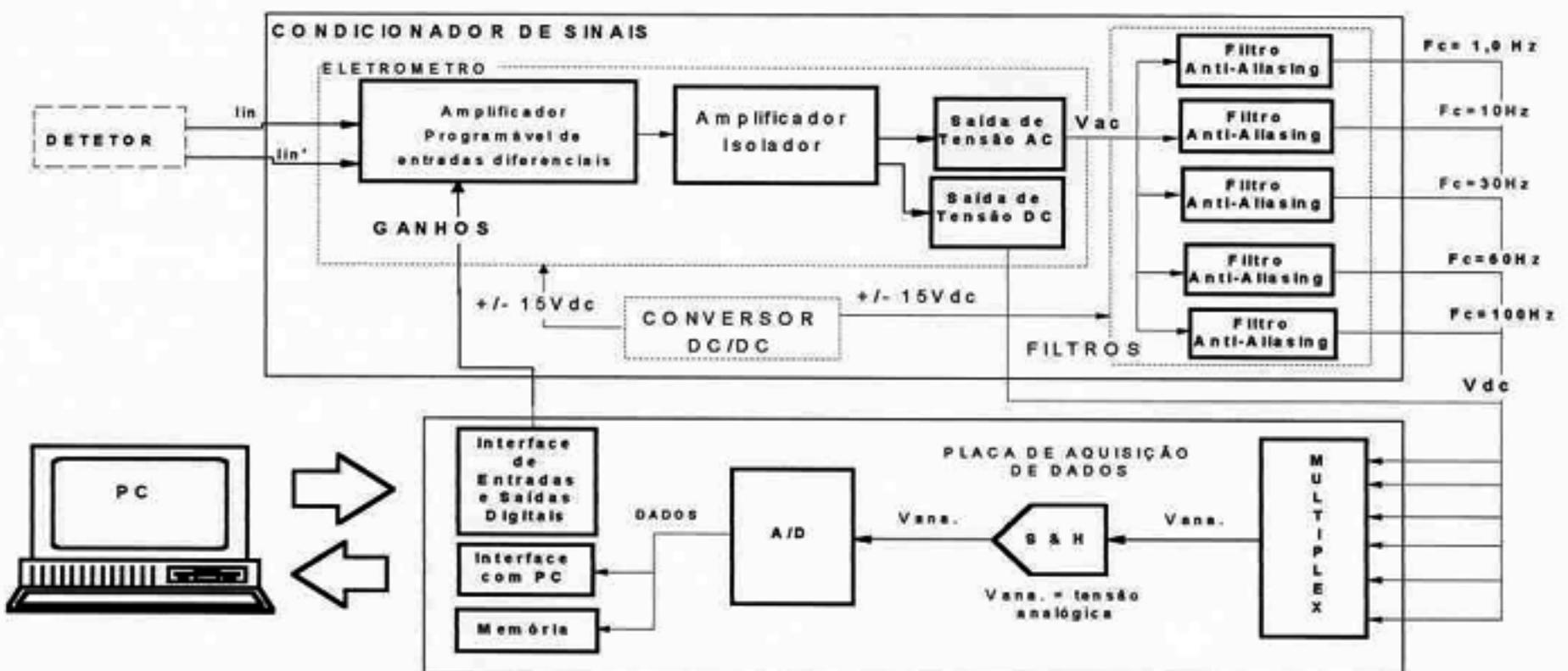


Figura 2. Instrumentação Desenvolvida

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez montada a placa, a mesma foi submetida a uma série de testes de testes de laboratório. Os resultados experimentais obtidos são mostrados nas figuras a seguir. As figuras 3 e 4 mostram a variação da tensão de saída do eletrômetro em função da corrente de entrada injetada para ganho 100 (mínimo) e ganho 20000 (máximo). Teóricamente o eletrômetro realiza a transformação da corrente de entrada  $I_{in}$  na tensão de entrada  $V_{in}$  através de uma resistência de entrada  $R_{in} = 400 \text{ kOhms}$ . Esta tensão é amplificada através do ganho programável  $G_{prog}$ . No caso do ganho programável ser mínimo ( $G_{prog,min} = 100$ ) temos:

$$V_{out} = V_{in} * G_{prog,min} \quad (1)$$

$$V_{out} = I_{in} * R_{in} * G_{prog,min} \quad (2)$$

$$V_{out} = I_{in} * 4.10^7 \text{ (V)} \quad (3)$$

Para ganho programável máximo ( $G_{prog,max} = 20000$ ) temos:

$$V_{out} = I_{in} * R_{in} * G_{prog,max} \quad (4)$$

$$V_{out} = I_{in} * 8 * 10^9 \text{ (V)} \quad (5)$$

Isto explica a característica linear dos graficos representados nas figuras 3 e 4.

As figuras 5, 6, 7, 8, e 9 mostram o resultado dos testes realizados com os filtros. Nelas podemos observar a resposta em frequência dos filtros anti-aliasing nas respectivas frequências de corte, ( $f_c$ ), de 100, 60, 30, 10, e 1,0 Hz. Estas curvas foram obtidas injetando-se um sinal senoidal com amplitude constante de 20V de pico a pico e frequência variável na entrada dos filtros.

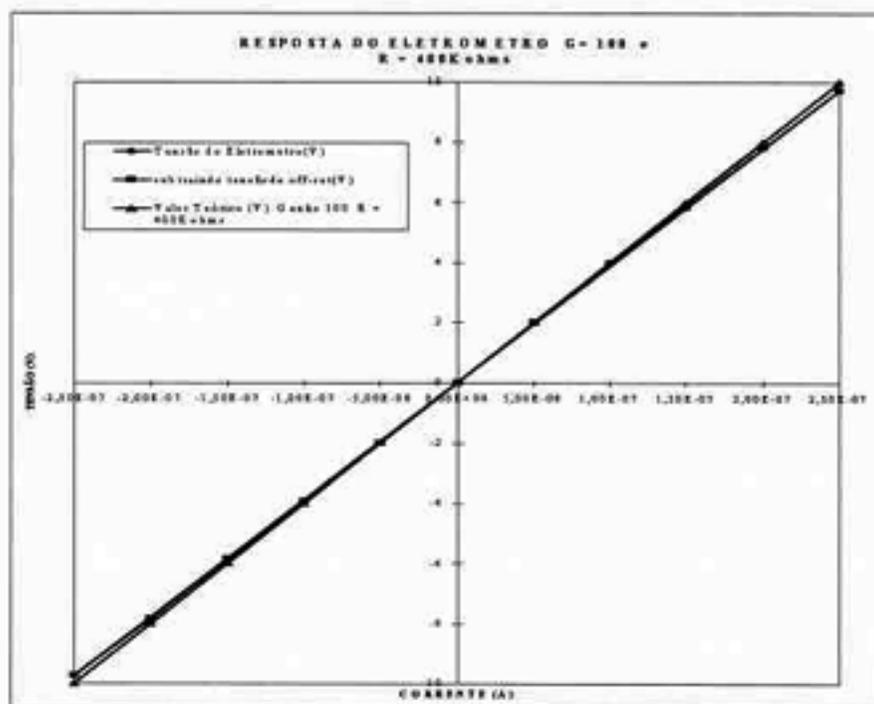


Figura 3. Resposta do Eletrômetro p/  $G = 100$

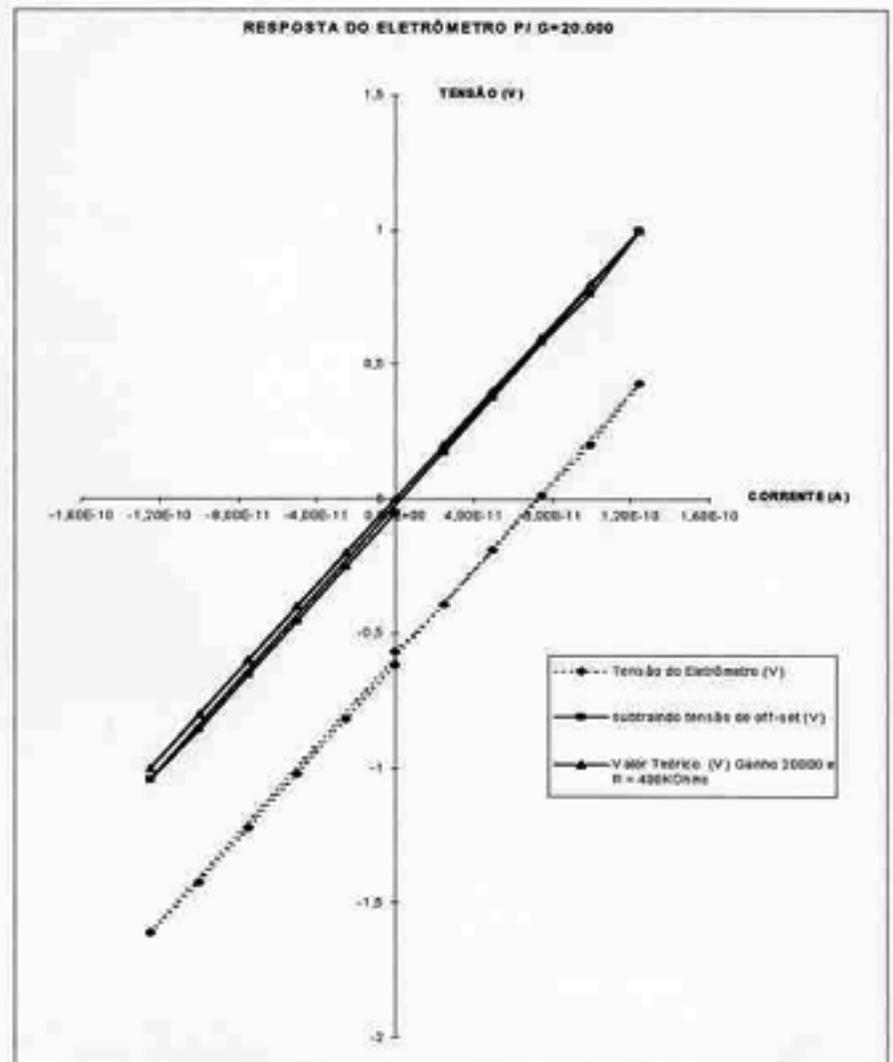


Figura 4. Resposta do Eletrômetro p/  $G = 2.10^4$



Figura 5. Resposta em frequência p/  $f_c = 100\text{Hz}$

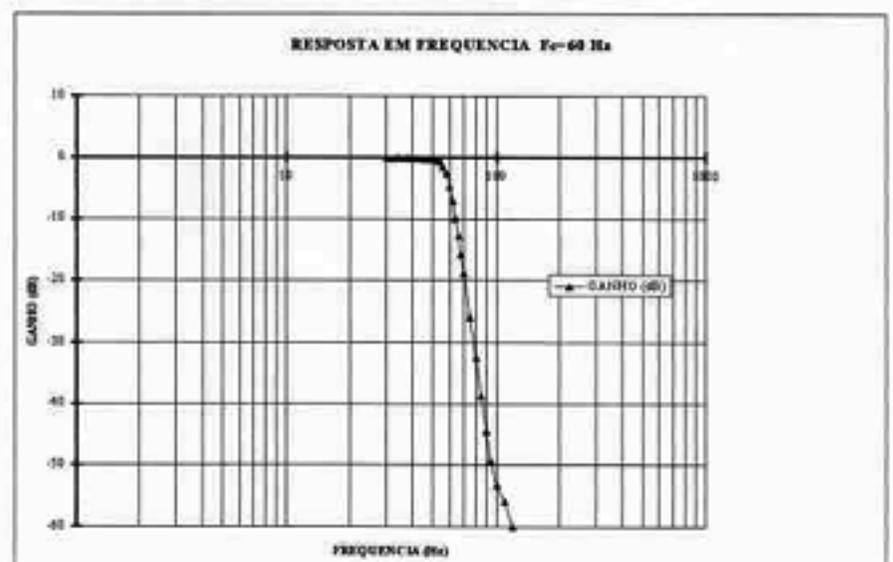


Figura 6. Resposta em Frequência p/  $f_c = 60\text{Hz}$

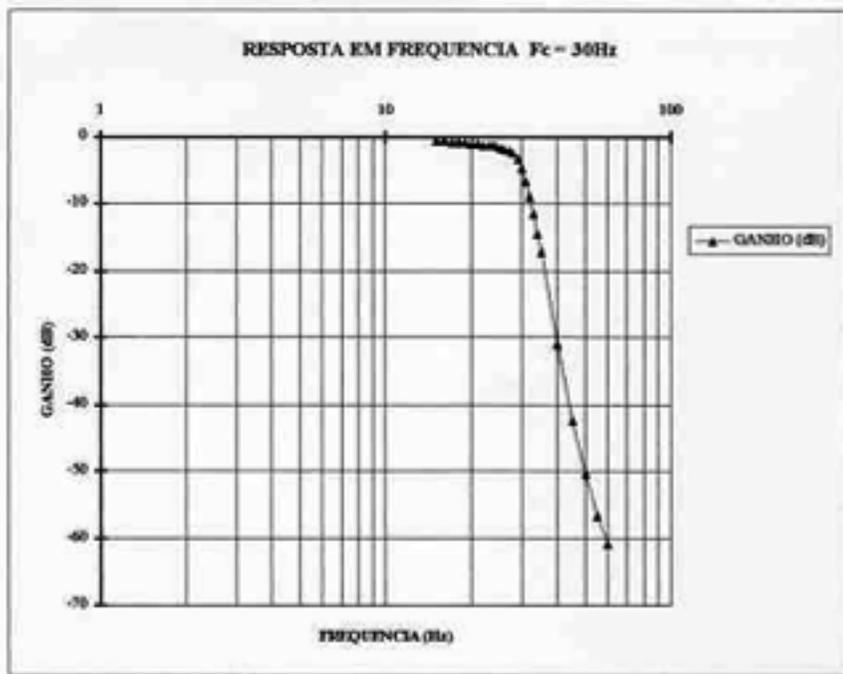


Figura 7. Resposta em Frequência p/  $f_c = 30\text{Hz}$



Figura 9. Resposta em Frequência p/  $f_c = 1,0\text{Hz}$

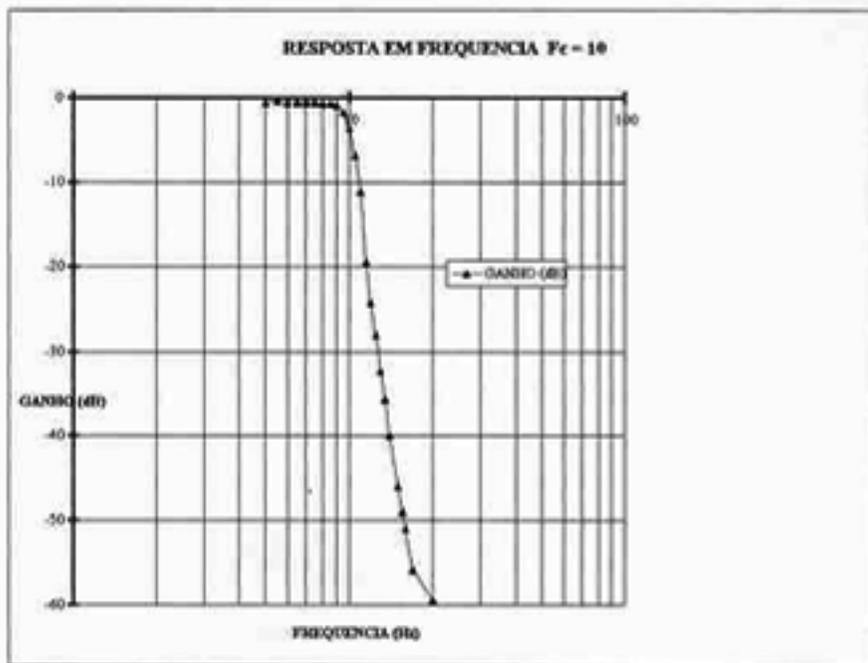


Figura 8. Resposta em Frequência p/  $f_c = 10\text{Hz}$

Uma vez concluídos os testes de laboratório, passamos aos testes de campo, que foram realizados no reator experimental IPEN/MB-01 (Unidade Crítica). Os resultados obtidos nos testes de campo são mostrados na Tabela 1. Nela podemos observar que para cada potência ajustada na mesa de controle do reator corresponde um valor proporcional de tensão medida na saída DC do eletrômetro. Neste experimento a programação do ganho foi realizada carregando-se um programa de seleção de ganhos no PC em linguagem Qbasic e a tensão esperada foi obtida através da expressão :

$$V_{\text{out}} = I_{\text{in}} \times 4 \cdot 10^5 \times G_{\text{prog}} \quad (6)$$

A corrente esperada foi obtida através da expressão:

$$I_{\text{in}} = V_{\text{out}} / 4 \cdot 10^5 \times G_{\text{prog}} \quad (7)$$

A ultima coluna da tabela mostra o erro percentual obtido para cada medida.

TABELA 1 - DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO REATOR

POTENCIA DO REATOR	CORRENTE MEDIDA(a) ( $\times 10^{-9}\text{A}$ )	TENSÃO MEDIDA (V)	GANHO PROGRAMADO	CORRENTE ESPERADA ( $\times 10^{-9}$ )	TENSÃO ESPERADA (V)	ERRO (%)
PARTIDA	1,3	11,5	20.000	1,43	10,4	+10
	2,73	9,84	10.000	2,46	10,92	-9,8
	5,0	1,9	1000	4,75	2,0	-5
	6,0	2,3	1000	5,75	2,4	-4
60mW	6,9	2,6	1000	6,5	2,76	-5,8
0,1W	11,5	4,52	1000	11,3	4,6	-2
0,5W	55,2	9,2	400	57,5	8,83	+4
1W	115	9,0	200	112,5	9,2	-2
2W	227	9,5	100	237,5	9,08	+4,6
3W	341	12,0	100	300	13,64	-12
4W	453	12,3	100	307	18,12	-

(a) - utilizando-se um eletrômetro modelo 614 da Keithley

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o eletrômetro em laboratório mostraram um erro percentual da ordem de 5% na faixa mais sensível do instrumento utilizando-se um ganho de 20.000. Para o ganho de 100 o erro máximo ocorrido foi de 1%. Os testes dos filtros anti-aliasing em laboratório mostraram uma atenuação da ordem de 60dB em uma oitava. Os testes de campo, realizados na Unidade Crítica, reator IPEN/MB-01, mostraram conformidade com aquilo que era esperado, resultando num erro da ordem de 5%. O erro de 10% encontrado na tabela 1 se deve à imprecisão de valores na partida do reator com fluxo de neutrons não muito estável. Nas potências de 3 e 4W a saída de tensão apresentou valores máximos não indicando a real tensão de saída esperada, conforme relacionado na tabela 1. Consideramos que a sensibilidade do detector ou proximidade deste do núcleo não possibilitou testar o eletrômetro com potências mais altas (10 e 100W) uma vez que na partida já atingia-se valores da ordem de  $10^{-9}$  A, quando o normal é obter correntes de partida da ordem de  $10^{-11}$  ou  $10^{-10}$  A. Na análise do sinal AC, utilizou-se um programa comercial de aquisição de dados (AQDADOS) que na análise espectral não revelou nenhuma componente relevante exceto na frequência de 60Hz. A análise espectral mostrou o desempenho dos filtros anti-aliasing nas respectivas frequências de corte com atenuação de 40dB por oitava em média.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CTMSP, ao IPEN, aos operadores da UCRI e a V. Surkov, o apoio e colaboração para realização deste trabalho

## REFERÊNCIAS

- [1] March Leuba et alli **Técnicas de Analisis de Ruido Neutronicos em Reactores de Potencia**, Revista Energia Nuclear, Espanha 29 Jan/Fev/1985
- [2] Silva A.A. et alli **Medidas de Ruído no Reator PWR em ANGRA 1**, artigo dos annais do VII Enfir/ Atibaia Set/ 1991
- [3] D. N. Fry, **Experience in Reactor Malfunction Diagnosis Using On-line Noise Analysis**, Nuclear Technology, Vol 10, March 1971.
- [4] Keithley, **Low Level Measurements**, Apostila Tecnica

## ABSTRACT

In nuclear power reactors, the neutron detector signal is dependent of the number of fissions and the reactor power level. The detector signal can be divided into two components: a DC component, proportional to the average value and an AC component, which is the fluctuating part superimposed to the DC component. The analysis of the fluctuating part of the signal is called noise analysis and allow us to investigate phenomens occurring within the reactor vessel, such as vibration of fuels elements and coolant density, temperature, pression and flow changes. On the other hand, the measure of the static DC part allow us to measure the local power density.

This paper describes the development of a personal computer based signal conditioning card that, together with a personal computer comercial data aquisition card, can be used for noise analysis measurements and reactivity measurements of signals coming from ionization chambers or SPD's.