

DESENVOLVIMENTO DE UM AMPLIFICADOR ISOLADOR PARA ESTUDO DE SINAIS DINÂMICOS

Nicolau Dyrjawoj, Eduardo W. Pontes e Daniel K. S. Ting

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes 2.242
05508-000 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O presente trabalho descreve aspectos do desenvolvimento e as principais características de um amplificador isolador moderno utilizado em sistemas de monitoração de sinais dinâmicos aplicável em usinas nucleares, capaz de processar sinais de frequências na faixa de 0,001Hz a 20kHz e de amplitudes de frações de mV a V. Os resultados de testes preliminares obtidos num protótipo mostraram características de: ruído, isolamento e resposta em frequência, adequadas para a aplicação proposta.

Keywords: isolating amplifier, design, noise analysis.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de análise de sinais dinâmicos permite obter informações adicionais dos processos que ocorrem numa determinada planta industrial. Particularmente numa central nuclear, essas técnicas possuem grande utilidade, uma vez que normalmente seu circuito primário não é acessível devido à radiação nuclear, e também pela impossibilidade financeira de uma parada desnecessária.

Uma importante aplicação dessas técnicas é a detecção precoce do aparecimento de danos ou anomalias em componentes da planta. Como exemplo, por meio da análise de vibrações, podemos identificar os desgastes de peças, a fadiga do material, rachaduras e outros defeitos.

Em reatores nucleares, o estudo do sinal proveniente das câmaras de ionização permite avaliar condições de operação dos elementos combustíveis, além de parâmetros neutrônicos.

Se algum sinal não habitual for identificado e as suas causas forem corretamente interpretadas, então neste caso é possível controlar uma falha. O tempo e o custo da manutenção da planta podem ser reduzidos, pois com a detecção precoce do aparecimento da falha, aumenta-se a qualidade da manutenção preventiva.

Para implementar esse tipo de análise, é necessário utilizar um sistema de monitoração de sinais dinâmicos compatível com os sinais de interesse. Uma parte de grande importância desse sistema, é a parte de condicionamento de sinais realizada pelo equipamento aqui denominado "amplificador isolador".

Este trabalho descreve aspectos do desenvolvimento de um amplificador isolador moderno utilizado em sistemas de monitoração de sinais dinâmicos, capaz de processar

sinais de frequências na faixa de 0,001Hz a 20kHz, de amplitudes de frações de mV a V e com uma isolamento elétrica maior que 220Vac. Com essas características, atende-se a uma ampla gama de aplicações, possibilitando sua interligação à vários tipos de sensores de processos. Particularmente, em centrais nucleares, a característica de isolamento é de fundamental importância, pois é necessário evitar que uma possível falha do equipamento de monitoração afete a segurança da planta.

O projeto inclui uma série de características adaptadas à aplicação de monitoração de sinais, tais como: isolamento do sinal, seleção de ganhos e frequências e detecção de saturação. Este projeto será futuramente acoplado num módulo digital de programação e empacotado com várias unidades em rack, para análise no campo.

Os resultados experimentais obtidos num protótipo experimental mostraram características de: ruído, isolamento e resposta em frequência, adequadas para a aplicação proposta.

II. SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE SINAIS DINÂMICOS

A análise de sinais em monitoração e diagnóstico utiliza um conjunto de equipamentos interligados aqui denominado de Sistema de Monitoração de Sinais Dinâmicos. Basicamente esse sistema realiza o condicionamento e aquisição do sinal para posterior processamento em microcomputadores. Para isso, o sistema condiciona de forma adequada a componente dinâmica do sinal, proveniente de transdutores instalados nos equipamentos monitorados, e após, faz a conversão

analógica-digital. Finalmente, um microcomputador, possuindo um programa de processamento de sinais adequado, faz a análise do sinal digitalizado. Como exemplo, utilizando-se a análise de Fourier, pode-se identificar falhas com o aparecimento de frequências anormais no espectro do sinal.

As aplicações de sinais dinâmicos estão presentes em várias áreas, entre elas: manutenção preventiva, análise de vibração, máquinas rotativas, análise espectral, testes estruturais, testes de durabilidade, testes de colisão, acústica, estudos de rádio-frequência e medidas de ruído proveniente do meio ambiente [1].

A figura 1 ilustra o esquema experimental básico de um canal de um sistema de monitoração de sinais dinâmicos. Ele é constituído de:

- Sensor (transdutor) (A1).
- Condicionador de sinais (A2).
- Interface de aquisição de dados (A3).
- Microcomputador (A4).
- Programa para processamento de sinais (A5).

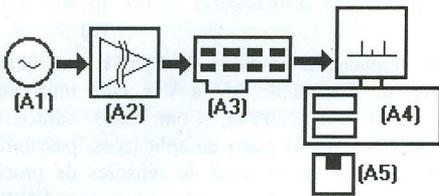


Figura 1. Esquema de um Sistema de Monitoração de Sinais Dinâmicos (1 canal).

Sensor. Utilizado normalmente para converter a variável de interesse em sinal elétrico. É instalado normalmente no equipamento que está sendo monitorado e pode eventualmente estar conectado a uma eletrônica necessária para a amplificação e transmissão do sinal para os demais equipamentos. Utiliza-se em geral um sensor do tipo: acelerômetro, sensor de processo (termopar, sensores de vazão, nível, pressão, etc.), ou microfone.

Condicionador de sinais. Denominado de amplificador isolador, é utilizado para filtrar, isolar e amplificar o sinal, antes de sua digitalização. Inicialmente, o condicionador separa o sinal dinâmico (variação) do sinal proveniente do sensor, por meio de um filtro passa-baixas de baixa frequência de corte (ex.: 0,001Hz). Com o objetivo de preparar o sinal para digitalização, o condicionador normalmente amplifica o sinal dinâmico resultante, e após, limita sua frequência superior por meio de um filtro passa-baixas de ordem elevada (função "anti-aliasing"). Também, o condicionador separa eletricamente o processo do sistema de monitoração, por meio de isolamento elétrica.

Interface de aquisição de dados. É uma interface destinada a converter o sinal analógico em digital. Normalmente possui vários canais de entrada, sendo

necessário realizar também a função de seleção ("multiplex") de um canal para conversão.

Microcomputador. Necessário para armazenar e processar, por um software específico, os dados resultantes do sinal digitalizado. Para análise de sinais de frequências altas, normalmente a aquisição de dados necessita de maior capacidade de memória e velocidade de processamento.

Programa para processamento de sinais. É um programa utilizado para análise de sinais. É possível utilizar uma série de funções e algoritmos. Entre eles, a transformada de Fourier (FFT), as funções estatísticas de segunda ordem e de ordem superior (HOS), etc..

III. AMPLIFICADOR ISOLADOR

O equipamento amplificador isolador, como já mencionado, é um condicionador de sinais capaz de atender a uma ampla gama de aplicações na área de monitoração e diagnóstico. Além de amplificar baixos sinais numa faixa de frequências definida, o equipamento deve prover uma isolamento elétrica entre sua entrada e saída, de modo a minimizar erros, e evitar propagação de possíveis falhas da saída para a entrada.

A figura 2 ilustra a arquitetura adotada para o amplificador isolador. Basicamente, ele é composto dos seguintes blocos:

- Filtro passa-altas (B1).
- Estágio de amplificação (B2).
- Isolador de Sinais (B3).
- Filtro passa-baixas (B4).
- Indicador de saturação (B5).
- Fonte isolada (B6).
- Fonte de alimentação (B7).

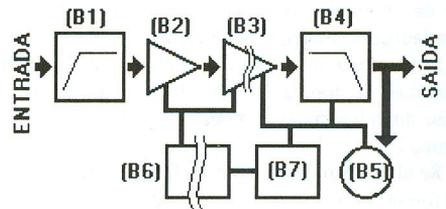


Figura 2. Arquitetura do Amplificador Isolador.

Filtro passa-altas O filtro passa-altas de componentes passivos está localizado na entrada do equipamento e tem a função de separar a componente dinâmica (a.c.) do sinal de entrada. O filtro possui frequência de corte selecionável entre 0,001Hz e 0,1Hz. Como exemplo, em análise de ruído neutrônico pode-se selecionar o filtro em 0,001Hz e em análise de vibração com acelerômetros em 0,1Hz [2]. Deve-se ressaltar que o desenvolvimento de um filtro passa altas para sinais de baixa amplitude, particularmente para a frequência de 0,001Hz, requer uma série de cuidados

especiais de projeto, introduzidos neste desenvolvimento e descritos no decorrer deste texto.

Estágio de amplificação. Amplificar sinais de baixa amplitude, em frequências altas, necessita de componentes de alto desempenho e uma arquitetura adequada. Um conjunto de quatro amplificadores operacionais, com ganho total selecionável entre 1 e 10000 em fatores 3, fornece ganho ao sistema. O ganho de cada amplificador é limitado em 10 de modo a assegurar uma resposta em frequência plana e estável até a frequência de corte superior. O primeiro estágio de amplificação e o filtro passa-altas têm grande influência no desempenho do amplificador isolador.

Isolador de Sinais. Faz parte com a Fonte Isolada da barreira de isolamento entre entrada e saída. No projeto utilizou-se o isolador de sinais de acoplamento capacitivo.

O princípio de funcionamento deste tipo de componente consiste em isolar a entrada da saída, por intermédio de um par de capacitores de baixo valor. O sinal na entrada é modulado e transmitido para a saída, onde é demodulado e convertido novamente para a forma analógica.

O componente utilizado é o ISO124 da Burr-Brown devido a sua eficiência e ao seu baixo custo. Este componente possui: isolamento de 1500Vrms, faixa de frequências de operação de 50kHz e frequência de modulação de 500kHz.

Filtro passa-baixas. Ele determina a frequência de corte superior do amplificador isolador e tem como principal função eliminar os problemas de "aliasing" na análise de sinais. A qualidade do filtro, relacionada ao seu tipo e a sua ordem, é fundamental para permitir um bom desempenho do sistema de análise de sinais.

Um filtro anti-aliasing ideal elimina todas as componentes de frequência que estão situadas acima de uma frequência de corte (f_c) pré-determinada, sendo transparente para as frequências inferiores. Na prática, o filtro possui uma região de transição com certa inclinação entre a frequência de corte nominal e uma frequência denominada "stopband" de atenuação desejável. Desse modo, um bom filtro anti-aliasing deve possuir uma resposta plana na região de interesse e uma região de transição de largura mínima.

Para este projeto foi adotado um filtro Butterworth de 4 pólos (80dB/década), sendo possível selecionar entre três frequências de corte: 200Hz, 2kHz e 20kHz. Como exemplo, acelerômetros utilizados em experimentos de análise de vibração possuem uma resposta linear até o valor de 10kHz [2].

A figura 3 ilustra a resposta em frequência e de fase do filtro "Butterworth" de quarta ordem utilizado.

Indicador de saturação. Tem por objetivo indicar se o nível de tensão do sinal dinâmico ultrapassou a região linear de amplificação de $\pm 10V_p$. É um circuito composto basicamente de um retificador e um discriminador com

memória, com tempo de resposta compatível com a frequência do sinal de interesse.

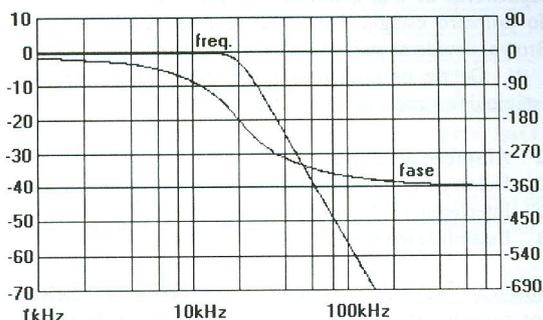


Figura 3. Filtro Passa-Baixas de 20kHz do Amplificador Isolador.

Fonte isolada. Faz parte com o Isolador de Sinais da barreira de isolamento entre entrada e saída. É basicamente um conversor DC/DC que utiliza um oscilador de alta frequência para realizar o chaveamento da tensão. Esta frequência deve ser maior que a frequência máxima do sinal de interesse para evitar qualquer perturbação na análise do sinal.

Utilizou-se a fonte isolada GS5T24-5D15 da SGS-THOMSON. É um componente compacto que possui as seguintes características principais: corrente de saída de até 125mA para uma tensão de saída regulada de $\pm 15V$, frequência de chaveamento de 120kHz, e tensão de isolamento de 2500Vdc.

Fonte de alimentação. Utilizada para alimentar o bloco de saída do amplificador isolador. É uma fonte simétrica estabilizada de $\pm 15Vdc$.

A seguir apresentam-se as principais características do amplificador isolador, responsáveis pelo seu desempenho.

IV. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO AMPLIFICADOR ISOLADOR

Embora em geral deva-se considerar uma série de características, pode-se dizer que o estágio de entrada possui as características mais críticas para tal aplicação. Também, particularmente importante, é a característica de isolamento entre entrada e saída.

Estágio de entrada. O estágio de entrada do amplificador isolador é constituído pelo filtro passa-altas e o primeiro amplificador operacional do estágio de amplificação. Este é o estágio mais crítico e importante do equipamento, pois para sinais de tensões muito baixas (ex.: 100 μV), os erros introduzidos por esse estágio têm maior importância. Nos

demais estágios, o efeito desses erros é reduzido pelos ganhos introduzidos pelos estágios anteriores.

O filtro passa-altas é formado por resistores e capacitores de alta qualidade. O amplificador operacional do primeiro estágio é o OPA627AM da empresa Burr-Brown, devido as suas excelentes características.

Dentre os principais fenômenos que interferem no estágio de entrada, pode-se citar:

- Absorção dielétrica.
- Ruído do estágio de entrada.
- Interferência eletromagnética.
- Estabilidade térmica.

Absorção dielétrica. Fenômeno que ocorre no dielétrico dos capacitores, responsável pela deformação do sinal em baixos níveis. Os capacitores selecionados para o filtro passa-altas são de policarbonato, e quando possível de polietileno, pois esses materiais possuem baixa absorção dielétrica [3, 4].

Ruído do estágio de entrada. Os resistores e amplificador operacional do estágio de entrada devem gerar baixo nível de ruído. Para se construir o estágio de entrada, foram utilizados: resistores de filme metálico, que possuem um ruído de contato menor que o tipo de carvão, e o amplificador operacional OPA627AM, de entrada com transistores FET, que possui uma densidade de ruído de cerca de $4,8nV/\sqrt{Hz}$.

Para se determinar a densidade de ruído total numa determinada frequência, correspondente ao primeiro estágio de amplificação, utilizou-se o modelo ilustrado na figura 4:

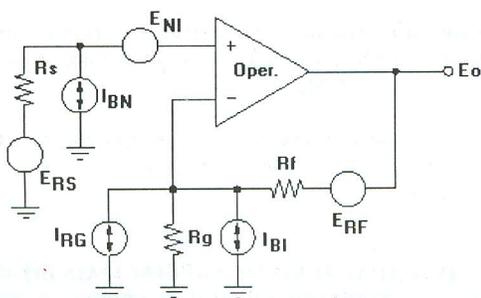


Figura 4. Modelo para Análise de Ruído do Estágio de Entrada.

onde,

E_{NI} = densidade da tensão de ruído do amplificador.

I_{BN} = densidade da corrente de ruído da entrada (+) do amplificador.

I_{BI} = densidade da corrente de ruído da entrada (-) do amplificador.

E_{RS} = densidade da tensão de ruído do resistor da fonte de sinal.

E_{RF} = densidade da tensão de ruído do resistor R_f .

I_{RG} = densidade da corrente de ruído do resistor R_g .

Para o cálculo da densidade da tensão total de ruído referida à entrada (E_n) consideram-se as tensões e correntes de ruído não correlacionadas. Fazendo-se as transformações adequadas do modelo, obtém-se a seguinte expressão [5]:

$$E_n = \frac{\sqrt{[E_{NI}^2 + (I_{BN}R_S)^2 + 4KTR_S]G_N^2 + (I_{BI}R_F)^2 + 4KTR_F G_N}}{G_N}$$

onde,

K = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ W.sec/ $^\circ$ K.

T = temperatura em graus Kelvin.

Para calcular a tensão de ruído numa determinada faixa de frequências, deve-se integrar a densidade de potência de ruído (E_n^2) na faixa de frequências de interesse.

Como exemplo, para ganho 10, faixa de frequências de 1 a 10kHz, e impedância de saída do transdutor de 1k Ω , resulta:

$$E_n(1 \text{ a } 10\text{kHz}) < 3\mu\text{V}.$$

Estabilidade térmica. Refere-se a estabilidade do sinal em relação à temperatura. Neste caso, a característica que deve ser considerada é a variação térmica ("drift") do "offset" de tensão do amplificador do estágio de entrada (cerca de $2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ para o OPA627AM). Esta característica tem maior importância no caso de sinais de variação lenta, quando se utiliza a frequência de corte de 0,001Hz.

Interferência eletromagnética. Campos elétricos e magnéticos podem produzir erros no estágio de entrada, especialmente por este possuir alta impedância. Para minimizar esta interferência, blinda-se adequadamente todo o circuito anterior ao isolador de sinais com alumínio para os campos elétricos e com material ferromagnético para os campos magnéticos. Uma outra blindagem é utilizada para o circuito posterior ao isolador de sinais [6].

Isolação. A isolação tem duas funções principais: minimizar erros devido ao acoplamento elétrico entre equipamentos e evitar que falhas se propaguem da saída para a entrada.

A entrada flutuante evita os erros que os sistemas não isolados podem provocar devido ao "loop" de corrente existente quando o terra do equipamento sendo monitorado estiver num potencial diferente do terra do sistema de aquisição do sinal. Esta diferença de potencial geralmente não é somente um nível dc de tensão, mas também a componente de 60Hz, suas harmônicas e várias componentes de ruído provenientes da alimentação do equipamento [7, 8]. Assim, a entrada flutuante reduz o erro total do sistema, devido a sua característica de alta taxa de rejeição de modo comum (CMRR) [9].

Também, a isolação é necessária nas aplicações onde é necessário evitar que o sistema de aquisição de dados aplique tensões ou correntes danosas aos sensores. Em especial, nas aplicações relacionadas às plantas nucleares [10].

A isolação elétrica é obtida por meio da utilização de uma série de componentes e por certos cuidados construtivos. Como exemplo das tensões de isolação dos

componentes utilizados, pode-se citar: isolador de sinais (1500 Vrms), fonte isolada (2500 Vdc) e foto-acoplador (2500 Vrms). Em relação aos cuidados construtivos, deve-se mencionar, por exemplo, a separação das partes isoladas no circuito impresso e os cuidados de fiação.

Outras características, tais como: linearidade, distorção harmônica, estabilidade a longo prazo, e outras, devem ser consideradas, embora não tenham sido detalhadas neste trabalho.

V. ESTÁGIO ATUAL

Um protótipo experimental foi construído e encontra-se em fase inicial de avaliação. A figura 5 ilustra a foto do protótipo.

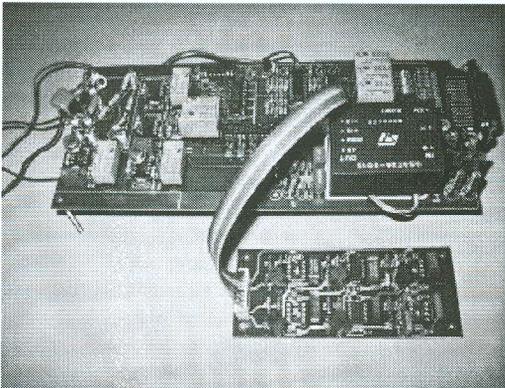


Figura 5. Foto do Protótipo do Amplificador Isolador sem as Blindagens.

Para a realização dos testes preliminares, definiu-se uma bancada experimental composta dos seguintes equipamentos:

- Gerador de funções da HP, modelo 33120.
- Placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo DAQCard – AI-16E-4 (16 Inputs, 500 kS/s, 12-bit Multifunção I/O).
- Notebook Pentium de 133MHz, 16MB de RAM, 256KB de memória cachê, Windows 95.
- Programa LABVIEW5.1.

Para verificar a funcionalidade do equipamento, realizou-se o teste mostrado nas figuras 6 e 7. Neste teste, traça-se o espectro do sinal de 500Hz e 1Vp, proveniente do gerador de funções conectado ao sistema de monitoração de sinais dinâmicos, em duas situações: sem utilizar o amplificador isolador, e utilizando o amplificador isolador entre o gerador de funções e o sistema de monitoração.

Comparando as figuras 6 e 7, pode-se concluir que o amplificador isolador não introduz ruído significativo no sistema (cerca de 70dB).

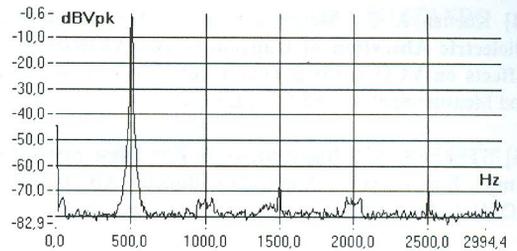


Figura 6. Sinal de 500Hz e 1Vp Aplicado no Sistema de Monitoração de Sinais Dinâmicos sem o Amplificador Isolador.

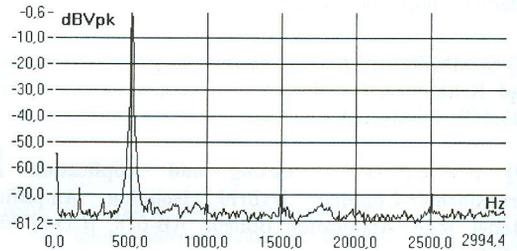


Figura 7. Sinal de 500Hz e 1Vp Aplicado no Sistema de Monitoração de Sinais Dinâmicos por meio do Amplificador Isolador.

VI. CONCLUSÃO

O amplificador isolador encontra-se em sua fase final de desenvolvimento.

Os testes preliminares realizados até o momento demonstram a possibilidade de sua utilização para a aplicação proposta.

Para a próxima etapa, estão previstos os testes para a sua caracterização final.

REFERÊNCIAS

- [1] NATIONAL INSTRUMENTS, **Computer- Based Dynamic Signal Measurements**, U.S.A., 1998, [online, 2001], Available from Internet: <<http://www.ni.com>>.
- [2] SERRA, R. C and TECCO, D.G., **Aquisição de Dados, Monitoramento e Diagnóstico para Controle Preditivo e Proteção de Componentes Rotativos de Alta Responsabilidade do Reator IEA-R1 por Análise de Vibração**, Congresso Geral de Energia Nuclear, [CD-ROM], VI CGEN 1996.
- [3] HYYPPA, K., **Dielectric Absorption in Memory Capacitors**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM21:(1) 1972.

- [4] Kuenen J. C., Meijer G. C. M., **Measurement of Dielectric Absorption of Capacitors and Analysis of its Effects on VCO's**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 45:(1), FEB1996.
- [5] STEFFES, M., **Noise analysis For High Speed Op Amps**, Burr-Brown - Application Bulletin AB-103, [CD-ROM], U.S.A., 1999.
- [6] OTT, H.W., **Noise reduction techniques in electronic systems**, John Wiley & Sons, New York, 1988, 2.ed.
- [7] NOONAN, P., **Understanding Isolation and Performing High - Voltage Measurements**, Apostila da National Instruments , 2000 [online, 2001], Available from Internet: <<http://www.ni.com>>.
- [8] SOMMERVILLE, T., **Isolation Amps Hike Accuracy and Reliability**, Burr-Brown - Application Bulletin AB-093, [CD-ROM], U.S.A., 1999.
- [9] BURR-BROWN, **Desing and Application of Transformer-Coupled Hybrid Isolation Amplifier Model 3656**, Application Bulletin AB-078, [CD-ROM], U.S.A., 1999.
- [10] KESTER, W., BRYANT, J. and JUNG, W., **Section 3 Amplifiers For Signal Conditions**, [online, 2001], Available from Internet: <<http://www.analog.com>>.

ABSTRACT

The present work describes the development aspects and the main characteristics of a modern isolating amplifier used in monitoring systems of dynamic signals applicable to nuclear plants, which is able to process signals in the frequencies range from 0,001Hz to 20kHz and amplitudes from fractions of mV to Volts. Preliminary testing results obtained in a prototype showed noise characteristics, isolation and frequency band adequate for the proposed application.