

Condicionador Reconfigurável para Medição de Vibração

Getulio Furtado Pantoja Neto ¹, Ivan Souza e Silva ²

¹ Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, netopantoja@gmail.com

² Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, ivan@ufpa.br

Resumo: Neste trabalho apresenta-se um condicionador de sinais, com ganho e frequência de corte reconfigurável, para medição de vibração mecânica através de acelerômetros IEPE, utilizando a tecnologia PSoC. Os valores de ganho e frequência de corte podem ser configurados pelo usuário através de uma interface com um computador tipo PC. A reconfiguração do condicionador torna possível sua utilização para outros tipos de sensores de vibração representando um avanço para os condicionadores de sinais. Para validação desse sistema foi elaborado teste em laboratório onde o acelerômetro foi excitado por uma ampla faixa de frequências e amplitudes de vibração.

Palavras chave: acelerômetro, medição de vibração, circuitos reconfiguráveis, PSoC.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os procedimentos de manutenção preditiva vêm sendo crescentemente implementados em vários ambientes do setor produtivo [1,2]. Esses procedimentos se diferenciam dos métodos preventivos e corretivos, pelo fato de se basearem no acompanhamento contínuo dos estados de componentes e grandezas fundamentais para o bom desempenho dos equipamentos. Neste caso, utilizam-se recursos de aquisição de dados e monitoramento que, adequadamente interpretados, permitem diagnosticar o estado de desgaste ou de deterioração de componentes, com base na experiência prévia das estimativas de degradação e de uso de equipamentos e peças.

Particularmente, no ambiente de geração de energia elétrica, face a existência de máquinas rotativas e vibratórias, é importante a monitoração da evolução dessas vibrações. Isso pode permitir um acompanhamento detalhado do desgaste dessas máquinas e, consequentemente, a definição de um plano de manutenção com vistas à obtenção de um mínimo de degradação no desempenho do sistema.

Um componente indispensável na malha de qualquer sistema de medição é o condicionador de sinais, que deve estabelecer ganhos e faixas de frequências adequadas aos níveis do sinal fornecido pelo sensor. Existem várias estratégias de implementação de condicionadores de sinais de sensores [3,4]. No presente trabalho utiliza-se um sistema baseado em componentes SoC (System on Chip).

Particularmente utiliza-se o PSoC (Programmable System on Chip) da empresa americana Cypress [5].

Com a possibilidade de programação de valores de ganho e frequências de corte, o condicionador obtido proporciona grande flexibilidade, podendo ser utilizado em várias aplicações (máquinas rotativas para controle de desbalanceamento, transformadores de energia elétrica para detecção de falhas e outras). Além dessas, pode também ser aplicado em medições de outras grandezas como deslocamento, velocidade, comprimento, etc.

2. ARQUITETURA PROPOSTA

Na figura 1 apresenta-se o diagrama em blocos do módulo de condicionamento de sinais com dois canais de medição. É composto de entradas e saídas analógicas, filtros passa-altas, amplificadores com ganho programável, microcontrolador PSoC, fontes de nível DC e somadores.

O sinal convertido pelo acelerômetro possui um nível DC desconhecido que é eliminado por um filtro passa altas. Devido a necessidade do PSoC trabalhar com níveis de tensão de 0 à 5V é somado um nível DC de 2.5V ao sinal. Assim, utilizando-se um amplificador com ganho programável, o sinal é amplificado. Na saída do amplificador de ganho programável, utiliza-se um filtro passa altas, que elimina o nível DC imposto na sua entrada. Para redução de sinais de ruídos indesejáveis de alta frequência (acima da faixa de interesse) utiliza-se um filtro passa baixas, a capacitor chaveado. Assim, o sinal está pronto para ser enviado para a saída analógica. A programação dos valores de ganho e frequência de corte é feito por meio da porta USB, através de uma interface com o usuário que foi criada utilizando-se a ferramenta LabView.

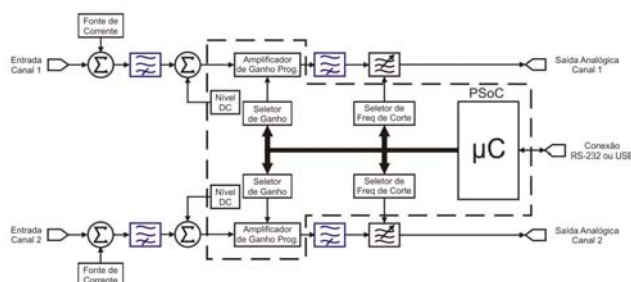


Fig. 1. Diagrama em blocos do módulo de condicionamento de sinais com dois canais de medição.

Na figura 2 mostra-se o diagrama em blocos do módulo de digitalização, o qual é composto por PSoCs, somadores, conversor analógico digital, fonte de nível DC e multiplexador 16x1. O módulo tem como principal função a digitalização dos sinais das saídas analógicas dos canais de medição e envio para o computador. Esta digitalização é feita através da multiplexação dos 16 canais para a entrada do conversor A/D e em seguida, o sinal digital é enviado pela porta RS232 ou USB para o computador, onde uma análise pode permitir a tomada de decisões quanto ao planejamento de intervenções nas máquinas em observação.

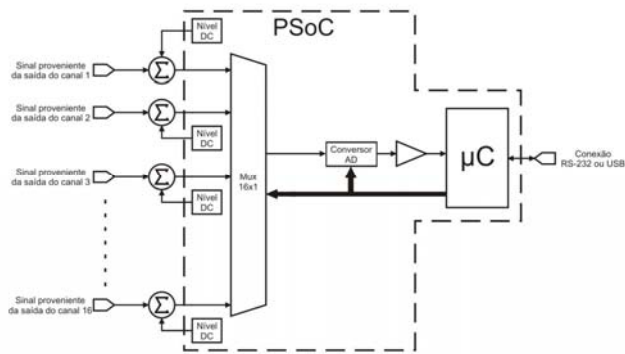


Fig. 2. Diagrama em blocos do módulo de digitalização.

2.1. Módulo de Condicionamento de Sinais com dois Canais de Medição

Como foi visto anteriormente na figura 1, este módulo é responsável pela eliminação do nível DC do sinal de entrada; adição de nível DC preparando o sinal para amplificação, eliminação do nível DC na saída do amplificador e filtragem.

2.1.1. Eliminação do nível DC de entrada

Um filtro ativo passa altas com frequência de corte de 0.01Hz elimina o nível DC do sinal de entrada, uma vez que, na aplicação em que condicionador será utilizado o sinal a partir de 0.5 Hz possui informação de interesse. Sendo assim, o condicionador não deve defasar o sinal a partir dessa frequência.

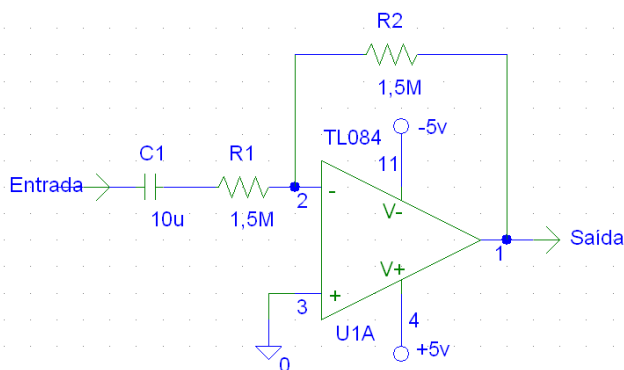


Fig. 3. Esquema do filtro passa altas.

$$H(s) = -k \frac{s}{s + \omega_c} \quad (1)$$

A função de transferência do filtro passa altas, figura 3, é encontrada na equação (1) onde k representa o ganho do filtro e ω_c a frequência de corte em radianos por segundo.

Adota-se o ganho unitário, frequência de corte igual 0.01 Hz e $C = 10 \mu F$.

$$k = \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_1 \times C} \quad (3)$$

Substituindo nas equações (3) e (2) têm-se os valores de R_1 e R_2 iguais a 1.5 M Ω resultando na função de transferência do filtro, conforme a equação (4).

$$H(s) = -\frac{1,04166s}{s + 0,0628} \quad (4)$$

A partir da função de transferência é gerada a resposta do sistema mostrada na figura 4. Essa curva mostra o desempenho do filtro em uma ampla faixa de frequência e como pode ser visto, a partir de 0.5 Hz, a fase é constante satisfazendo uma das exigências da aplicação.

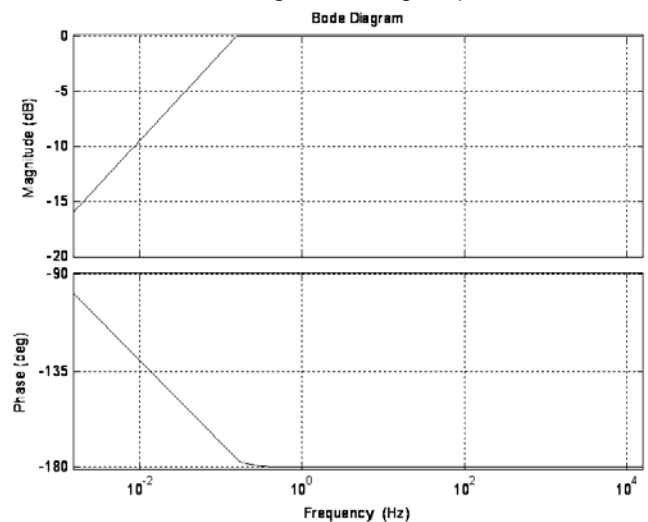


Fig. 4. Resposta em frequência do filtro passa altas.

2.1.2. Adição de nível DC no sinal

Para que o sinal possa ser processado pelo condicionador implementado com um PSoC, é necessário um nível DC de 2.5 V, que é injetado no sinal através de um somador não inversor, figura 5.

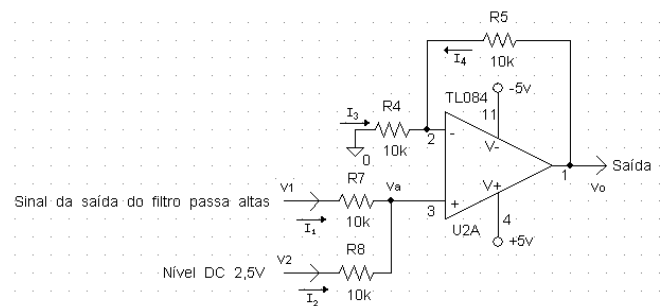


Fig. 5. Esquema do somador não inversor.

Adotando-se todos os resistores iguais a 10 k Ω encontra-se a função de transferência do somador não inversor que corresponde à equação (5) e, como pode ser visto, a tensão na saída do somador (V_o) é igual à soma das tensões de entrada V_1 e V_2 .

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (5)$$

2.1.3. Amplificação

O sinal com nível DC é amplificado por um Amplificador de Ganho Programável figura 6, interno ao PSoC, diminuindo as interferências externas e tornando possível a reconfiguração do ganho de forma simples, bastando selecionar o valor de ganho mais adequado ao sinal, através da interface com o usuário.

A amplitude máxima do sinal após amplificação deverá ser de dois volts de pico, pois o PSoC possibilita o trabalho com sinais de 0 à 5V, tendo uma faixa de segurança de meio volt de pico.

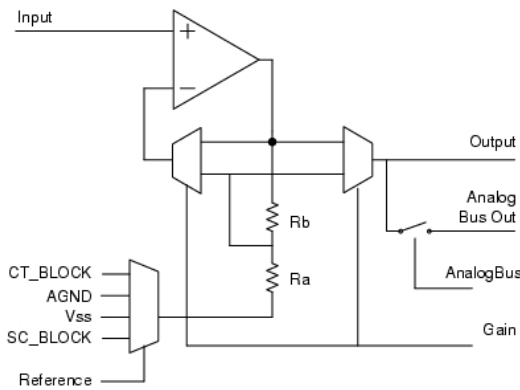


Fig. 6. Esquema do amplificador de ganho programável.

Para a aplicação em vista, que é a medição de vibração em ambiente de geração de energia elétrica, foi definido os seguintes valores de ganho da tabela 1.

Tabela 1. Valores de ganho

Ganho	
1	2.92
1.12	3.2
1.24	3.56
1.36	4
1.5	4.54
1.62	5.34
1.74	6.4
1.86	8
2	10.66
2.12	16
2.28	32
2.46	48
2.66	96

2.1.4. Eliminação do nível DC na saída do PGA

O filtro passa altas da figura 3 foi utilizado para eliminação do nível DC.

2.1.5. Filtragem

O filtro passa baixas é responsável pela eliminação da maior parte dos ruídos injetados no sinal. A frequência de corte desse filtro é determinada pelo usuário através da interface gráfica, mostrada na figura 13. Devido às características de reconfigurabilidade do condicionador adota-se um filtro baseado na tecnologia a capacitor chaveado. Para sua reconfiguração é suficiente alterar a

frequência do sinal do relógio. Ficando o PSoC responsável por gerar o clock, logo, pela flexibilidade de contadores internos que o PSoC possui, estes são utilizados para dividir o clock para valores adequados a cada frequência de corte.

Como o condicionador possui uma ampla faixa com frequência e ganho constante adota-se um fator de qualidade igual a 160, mas ocorre o aumento do ganho próximo a frequência de corte. O Filtro utilizado foi o LMF 100.

A função de transferência do filtro passa baixas [6] se encontra na equação (6), onde H_{OLP} representa o ganho do filtro e ω_0 a frequência de corte em radianos por segundo.

$$H(s) = -\frac{H_{OLP}\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (6)$$

$$H_{OLP} = -\frac{R_4}{R_1} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_2}{R_4}} \times \frac{R_3}{R_2} \quad (8)$$

$$f_0 = \frac{f_{clk}}{50} \times \sqrt{\frac{R_2}{R_4}} \quad (9)$$

Para calcular os componentes foi adotado fator de qualidade (Q) igual a 160, ganho unitário, R_2 e R_4 iguais a 10 k Ω . Substituindo-se nas equações (7) e (8) obtêm-se os valores de R_1 igual a 10 k Ω e R_3 igual a 1,6 M Ω . Com os valores obtidos para os componentes e utilizando-se da equação (9) foi extraída a relação em que a frequência do clock é 50 vezes maior do que a frequência de corte desejada. As equações foram obtidas no datasheet do filtro [6].

Com os valores dos componentes calculados encontrou-se a função de transferência do filtro para a maior frequência de corte possível que é de 10 kHz, equação (10) e foi plotada a curva de resposta do sistema, figura 7.

$$H(s) = -\frac{3,94 \times 10^9}{s^2 + s392,5 + 3,94 \times 10^9} \quad (10)$$

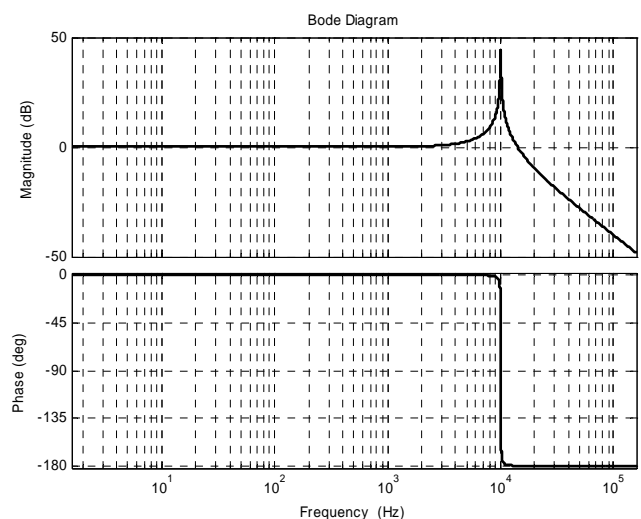


Fig. 7. Resposta em frequência do filtro passa baixas.

Para o filtro com uma frequência de corte de 10 kHz, tem-se uma região de fase e ganho constante até 1.5 kHz essa é a maior região que o condicionador pode assumir, pois os outros valores de frequência de corte são inferiores a 10 kHz conforme pode ser visto na tabela 2. E para gerar o

Tabela 2. Valores de frequência de corte

Frequência de Corte (Hz)	
1.000	6.000
2.000	7.000
3.000	8.000
4.000	9.000
5.000	10.000

2.1.6. Amplificador Inversor

O sinal na saída do filtro passa baixas está defasado de 180° em relação ao sinal de entrada, para corrigir essa fase foi implementado um amplificador inversor, figura 8, que terá também a função de ajuste fino (calibração) do valor de ganho através de um potenciômetro de ajuste. Na função de transferência, equação (11), o ganho é representado por k.

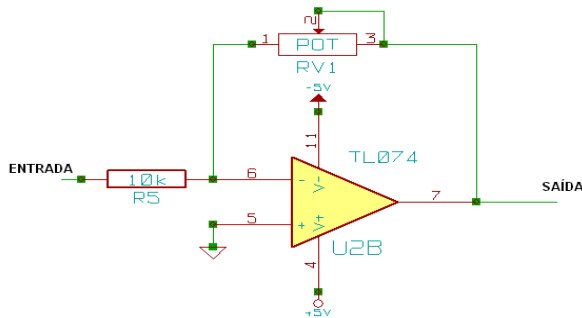


Fig. 8. Esquema do amplificador inversor.

$$V_{saída} = -k \times V_{entrada} \quad (11)$$

2.1.7. Comunicação

Para efetuar a comunicação do módulo de condicionamento de sinais com o computador, foi utilizado o Módulo UART do PSoc, comunicação serial assíncrona, e também o MAX 232 para converter para os níveis de comunicação RS232. E para que se tenha a comunicação USB será inserido no projeto um conversor RS232 em USB. A velocidade de comunicação é igual a 115.200 bits/segundo.

2.2. Módulo de digitalização

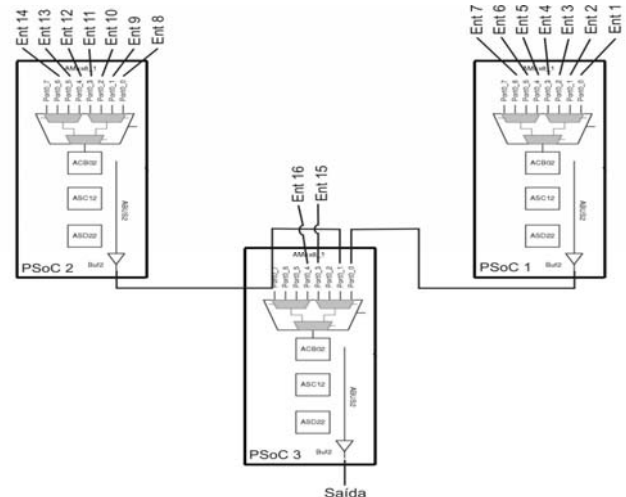
Este módulo é responsável pela digitalização do sinal analógico do módulo de condicionamento de sinais. Através da inserção de nível DC de 2.5 V no sinal para que possa ser multiplexado e então digitalizado.

2.2.1. Adição de nível DC no sinal tratado pelo módulo de condicionamento de sinais

Para adicionar o nível DC ao sinal foi utilizado um somador não inversor conforme figura 5.

2.2.2. Multiplexação dos sinais

Para a digitalização dos dezesseis canais houve a multiplexação dos sinais por um MUX 16x1, formado por três PSoc's, uma vez que cada PSoc pode multiplexar somente sete canais (MUX 8x1) como entrada e um como saída. O esquema do multiplexador pode ser visto na figura 9.



inicializar o sistema este fica em modo de espera até que um sinal seja enviado, do computador para o módulo. Este comando possui um sinalizador para indicar qual canal será configurado, sendo testado para identificar se o valor corresponde a algum canal. Caso seja falso o programa retorna para o modo de espera e se verdadeiro serão verificados os demais bits do comando para identificar se a configuração será do ganho ou da frequência de corte e que valores devem assumir. Se o restante do comando não for identificado o programa retorna para o modo de espera. Na figura 11 é apresentado o fluxograma do software para dois canais, ou seja, um módulo de condicionamento de sinais. Para os demais canais o software sofre alteração no endereço do canal, para que estes sejam configurados.

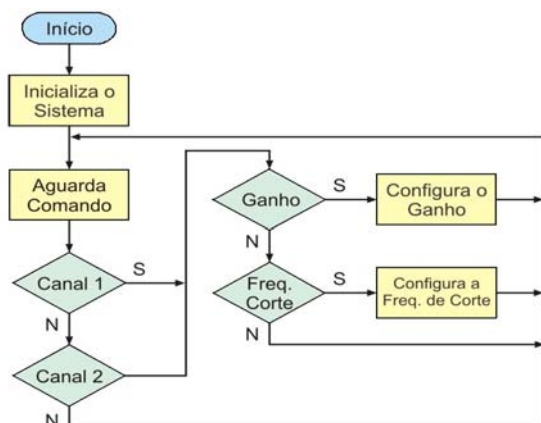


Fig. 11. Fluxograma do software do PSoC do módulo de condicionamento de sinais.

2.3.2. Software do módulo de digitalização

Ao iniciar o software do módulo de digitalização o programa entra em modo de espera, aguardando o envio do comando para digitalização. Caso seja falso fica em espera e se verdadeiro será iniciada a multiplexação do primeiro canal para o conversor analógico digital e envia as amostras para o computador via RS232 ou USB. Em seguida o processador verifica se recebeu a instrução para parar a digitalização, caso seja verdadeiro ele entra em espera e se falso inicia a multiplexação do segundo canal para digitalização e envio para o computador. Verifica novamente se recebeu a instrução de parada e refaz o processo para todos os canais, entra em um loop, até receber uma instrução de parada conforme pode ser visto no fluxograma da figura 12.

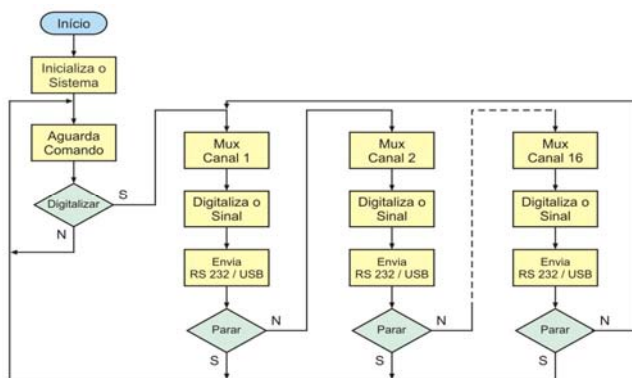


Fig. 12. Fluxograma do software do PSoC do módulo de digitalização.

2.4. Interface com o usuário

A interface com o usuário foi desenvolvida utilizando-se a versão 8.2 do software LabView. Nesta interface deve-se configurar a porta que será utilizada no computador, o canal a ser utilizado, os valores de ganho e frequência de corte do(s) respectivo(s) canal(s), repetindo-se esse procedimento para os demais canais, de acordo com a interface gráfica mostrada na figura 13.

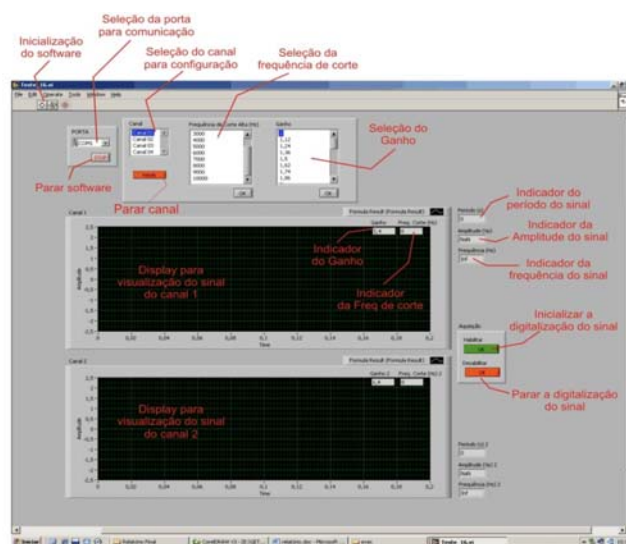


Fig. 13. Interface de configuração.

3. SISTEMA IMPLEMENTADO

Com o projeto elaborado foram confeccionadas as placas do condicionador de sinais. Sendo composto por placa mãe, a qual é responsável pela multiplexação e digitalização dos sinais. E placas de amplificação e filtragem, como o próprio nome remete são responsáveis pelo condicionamento, ou seja, amplificam e filtram os sinais. As placas podem ser visualizadas na figura 14.

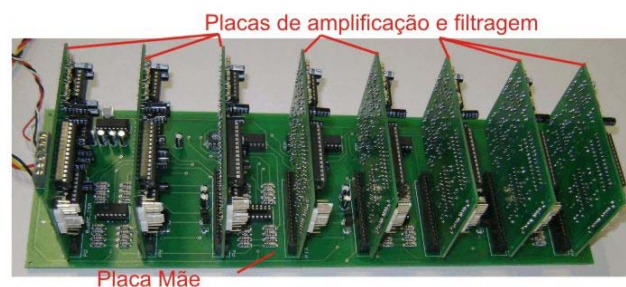


Fig. 14. Placa mãe e placas de amplificação e filtragem.

3.1. Características do Condicionador de Sinais

Devido aos valores de frequências de corte diferentes têm-se curvas de resposta do sistema distintas, uma vez que as regiões de ganho e fase constante dependem diretamente da configuração da frequência de corte. Foram plotadas as curvas de resposta do condicionador para as frequências de corte de 1 kHz e de 10 kHz, já que estes são o menor e maior valor que o condicionador pode assumir.

Na figura 15 apresenta-se a resposta do condicionador de sinais para uma frequência de corte de 1 kHz, o que possibilita uma região de fase e ganho constante de 0.5 Hz à 150 Hz.

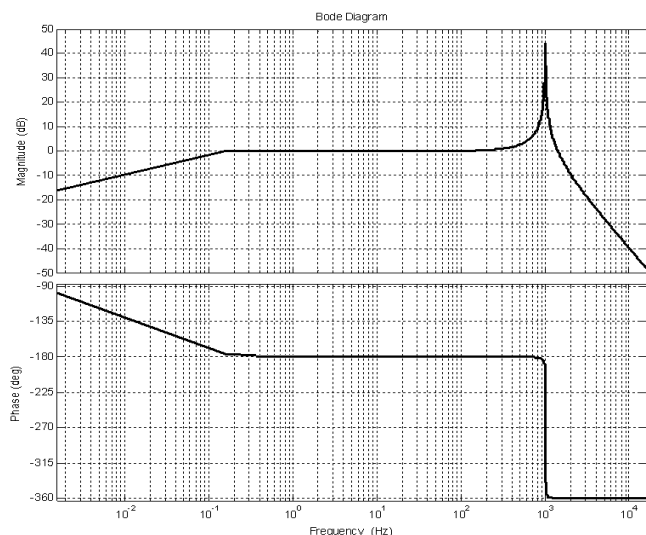


Fig. 15. Resposta em frequência do condicionador para frequência de corte igual a 1 kHz.

Na figura 16 tem-se a resposta do condicionador de sinais para uma frequência de corte de 10 kHz, a qual possui uma região de fase e ganho constante de 0.5 Hz à 1.5 kHz.

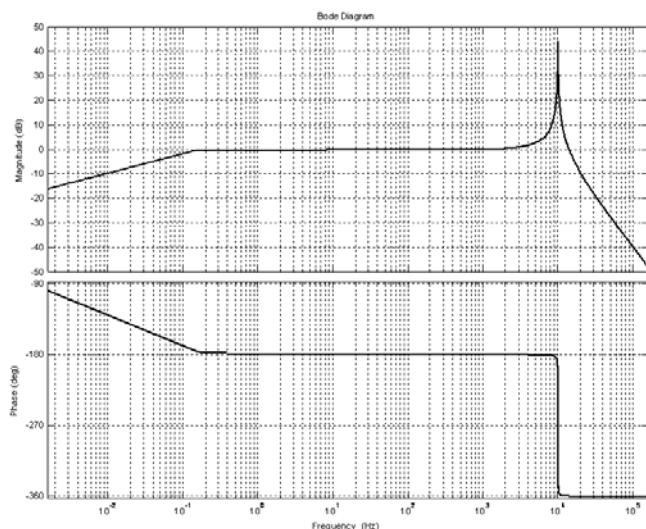


Fig. 16. Resposta em frequência do condicionador para frequência de corte igual a 10 kHz.

4. RESULTADOS

Para realização de alguns testes o condicionador foi configurado com alguns valores de frequência de corte e de ganho. O sinal de vibração foi obtido por um gerador de vibrações mecânicas (shaker) acoplado a um acelerômetro IEPE (integrated electronic piezoelectric), fornecendo um sinal senoidal com um nível DC de valor desconhecido.

No primeiro teste o sinal fornecido pelo acelerômetro, sinal 1 da figura 25, possui uma frequência de 1 Hz e amplitude de 500mV. O canal 1 do condicionador foi configurado com ganho 4 e frequência de corte de 1 kHz resultando em sua saída o sinal 2 da figura 17 com uma amplitude 2 V. O canal 2 do condicionador configurado com ganho 6.4 e frequência de corte de 1.5 kHz, resultou em um sinal de saída com amplitude de 3.2 V conforme sinal 3 da figura 17. Como pode ser visto nos resultados apresentados

na figura 17 as respostas do condicionador não apresentam defasamento em relação ao sinal de entrada.

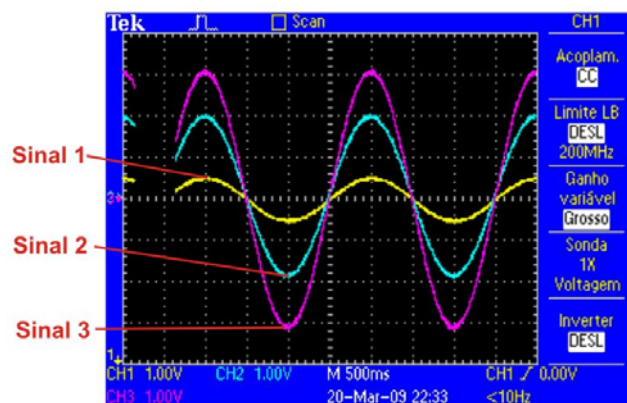


Fig. 17. Resposta do condicionador para um sinal de entrada 500 mV e 1 Hz

No segundo teste o sinal fornecido pelo acelerômetro, sinal 1 da figura 26, possui uma frequência de 100 Hz e amplitude de 500mV. O canal 1 do condicionador foi configurado com ganho 4 e frequência de corte de 7 kHz resultando em sua saída o sinal 2 da figura 18 com uma amplitude 2 V. O canal 2 do condicionador configurado com ganho 6.4 e frequência de corte de 8 kHz, resultou em um sinal de saída com amplitude de 3.2 V conforme sinal 3 da figura 18. Como pode ser visto nos resultados apresentados na figura 18 as respostas do condicionador não apresentam defasamento em relação ao sinal de entrada.

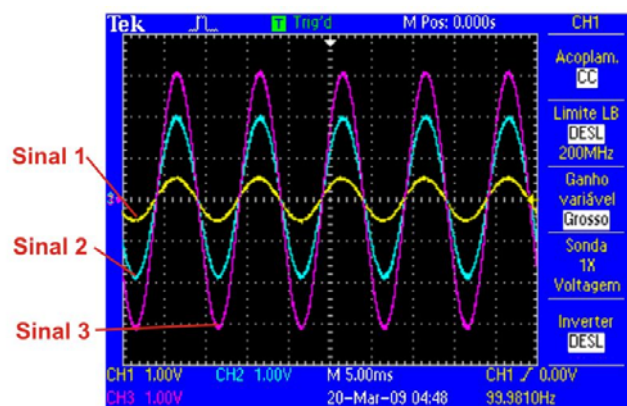


Fig. 18. Resposta do condicionador para um sinal de entrada 500 mV e 100 Hz.

No terceiro teste o sinal fornecido pelo acelerômetro, sinal 1 da figura 19, possui uma frequência de 1 kHz e amplitude de 500 mV. O canal 1 do condicionador foi configurado com ganho 6.4 e frequência de corte de 7 kHz resultando em sua saída o sinal 2 da figura 19 com uma amplitude 3.3 V. Com o aumento da frequência de vibração do acelerômetro e a partir de certo ponto, ocorre variação no ganho e na fase do sinal de saída. A amplitude do sinal de saída do canal 1 deveria ser 3.2 V, mas está em 3.3 V. Como pode ser visto a variação está bem baixa, mas se houver um aumento na frequência de vibração do acelerômetro ocorrerá uma maior variação dos valores de ganho e fase.

Para resolver esse problema o canal 2 foi configurado com frequência de corte de 8 kHz e ganho 2, obtendo um sinal de saída com amplitude de 1 V conforme sinal 3 da

figura 19. Como pode ser visto com o aumento da frequência de corte não houve variação no ganho e nem na fase do sinal da saída do canal 2.

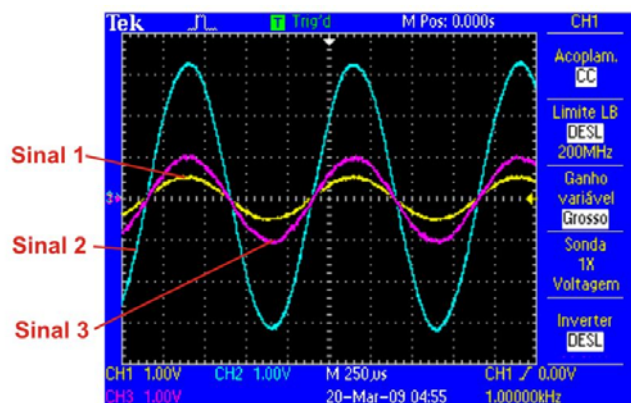


Fig. 19. Resposta do condicionador para um sinal de entrada 500 mV e 1 kHz.

E no ultimo teste o sinal fornecido pelo acelerômetro, sinal 1 da figura 20, possui uma frequência de 1.5 kHz e amplitude de 500 mV, essa é a vibração máxima que o condicionador apresenta fase e ganho constante. O canal 1 do condicionador foi configurado com ganho 4 e frequência de corte de 10 kHz resultando em sua saída o sinal 2 da figura 20 com uma amplitude 2 V. O canal 2 do condicionador configurado com ganho 6.4 e frequência de corte de 10 kHz, resultou em um sinal de saída com amplitude de 3.2 V conforme sinal 3 da figura 20. Como pode ser visto nos resultados apresentados na figura 20 as respostas do condicionador não apresentam defasamento em relação ao sinal de entrada.

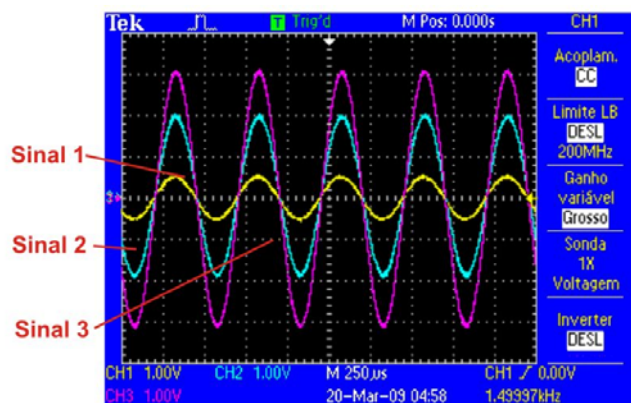


Fig. 20. Resposta do condicionador para um sinal de entrada 500 mV e 1.5 kHz

5. CONCLUSÕES

Com a utilização da tecnologia SoC a implementação obtida possui um número reduzido de componentes do que seria em uma implementação com componentes discretos, permitindo um nível de compactação adequado à aplicação pretendida e tornando o sistema menos vulnerável a interferências externas, dando maior confiabilidade as medições. Além disso, a defasagem do sinal de entrada em relação ao de saída pode ser desprezada validando o condicionador de sinais reconfigurável para o monitoramento e balanceamento, o que facilita a determinação dos pontos em que se deve aplicar contrapesos para balanceamento de máquinas rotativas.

AGRADECIMENTOS

Às Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte) pelo financiamento e disponibilidade de equipamentos de teste, sem os quais não seria possível a validação do protótipo obtido. Ao Laboratório de Sistemas Eletrônicos (LSE) da UFPA pelo apoio material representado por todas as suas instalações.

REFERÊNCIA

- [1] Adrian Sampaio; "TPM – Manutenção Produtiva Total" <http://www.mantenimentomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/TPMtotal.pdf>, obtido no dia 04 de fevereiro de 2009.
- [2] Paulo Henrique de Almeida Moraes; "MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL: estudo de caso em uma empresa automobilística" Dissertação de Mestrado apresentada a ECA da Universidade de Taubaté; 2004, Brasil.
- [3] Pietrzak, P.; Tylman, W.; Kulesza, Z.; Pekoslawski, B.; Mularczyk, M.; Napieralski, A.; Signal Conditioning Based On Programmable Analog Circuits; Mixed Design of Integrated Circuits and System, 2006. MIXDES 2006. Proceedings of the International Conference 22-24 June 2006 Page(s):387 - 392
- [4] Gerfers, F.; Kohlstadt, M.; Li-Peng Wang; Bar, H.; Northemann, T.; Kuderer, M.; Buhmann, A.; Manoli, Y.; An Ultra Low-Noise Vibration Monitoring System Sensors; 2007 IEEE 28-31 Oct. 2007 Page(s):880 - 883
- [5] R. C. Battelocchi, D. E. Campion; "Microcontrolador PSoC", Érica, 2006.
- [6] "Datasheet do Filtro a Capacitor Chaveado LMF100" <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005645.PDF>, obtido no dia 20 de abril de 2009.