

PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM UMA MÁQUINA DE VIBRAÇÃO ELETRODINÂMICA¹

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INSTRUMENTATION FOR MEASUREMENT OF ELECTRIC CURRENT IN AN ELECTRODYNAMIC VIBRATION MACHINE

Rodrigo Varella Tambara², Leandro Della Flora³ e Hilton Abílio Gründling⁴

RESUMO

Neste artigo, apresentam-se o projeto e a implementação de instrumentação para medição de corrente elétrica em uma máquina de vibração eletrodinâmica. A instrumentação proposta apresenta dois canais para medição de correntes em uma faixa de frequências de 0 a 2 kHz, com amplitude máxima de 15 A. Através de um método adequado, a calibração da instrumentação foi realizada e os resultados obtidos foram analisados. Foi verificado que a instrumentação apresenta medidas confiáveis e pode ser utilizada no controle de aceleração de máquinas de vibração eletrodinâmicas.

Palavras-chave: sensor de efeito Hall, máquina de vibração eletrodinâmica, medição de corrente elétrica, condicionador de sinais.

ABSTRACT

This paper presents the design and the implementation of instrumentation for measurement of electric current applied to electrodynamic vibration machine. The proposed instrumentation presents two channels for measurement of currents in a frequency range from 0 to 2 kHz and with maximum amplitude equal to 15 A. Through an appropriate method, the calibration of the instrumentation was accomplished and the obtained results were analyzed. It was verified that the instrumentation is reliable and can be used in acceleration control schemes for electrodynamic vibration machines.

¹ Trabalho de Iniciação Científica - UFSM.

² Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica - UFSM

³ Co-autor – Doutorando do PPGE/UFSM.

⁴ Orientador – UFSM.

Email: rodvarella@yahoo.com.br

Keywords: *Hall effect sensor, electrodynamic vibration machine, measurement of electric current, signal conditioning.*

INTRODUÇÃO

Ensaio de vibração têm sido largamente realizados pela indústria aeroespacial, mecânica e eletroeletrônica devido à necessidade de assegurar a confiabilidade e durabilidade de equipamentos sujeitos à vibração em regime de trabalho. Em grande parte desses ensaios, são utilizadas máquinas de vibração eletrodinâmicas. Essas máquinas podem operar numa ampla faixa de frequências e ensaiar desde pequenas até grandes massas. Pelo fato de existirem normas que regulamentam a realização desses ensaios, torna-se importante a sua automatização. Della Flora (2005) desenvolveu um sistema de controle de aceleração de uma máquina de vibração eletrodinâmica. Nesse sistema, duas grandezas são medidas: a aceleração da mesa de vibração e a tensão que alimenta a armadura da máquina, necessitando-se, ainda, de medição de corrente elétrica para comparação com sistemas que manipulam correntes para ajuste da aceleração.

Nesse contexto, no presente trabalho, tem-se o objetivo de desenvolver e implementar uma solução para medição de corrente elétrica em uma máquina de vibração eletrodinâmica. São apresentadas a estrutura e as principais características do circuito eletrônico empregado, com descrição detalhada do sensor de corrente por efeito *hall* utilizado, bem como do procedimento de projeto e análise dos circuitos de pré-amplificação e condicionamento de sinais. O desempenho é avaliado por meio de resultados experimentais e de simulação. Através de um procedimento adequado de calibração, determinam-se a sensibilidade e a margem de erro de medição da solução proposta. Por fim, com os dados obtidos, são realizadas a análise dos resultados, discussões e conclusões do trabalho.

ESTRUTURA DO CIRCUITO ELETRÔNICO

Pela necessidade de se realizarem testes com medidas de duas correntes simultaneamente, a instrumentação foi projetada com dois canais. Além disso, como os ensaios abrangem frequências de até 2 kHz, necessita-se de uma instrumentação que apresente bom desempenho nessa faixa de frequência. Na figura 1, mostra-se o diagrama de blocos do circuito eletrônico proposto.

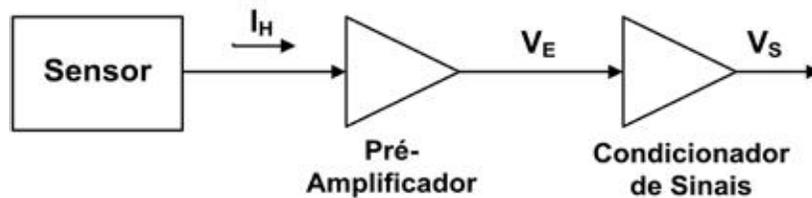


Figura 1. Diagrama do circuito eletrônico proposto.

De acordo com esse diagrama, a utilização de um sensor de corrente tipo efeito *hall* resulta em uma corrente elétrica I_H proporcional à corrente a ser medida. Um circuito pré-amplificador converte I_H em um nível de tensão V_E , a qual é amplificada e filtrada por um condicionador de sinais, resultando em uma tensão de saída V_S proporcional à corrente elétrica a ser medida.

Na figura 2, apresenta-se de forma simplificada, o diagrama esquemático do circuito eletrônico proposto para a medição de corrente. Pelo fato de os dois canais serem idênticos, será mostrado o circuito referente a um canal apenas.

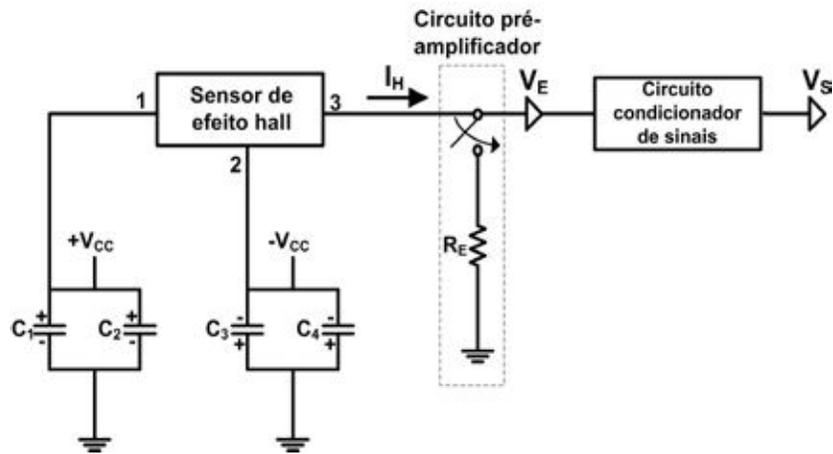


Figura 2. Circuito eletrônico proposto.

A solução proposta consiste de um sensor de efeito *hall*, um pré-amplificador (identificado por R_E) com seleção de escala de corrente e um circuito condicionador de sinais, projetados a partir de um amplificador operacional TL084. Adicionalmente, capacitores para minimização de transientes e ruídos são colocados tanto nos sensores de efeito *hall* quanto na alimentação.

SENSOR DE CORRENTE POR EFEITO HALL

Foi utilizado o sensor de corrente por efeito *hall* modelo LA 55-P, fabricado por LEM. Na figura 3, apresenta-se uma ilustração desse sensor com o cabo que passa em seu centro. Por esse cabo, circula a corrente I_E (corrente de entrada) que será medida. No pino 3 do sensor, circula a corrente I_H (corrente do secundário do sensor *hall*) que é a milésima parte da corrente I_E . A partir da relação dessas duas correntes, é projetado o circuito pré-amplificador.

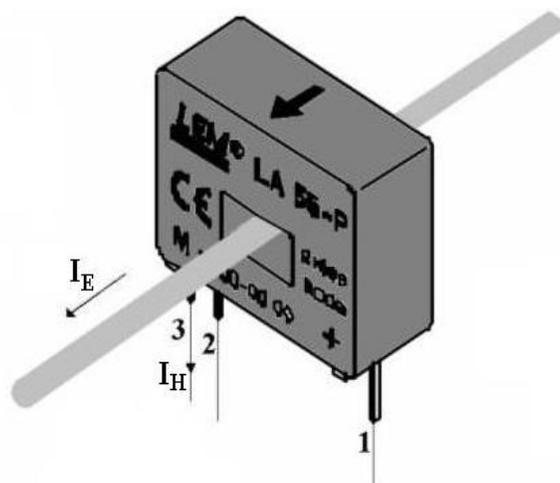


Figura 3. Sensor de Corrente por Efeito Hall

CIRCUITO PRÉ-AMPLIFICADOR

O circuito pré-amplificador tem a função de produzir uma tensão V_E a partir da corrente I_H . Desse modo, é possível selecionar diferentes escalas de correntes, conforme o nível da corrente elétrica de entrada I_E . A instrumentação apresenta três escalas: 5, 10 e 15 A. Cada escala corresponde a uma faixa de massa que será ensaiada na máquina de vibração.

Admitindo-se que a impedância de entrada do circuito condicionador de sinais é suficientemente grande para considerar que toda a corrente I_H circula pelos resistores de seleção de escala R_E (Figura 2), surge uma diferença de potencial V_E entre os terminais do resistor proporcional à corrente I_H . Como a máxima tensão desejada na entrada do circuito condicionador de sinais é de 5 V para as três escalas de corrente, e sabendo-se que $I_H = I_E \cdot 10^{-3}$, podem-se calcular as resistências de escala R_E usando-se a seguinte equação,

$$R_E = \frac{5V}{I_{Emax} \cdot 10^{-3}} \quad (1)$$

sendo I_{Emax} a máxima corrente de entrada (5, 10 ou 15 A).

CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS

O circuito condicionador de sinais tem a função de converter e filtrar a tensão do resistor de escala para um nível adequado ao conversor A/D (analógico/digital). Esse nível corresponde a uma tensão que varia somente entre 0 e 5 Volts.

O circuito condicionador de sinais implementado é formado por dois canais, em que cada canal condiciona um sinal de tensão referente a uma corrente, I_{E1} ou I_{E2} (que são as duas correntes de entrada).

O primeiro passo para a elaboração do circuito condicionador consiste na escolha da topologia do circuito. Pelo fato de os canais serem idênticos, as análises serão realizadas em relação a um canal apenas.

Na figura 4, mostra-se o diagrama esquemático do circuito condicionador de sinais. Cada canal é formado por dois estágios de amplificação e filtragem:

1º estágio (V_E a V_I): amplificador inversor com offset e filtro passa-baixas;

2º estágio (V_I a V_S): amplificador inversor de ganho unitário e filtro passa-baixas.

No primeiro estágio, o sinal senoidal de entrada ($V_E = V_{EM} \cdot (\sin \omega t)$), com amplitude V_{Em} , é atenuado e somado a um nível médio CC de - 2,5 V, resultando em um sinal de saída igual a $V_I = - [V_{IM} \cdot \sin(\omega t) + 2,5]$. O segundo estágio tem a função de inverter o sinal de saída do primeiro estágio, resultando em $V_S = V_{Sm} \cdot \sin(\omega t) + 2,5$.

Além de amplificar, o circuito condicionador possui filtros passa-baixas que têm a função de atenuar os sinais de alta frequência que possam interferir na medição. A característica dos passa-baixas é formada pela inserção de capacitores em paralelo com os resistores de realimentação.

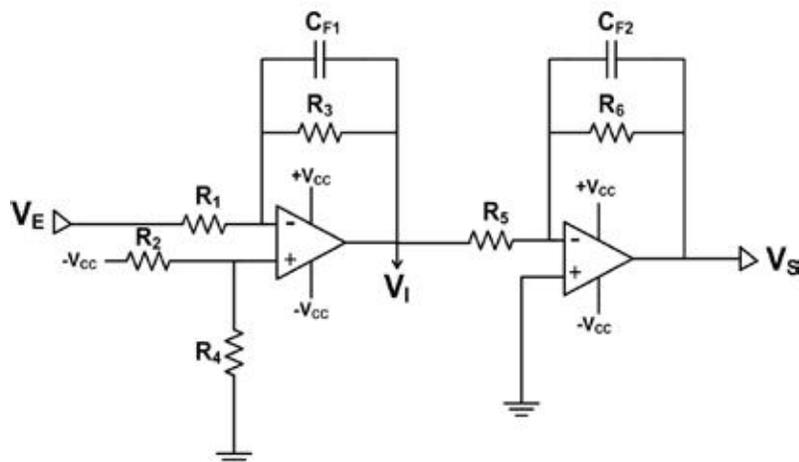


Figura 4. Circuito Condicionador de sinais.

ANÁLISE DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS

Para se projetarem os resistores e capacitores do circuito condicionador, foram realizadas a análise CC e a análise CA.

Na análise CC, consideram-se os capacitores circuito aberto e as fontes CA aterradas. A equação, a seguir, representa o nível CC do sinal de saída V_S

$$V_{SCC} = V_C \cdot \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_5} \right) \quad (2)$$

Na análise CA, consideram-se as fontes CC aterradas. A função de transferência $G(s)$, que relaciona o sinal CA de saída V_{SCA} em relação ao sinal CA de entrada V_{ECA} , é dada pela expressão abaixo,

$$G(s) = \frac{V_{SCA}}{V_{ECA}} \left(\frac{R_3 \cdot R_6}{R_1 \cdot R_5 \cdot (1 + R_3 \cdot s \cdot C_F) \cdot (1 + R_6 \cdot s \cdot C_E)} \right) \quad (3)$$

Da superposição dos sinais V_{SCA} e V_{SCC} , obtém-se o sinal de saída V_S . A partir das equações 2 e 3 e, considerando R_6 igual a R_5 (amplificador inversor de ganho unitário), vê-se que a escolha de R_1 e R_3 determina o grau de atenuação CA do circuito condicionador de sinais. R_2 e R_4 , com R_1 e R_3 e o nível de tensão V_{CC} , determinam a tensão de *offset* igual a 2,5 V, a qual é necessária em V_S . Os capacitores C_{F1} e C_{F2} e os resistores R_3 e R_6 impõem a frequência de corte inferior dos filtros passa-baixos.

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Os filtros passa-baixos foram projetados para uma frequência de corte superior igual a 20 kHz. Para se analisar o comportamento do ganho e da fase em função da frequência, determinou-se, através de simulação, o diagrama de Bode do circuito condicionador de sinais (Figura 5).

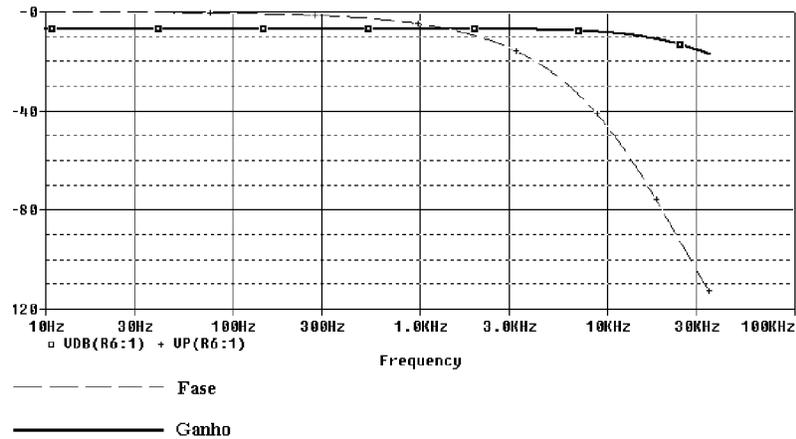


Figura 5. Diagrama de Bode do circuito condicionador de sinais.

Pode-se verificar que o ganho é praticamente constante e a fase é menor que 10° na máxima frequência de operação (2 kHz).

CALIBRAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

Com o objetivo de obter a sensibilidade média, o desvio médio e o desvio máximo de cada canal, procedeu-se à realização de calibração da instrumentação proposta.

Através das sensibilidades médias, é possível calcular a corrente medida pela instrumentação. A corrente de saída I_s (medida pela instrumentação) é obtida pela equação abaixo

$$I_{S(1,2)} = \frac{V_{SCA(1,2)}}{S_{(1,2)}} \quad (4)$$

em que S é a sensibilidade do canal 1 ou 2. O erro percentual da medição é obtido pela equação a seguir:

$$\text{Erro}\%_{(1,2)} = \frac{I_{S(1,2)} - I_{E(1,2)}}{I_{E(1,2)}} \times 100\% \quad (5)$$

Na calibração, utilizou-se uma fonte de potência de corrente alternada como fonte de tensão, resistências operando como carga e um osciloscópio para medição das tensões e correntes. Na figura 6, apresenta-se o diagrama da plataforma de calibração.

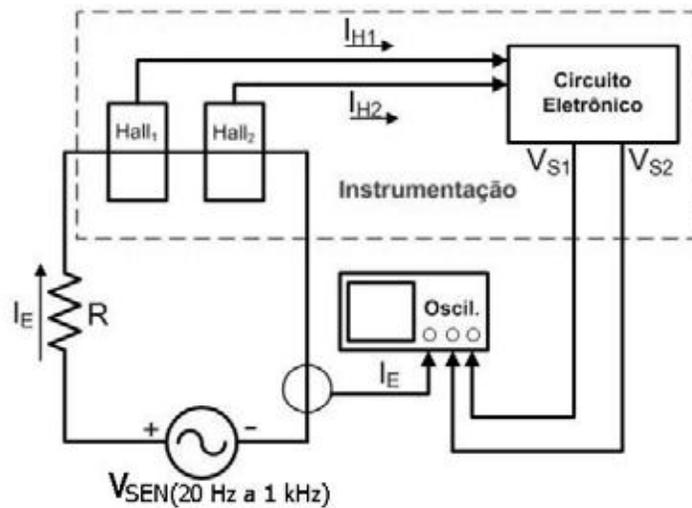


Figura 6. Diagrama da plataforma de calibração.

Como procedimento experimental, foram seguidos os seguintes passos:

1º) injeção de correntes na resistência R com amplitudes variáveis entre 0,1 e 5 ampéres;

2º) para cada corrente, variou-se a frequência entre 20 Hz e 1 kHz (limites inferior e superior determinados pela fonte de potência CA);

3º) a partir das correntes injetadas na instrumentação, mediu-se com o osciloscópio a corrente de entrada I_E (medida da corrente na resistência R) e as componentes CA das tensões V_{S1} e V_{S2} do canal 1 e 2, respectivamente.

Com os dados experimentais, foi determinada a sensibilidade média de cada canal, desvio máximo percentual e desvio médio percentual.

RESULTADOS

O canal 1 apresentou sensibilidade média igual a 455 mV/A, desvio máximo de 7,98% e desvio médio de 1,94%. O canal 2 apresentou sensibilidade média de 446 mV/A, desvio máximo de 14,49% e desvio médio de 2,38%. Para cada canal, foram traçados três gráficos: erro percentual em função da corrente de entrada para diferentes frequências, corrente de saída em função da corrente de entrada para diferentes frequências e sensibilidade em função da frequência. Nas figuras 7 a 12, mostram-se gráficos correspondentes aos resultados da calibração.

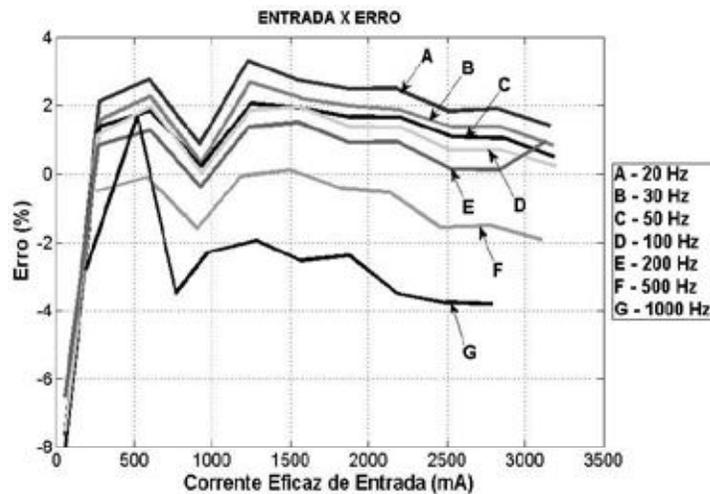


Figura 7. Erro em função da corrente de entrada no canal 1.

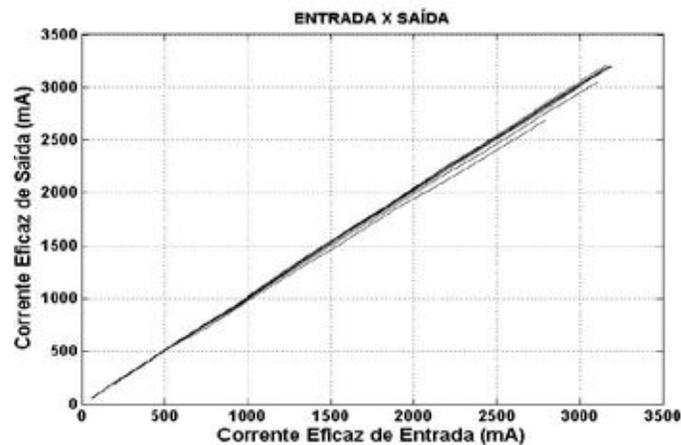


Figura 8. Corrente de saída em função da corrente de entrada no canal 1.

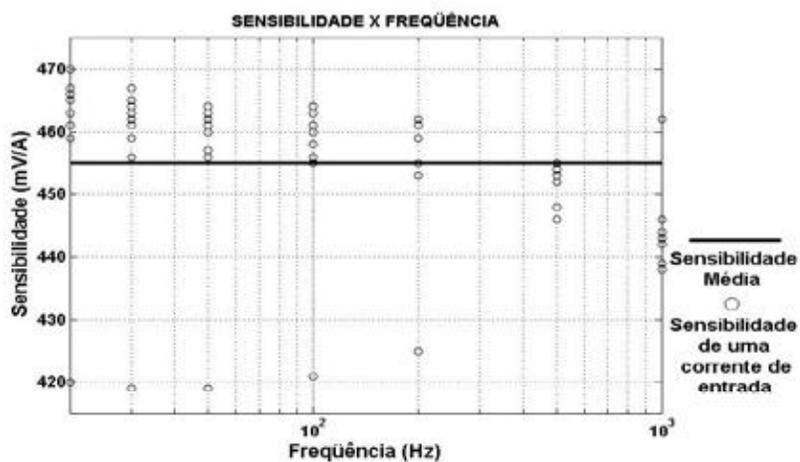


Figura 9. Sensibilidade em função da freqüência no canal 1.

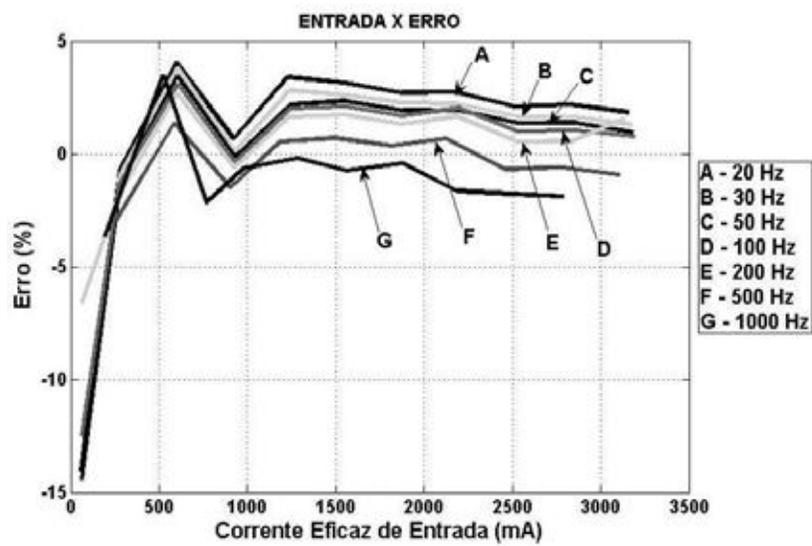


Figura 10. Erro em função da corrente de entrada no canal 2.

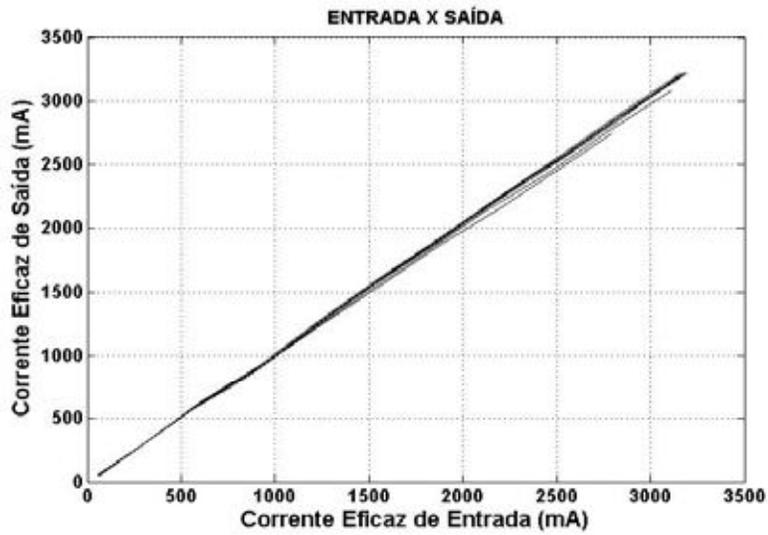


Figura 11. Corrente de saída em função da corrente de entrada no canal 2.

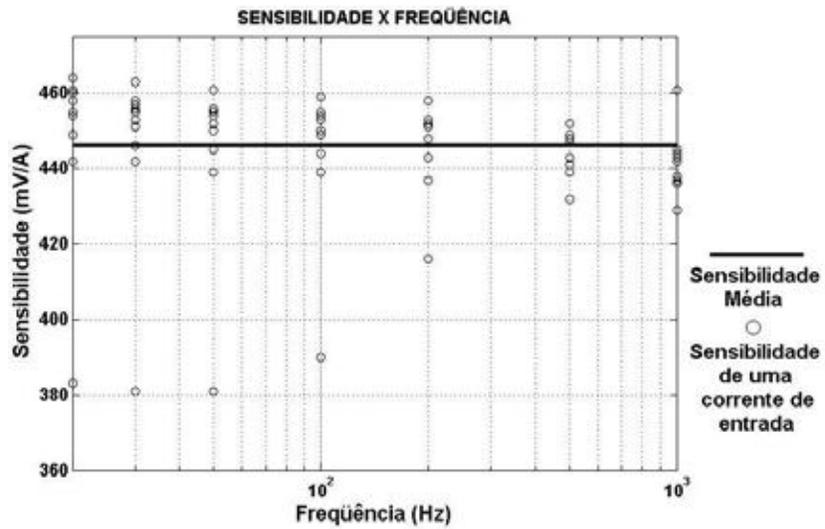


Figura 12. Sensibilidade em função da frequência no canal 2.

DISCUSSÃO

O fato de a calibração indicar erro máximo de 7,98% no canal 1, e 14,49%, no canal 2, deve-se preponderantemente à ação de ruídos eletromagnéticos que alteram a medida de corrente em baixas amplitudes (próximo a 100 mA).

Através das figuras 8 e 11, pode-se verificar que a instrumentação apresenta boa linearidade na relação corrente de saída/corrente de entrada para diferentes frequências. O desempenho do sistema não foi avaliado em frequências superiores a 1 kHz devido à limitação da capacidade de operação da fonte de potência CA disponível. Para a faixa de frequência de 1 kHz a 2 kHz, estudos e implementações adicionais são necessários para corroborarem os resultados teóricos obtidos por simulação.

CONCLUSÃO

Uma instrumentação para medição de corrente elétrica em uma máquina de vibração eletrodinâmica foi apresentada. A solução proposta consiste de dois canais de medição, utilizando sensores de corrente tipo efeito *hall*, circuito pré-amplificador e circuito de condicionamento de sinais. Resultados experimentais indicam bom desempenho para medição de correntes entre 500 mA e 15 A. O circuito desenvolvido tem capacidade de operação em frequências de até 1 kHz e erro médio inferior a 2,5%. A solução proposta está apta à aplicação em sistemas de controle de aceleração de máquinas de vibração eletrodinâmicas e será utilizada no laboratório do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle da Universidade Federal de Santa Maria.

REFERÊNCIAS

DELLA FLORA, L. **Controle de aceleração de uma máquina de vibração eletrodinâmica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Rio de Janeiro: