

Interface para Condicionamento das Tensões e Correntes à Saída de Conversores de Frequência

Vicente Leite⁽¹⁾, Henrique Teixeira⁽¹⁾, Rui Araújo⁽²⁾, Diamantino Freitas⁽²⁾

⁽¹⁾ Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
do Instituto Politécnico de Bragança
(CEFAT)
Quinta de Sta. Apolónia - Apartado 134
5300 Bragança, Portugal

⁽²⁾ Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto
(CEFAT - Centro de Estudos de Física,
Acústica e Telecomunicações)
Rua dos Bragas 4099 Porto Codex, Portugal

Resumo

Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de uma interface baseada num circuito electrónico de condicionamento e filtragem *anti-aliasing*, destinado à medida e/ou processamento do sistema trifásico de tensões e correntes à saída de um conversor de frequência industrial que alimenta um motor de indução trifásico.

Os sinais produzidos à saída do circuito da interface desenvolvida estão galvanicamente isolados do sistema de alimentação de potência, condicionados e filtrados, de modo a tornar possível a aquisição para PC ou outro qualquer sistema de processamento digital de sinal.

Palavras-chave: Filtro activo, *aliasing*, conversor de frequência, motor de indução trifásico.

1. Introdução

O motor de indução trifásico tem vindo a aumentar a sua utilização e a substituir os motores de corrente contínua e síncronos, devido às suas vantagens relativas, traduzidas na sua robustez, reduzida manutenção e baixo custo. Em relação às principais dificuldades relativas ligadas ao motor de indução, surge, de imediato a realização do seu controlo, no caso de se pretender um desempenho de elevada qualidade e, neste caso, a obtenção do conhecimento de modelos e respectivos parâmetros tem sido objecto de intenso estudo nas aplicações de controlo moderno. O desenvolvimento das tecnologias de aquisição e processamento digital de dados, nomeadamente, dos processadores digitais de sinal (DSP) e das teorias e técnicas de controlo, fez despontar uma grande actividade na identificação dos parâmetros do motor de indução trifásico. Neste contexto, e em trabalhos de estimação experimental como em [1], [2], [3], [4], [5] e [6], entre muitos outros, é indispensável a existência de uma interface adequada para a aquisição dos sinais de tensão e corrente que alimentam o motor, devidamente condicionados.

Na literatura encontram-se poucos trabalhos que se debruçam sobre o projecto e implementação prática destes sistemas de interface, excepção para [7] e [8]. A medida destas grandezas com boa precisão apresenta diversas dificuldades: por um lado, os sinais eléctricos possuem valores elevados e elevada distorção harmónica resultante do método

de síntese da tensão à saída do conversor de frequência e, por outro lado, as medidas são realizadas num ambiente com elevado nível de interferência electromagnética, dando origem ao aparecimento de vários erros na medida das grandezas. Na presente comunicação apresentamos a arquitectura do sistema electrónico desenvolvido, bem como uma análise dos erros existentes, e discutimos as soluções práticas utilizadas que permitem minimizar os vários erros existentes na medida.

Qualquer conversor de frequência provoca harmónicos, em percentagem e a frequências variáveis, dificultando assim a aquisição de medidas directas sem ocorrência de *aliasing* impondo-se por isso, limitar eficazmente a gama de frequências de passagem adaptando-a, por um lado às características dos sinais e, por outro, à frequência de amostragem utilizada. Esta razão reforça a importância e a necessidade desta interface.

2. Descrição do circuito

A interface, representada na figura 1, é baseada, fundamentalmente, em dois circuitos, por fase, um para a tensão e outro para a corrente, constituídos por três blocos principais: um transdutor isolado de efeito de *hall* de tensão ou de corrente, conforme o caso, um módulo de conversão corrente/tensão e um filtro activo passa-baixo de *Butterworth* de 8ª ordem.

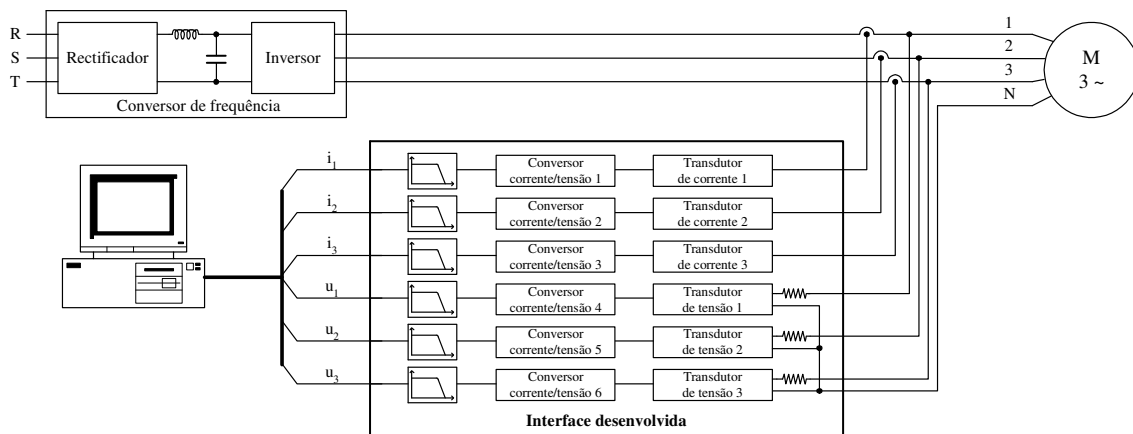


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema global.

Para uma utilização instrumental eficaz e segura é sempre necessário que as versões reais dos projectos electrónicos sejam preparadas dos pontos de vista da estabilidade e segurança da implementação, assim como da sua compatibilidade electromagnética. No presente caso a consideração destes aspectos levou à implementação da interface em duas cartas de circuito impresso, uma para a tensão e outra para a corrente, embutidas num invólucro metálico (caixa) para realizar a blindagem do circuito e uma estrutura de acessos de entrada/saída cuidada, designadamente através da utilização de cabos com blindagem, quer na parte de pequeno sinal quer na parte de potência, em consequência do nível elevado de interferência electromagnética provocado pelos sinais de frequências elevadas inerentes aos conversores de frequência associados ao controlo dos motores de indução.

O circuito desenvolvido permite captar os sinais de tensão e de corrente que alimentam o motor, devidamente isolados, condicionados e filtrados, para visualização, aquisição e posterior processamento em diversificadas aplicações de elevado interesse didáctico e científico, no contexto referido anteriormente.

2.1. Os transdutores de tensão e corrente com isolamento e conversão corrente-tensão

Os transdutores baseiam-se em dispositivos existentes no mercado e caracterizam-se por um funcionamento por anulação do fluxo produzido num toro magnético pela corrente do enrolamento (espiras) do sinal a medir, através de um fluxo opositor produzido pela corrente utilizada para a saída isolada. Esta anulação é controlada por um amplificador em que o sinal de erro provém de um detector magnético de *hall* inserido no referido toro. O isolamento galvânico é baseado no isolamento dieléctrico entre os enrolamentos. A imunidade ao ruído extrínseco provém da elevada rejeição de modo comum em modo de isolamento (IMRR) e da rejeição do modo comum do sistema de amplificação de erro que ainda permite uma transmissão de saída em anel de corrente, favorecendo a utilização prática do transdutor em ambiente normalmente ruidoso do ponto de vista electromagnético.

Os transdutores utilizados foram o LV 25-P e LA 55-P, para a tensão e corrente, respectivamente. Com a sua utilização, a interface permite adquirir tensões DC e AC até várias centenas de *volt*, sendo aqui a gama de valores definida pela resistência a colocar em série com o transdutor e que impõe a corrente nominal no primário. As correntes, por sua vez, podem ser DC e AC sendo a gama, neste caso, de $\pm 70A$.

A função de conversão corrente-tensão é, para todos os casos, assegurada por uma resistência com tolerância de 1% e elevada estabilidade (50 ppm/°C) a seguir isolada por um amplificador seguidor de tensão com reduzido *offset* e baixo ruído intrínseco.

2.2. Filtro activo

O filtro passa-baixo é baseado na tecnologia analógica activa, realizado pelo circuito integrado MAX274. Este filtro é programável através de um conjunto de resistências de precisão e os valores da frequência de corte podem, neste caso, ser programados entre 100Hz e 150kHz.

No desenvolvimento das especificações da interface, um dos critérios fundamentais é o da largura de banda proporcionada aos sinais recolhidos em face dos dois aspectos essenciais: distribuição em frequência do conteúdo harmónico relevante e a frequência de amostragem a usar no sistema de aquisição.

Nesta classe de motores/conversores é comum a frequência fundamental de alimentação variar desde 0Hz até ao dobro da frequência da rede, ou mesmo até aos 400Hz.

Se em algumas tarefas de medida basta e apenas deve ser contemplado o conteúdo dos sinais em frequência fundamental, noutras aplicações tal é manifestamente insuficiente comprometendo até o seu bom desempenho. Tal é o caso do estudo da composição harmónica dos sinais bem como das tarefas de identificação paramétrica nas quais o conteúdo harmónico de ordens relativamente elevadas pode assumir um carácter essencial [2] e [9]. Nos transitórios de carga do motor o conteúdo harmónico dos sinais tem uma importância mais elevada. Por estas razões adoptou-se uma concepção dos

filtros que permite alterar a frequência superior da banda passante quando tal for conveniente, assim como a ordem e a função de aproximação (*Butterworth*, *Chebyshev* e *Bessel*) dos filtros activos implementados.

Para as finalidades mais comuns adoptou-se uma frequência superior de corte dos filtros com o valor de 200Hz e utilizou-se a ordem 8 para a sua realização com uma atenuação de 48dB a uma oitava (400Hz). Com o intuito de estudar e verificar o conteúdo harmónico das tensões, bem como das correntes e assim possibilitar a análise da importância destes, designadamente na identificação paramétrica do motor de indução trifásico [2] e [9], foi modificada a banda passante para 1kHz (950Hz, na prática, por limitações nos valores comerciais dos componentes utilizados). A fim de conseguir a máxima uniformidade da resposta na banda passante implementaram-se os filtros com uma função de *Butterworth* em ambos os casos.

A consequência mais negativa desta filtragem *anti-aliasing* é o atraso de grupo introduzido, que é da ordem de 1ms em média na banda passante de 950Hz e 4ms na banda passante de 200Hz, podendo ser prejudicial, especialmente em aplicações de controlo. Além da escolha de frequências de corte mais elevadas, o tratamento desta questão pode ser realizado mediante a escolha de ordens inferiores e outros tipos de funções de aproximação dos filtros.

3. Análise dos erros da interface

Na presente secção apresentamos uma síntese dos erros presentes na aquisição dos sinais de tensão e intensidade de corrente, utilizando a interface. Identificamos como principais fontes de erro as inerentes:

- aos transdutores de tensão e de corrente quer no ganho quer na resposta em frequência;
- à resistência série à saída dos transdutores e amplificador operacional, nos circuitos de conversão do sinal em corrente para um sinal em tensão;
- à resistência série no primário do transdutor de tensão;
- à resposta em frequência do filtro implementado;
- à calibração da interface, através de um *trimmer*, com grandezas de entrada e de saída calibradas com determinados erros.

3.1. Erro de calibração na grandeza da entrada e da saída

Os sinais de entrada que utilizamos para calibrar a interface consistiram numa tensão/corrente sinusoidal à frequência de 50Hz. Para a temperatura de calibração e para o voltímetro utilizado, com precisão $\pm 0,8\% + 40 \text{ counts}$, e para o amperímetro, com precisão $\pm 0,9\% + 40 \text{ counts}$, conduz a um erro base total de $\approx \pm 1\%$ para os valores medidos da tensão e de $\approx \pm 1,1\%$ para os valores medidos da corrente. Os erros de calibração na grandeza de saída, são idênticos ao da grandeza de entrada.

3.2. Erros nos transdutores

O erro do transdutor de corrente é de $\pm 0,65\%$ da corrente nominal do primário, sendo a resposta em frequência muito elevada. Foi utilizada a corrente nominal do transdutor na

sua calibração. O erro do transdutor de tensão é de $\pm 0,6\%$ da corrente nominal do primário, sendo a resposta em frequência também muito elevada. É utilizada uma resistência série de modo a produzir a corrente nominal do primário à tensão nominal da rede. A precisão e a sensibilidade da resistência que é necessário incluir em série no primário do transdutor de tensão é de vital importância no erro de medida na aquisição da tensão. Em geral para a resistência a colocar em série com este transdutor, escolher-se-á uma resistência com uma sensibilidade térmica de $3,3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ - para um erro de $0,5\%$.

3.3. Erro de *aliasing* à frequência de corte do filtro

Foram realizados testes com duas frequências de corte dos filtros, 200Hz e 950Hz, como referido anteriormente. Adoptando o critério de localização da frequência de *Nyquist* mínima a meio da banda de transição do filtro, portanto a meia oitava acima da frequência de corte f_p ($f_p \times 2^{1/2} \approx 1.41 \times f_p$), a amostragem pode assim realizar-se à frequência mínima teórica de $2.8 \times f_p$, que é de 560Hz, no primeiro caso e 2.66kHz no segundo. Assim, no caso de f_p igual a 200Hz, por exemplo, a contaminação por *aliasing* com amplitude inicial de 0dB não ultrapassará -48dB ou 0,4% do máximo.

4. Resultados dos testes da interface

Os resultados apresentados foram obtidos com um motor de indução trifásico de 4 kW de potência e 1500rpm de velocidade nominais, alimentado através do conversor de frequência ACS-601-0006-3. Os sinais ilustrados, foram adquiridos com o osciloscópio digital 54601B e módulo FFT, 54659B, utilizando a interface RS-232.

As figuras apresentadas ilustram as potencialidades do circuito implementado e os sinais de corrente e tensão foram adquiridos com o motor alimentado à frequência nominal de 50Hz (1500 rpm), sem filtragem (fig. 2 e 4) e também com filtragem, para as duas bandas passantes dos filtros: 200Hz (fig. 3 e 5) e 950Hz (fig. 6 e 7). São ainda apresentados os sinais adquiridos com o motor alimentado à frequência nominal de 10Hz (300 rpm), não filtrados (fig. 8 e 10), filtrados (fig. 9 e 10) e para a banda passante de 950Hz.

No caso de algumas figuras são apresentados apenas dois sinais por questões de legibilidade e/ou por não ser possível apresentar todos os sinais na mesma escala devido a limitações do osciloscópio utilizado.

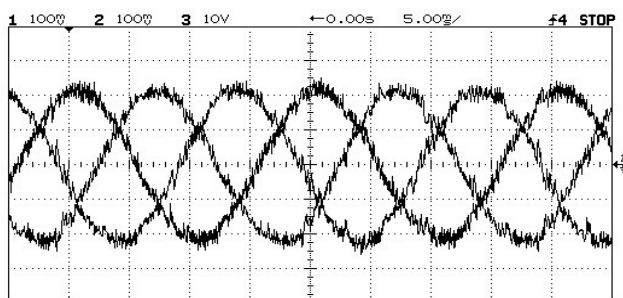


Figura 2. Sinais não filtrados das correntes à frequência fundamental de 50Hz.

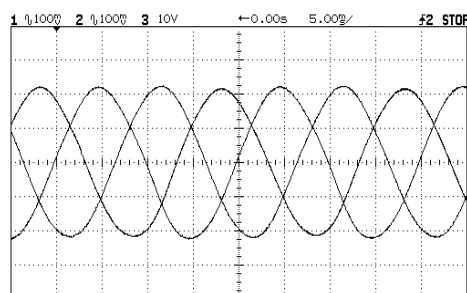


Figura 3. Sinais filtrados das correntes à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 200Hz.

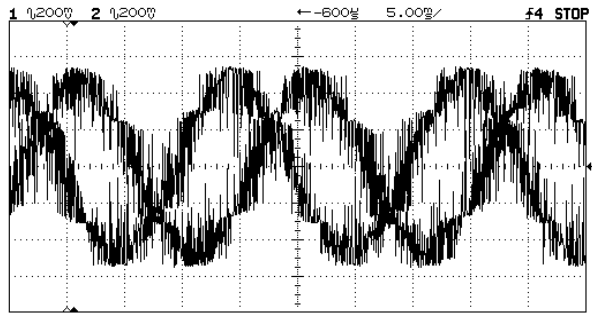


Figura 4. Sinais não filtrados das tensões à frequência fundamental de 50Hz.

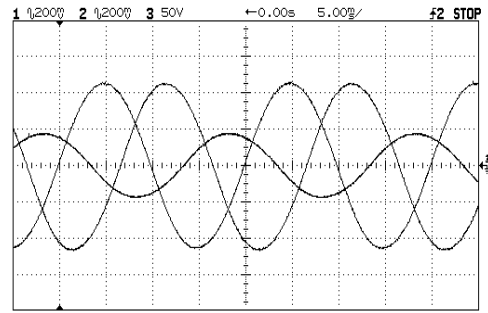


Figura 5. Sinais filtrados das tensões à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 200Hz.

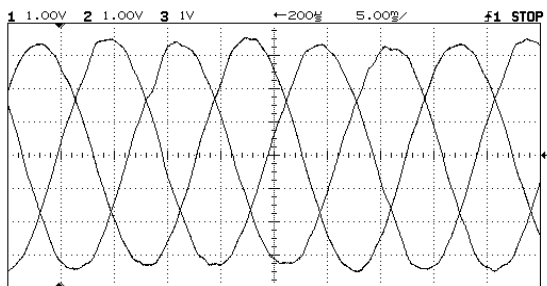


Figura 6. Sinais filtrados das correntes à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 950Hz.

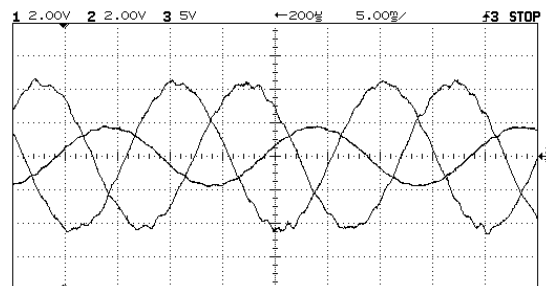


Figura 7. Sinais filtrados das tensões à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 950Hz.

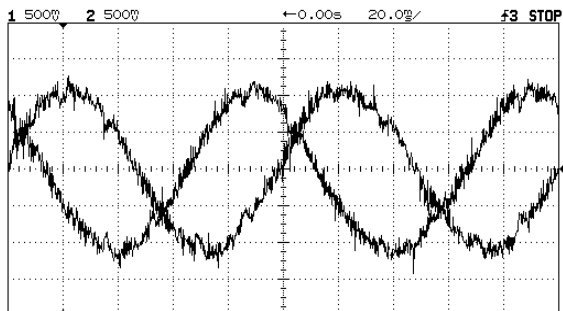


Figura 8. Sinais não filtrados das correntes à frequência fundamental de 10Hz.

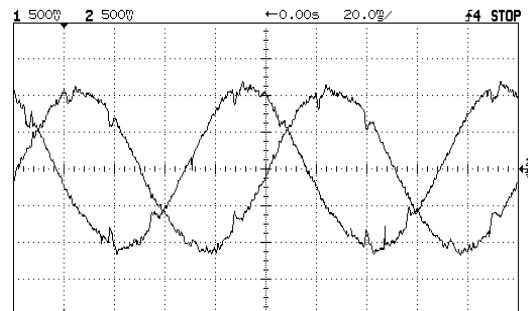


Figura 9. Sinais filtrados das correntes à frequência fundamental de 10Hz. Banda passante: 950Hz.

Como demonstram as figuras 11 a 14, que apresentam a amplitude da FFT dos sinais filtrados de tensão e de corrente, o conteúdo harmônico está presente de forma mais importante quando o motor trabalha a baixas velocidades/frequências. Como se pode verificar pelas figuras 9 e 10 os sinais filtrados de corrente e tensão, à frequência fundamental de 10Hz (300rpm), contêm harmônicos dentro da banda passante que podem contribuir para uma maior persistência da excitação da função de transferência complexa do motor ou de outros modelos utilizados e assim melhorar o desempenho dos

respectivos procedimentos de identificação paramétrica, tal como por exemplo em [2], [5] e [6] mas, por outro lado, como os algoritmos utilizados nestes trabalhos necessitam, em geral, do cálculo da primeira derivada da tensão e da primeira e segunda derivadas da corrente, a presença de tais harmônicos para baixas frequências comporta-se como perturbação excessiva de ruído sendo, nesta situação, desejável uma largura de banda do filtro menor, como se depreende da observação dos sinais filtrados com banda passante de 200Hz.

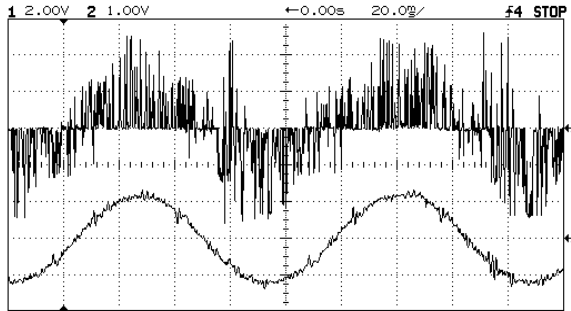


Figura 10. Sinais não filtrado e filtrado da tensão à frequência fundamental de 10Hz. Banda passante: 950Hz.

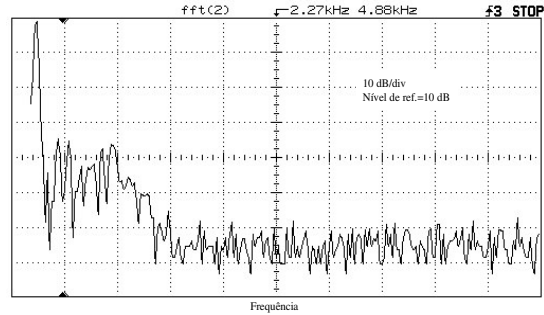


Figura 11. FFT do sinal de tensão filtrado à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 950Hz.

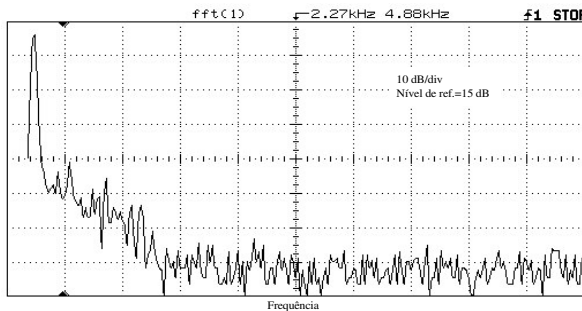


Figura 12. FFT do sinal de corrente filtrado à frequência fundamental de 50Hz. Banda passante: 950Hz.

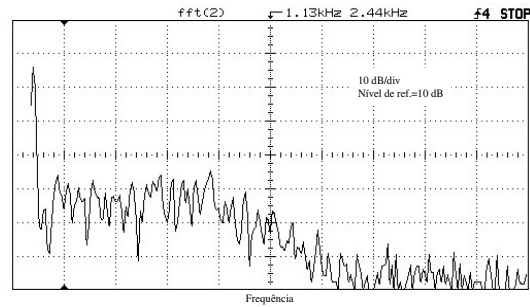


Figura 13. FFT do sinal de tensão filtrado à frequência fundamental de 10Hz. Banda passante: 950Hz.

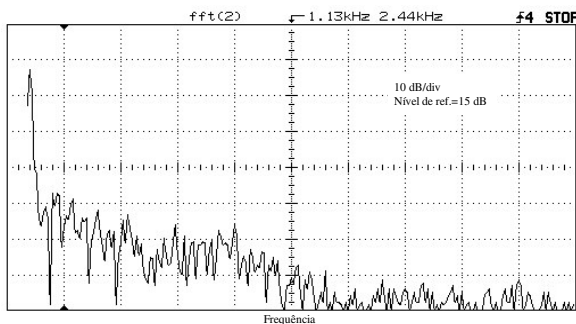


Figura 14. FFT do sinal de corrente filtrado à frequência fundamental de 10Hz. Banda passante: 950Hz.

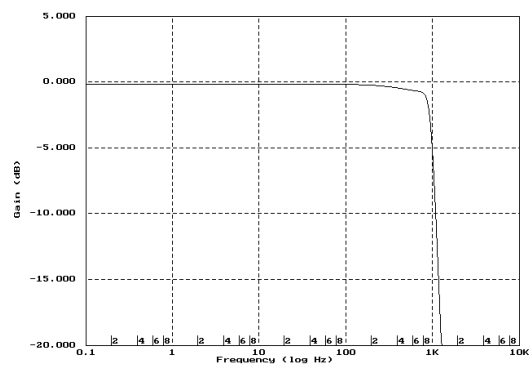


Figura 15. Pormenor da função de transferência do filtro.

Na figura 15 apresentamos uma ampliação da função de transferência dos filtros activos passa baixo com função de aproximação de *Butterworth* de 8ª ordem, com a banda de transição entre 950Hz e 1200Hz.

5. Conclusão

O sistema de interface desenvolvido, permite adquirir e visualizar as tensões e correntes, devidamente isoladas e condicionadas, à saída de conversores de frequência que alimentam máquinas trifásicas. Permite visualizar estes sinais antes e após a filtragem *anti-aliasing*, o que constitui uma situação de elevado interesse didáctico, no âmbito do ensino da engenharia e da electrónica industrial.

De modo relativamente simples, é possível deslocar a banda de transição dos filtros activos, para uma gama de frequências desejada, de modo a permitir incluir mais ou menos conteúdo harmónico, em particular o da tensão, e assim estudar a importância deste na identificabilidade dos parâmetros do motor de indução trifásico, que constitui um tópico actual e de elevado interesse científico.

Em termos de desenvolvimentos futuros, planeamos tratar a redução do tempo de atraso e a análise de sensibilidade das características da interface desenvolvida relativamente aos valores dos componentes a fim de obter um parâmetro geral de precisão e eventualmente otimizar o projecto neste aspecto.

Referências

- [1] F. Alonge, F. D' Ippolito, F. M. Raimondi, *Parameter identification of induction motors: least squares vs. genetic algorithms*, MC'98, September 21-23 1998, Grenoble, France.
- [2] Vicente Leite, *Aplicação de técnicas de modelização paramétrica e identificação ao motor de indução trifásico*, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- [3] Salvador Carlos de Lara Jayme, *Identification des paramètres des machines électriques à courant alternatif*, thèse de Docteur de L'INP de Toulouse, 1995.
- [4] Christiaan Moons, Bart de Moor, *Parameter identification of induction motor drives*, *Automatica*, Vol. 31, Nº 8, pp. 1137-1147, 1995.
- [5] P. Oliveira, P. Seixas, L. Aguirre, Z. Peixoto, *Parameter estimation of a induction machine using a continuous time model*, IECON'98, p. 292-296, August 31-September 4, 1998, Germany.
- [6] Jannifer Stephan, Marc Bodson, John Chiasson, *Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Nº 3, p. 746-759, May/June, 1994.
- [7] Loredana Cristaldi, Alessandro Ferrero, Roberto Ottoboni, *Measuring equipment for the electric quantities at the terminals of an inverter-fed induction motor*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measuring, Vol. 45, nº 2, p. 449-452, April 1996.
- [8] João do Vale, Morim da Silva, Artur Costa, *Sistema de aquisição de dados DATMAQ*, ENDIEL'93, 21 a 25 de Abril de 1993, Porto.
- [9] Vicente Leite, Rui Araújo, Diamantino Freitas, *Estimação e identificabilidade dos parâmetros do motor de indução trifásico*, 5^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, 3 a 5 de Julho de 1997, Salamanca.