### **Referências Bibliográficas**

- MAHDI, A. E.; PANINA, L.; MAPPS, D. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDs, GMR and GMI materials. Sensors and Actuators A, v. 105, p. 271–285, 2003.
- [2] LENZ, J.; EDELSTEIN, A. S. Magnetic sensors and their applications. IEEE Sensors Journal, v. 6, n. 3, p. 631-649, 2006.
- [3] RIPKA, P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Artech House Publishers, 2001.
- [4] CLARKE, J.; BRAGINSKI, A. I. The SQUID Handbook: Vol. II Applications of SQUID's and SQUID systems. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [5] LENZ, J. E. A review of magnetic sensors. Proc. IEEE, v. 78, n. 6, p. 973– 989, 1990.
- [6] BOLL, RICHARD; OVERSHOTT, KENNETH J. Sensors: A Comprehensive Survey – Vol. 5: Magnetic Sensors, Wiley-VCH, 1989.
- [7] ANDRÄ, W.; NOWAK, H. Magnetism in Medicine: A Handbook. 2<sup>a</sup> Ed.
   WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.
- [8] CLARKE, JOHN; BRAGINSKI, ALEX I. The SQUID Handbook: Vol. I Fundamentals and Technology of SQUID's and SQUID systems, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [9] NOR, A. F. M.; HILL, E. W.; BIRTHWISTLE, K.; PARKER, M. R. Noise in NiFeCo/Cu spin valve sensors. Sens. Actuators A, v. 81, p. 67–70, 2000.
- [10] VAN DE VEERDONK, R. J. M.; BELIEN, P. J. L.; SCHEP, K. M.; KOOLS, J. C. S.; DE NOOIJER, M. C.; GIJS, M. A. M.; COEHOORN, R.; DE JONGE, W. J. M. 1/f noise in anisotropic and giant magnetoresistive elements. J. Appl. Phys., v. 82, p. 6152–6164, 1997.
- [11] EDELSTEIN, A. S.; FISCHER, G. A. Minimizing 1/f noise in magnetic sensors using a microelectromechanical system flux concentrator. J. Appl. Phys., v. 91, p. 7795–7797, 2002.

- [12] EDELSTEIN, A. S.; FISCHER, G. A.; PEDERSEN, M.; NOWAK, E. R.; CHENG, SHU FAN; NORDMAN, C. A. Progress toward a thousand-fold reduction in 1/f noise in magnetic sensors using an AC MEMS flux concentrator. J. Appl. Phys., v. 99, 08B317, 2006.
- [13] MAHDI, A. E.; MAPPS, D. J. High-Tc SQUIDs: the ultra sensitive sensors for non-destructive testing and biomagnetism. Sens. Actuators A: Phys., v. 81, n. 1–3, p. 367–370, 2000.
- [14] WU, M. K.; ASHBURN, J. R.; TORNG, C. J.; HOR, P. H.; MENG, R. L. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. Phys. Rev. Lett., v. 58, p. 908–910, 1987.
- [15] CAVALCANTI, Flávia Maria Pompéia Desenvolvimento e caracterização de um transdutor magnético baseado no fenômeno da magnetoimpedância gigante. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação de Mestrado
   – Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- [16] RIPKA, P. Advances in fluxgate sensors. Sensors and Actuators A, v. 106, p. 8–14, 2003.
- [17] JANICKE, J. M. Second harmonic fluxgate sensors and magnetometers. Sensor Rev., v. 18, n. 4, p. 225–229, 1998.
- [18] ROCHFORD, K. B.; ESPEJO, R. J.; ROSE, A. H.; DYER, S. D. Improved Fiber-Optic Magnetometer Based on Iron Garnet Crystals. In: 14th Optical Fiber Sensors Conf., Italy, 2000. Proc. of the 14th Optical Fiber Sensors Conf., 2000, p. 332-335.
- [19] CRANCH, G. A.; FLOCKHART, G. M. H.; KIRKENDALL, C. K. Highresolution distributed-feedback fiber laser dc magnetometer based on the Lorentzian force. Meas. Sci. Technol., v. 20, 034023, 2009.
- [20] KOO, KEE P.; DANDRIDGE, A.; TVETEN, A. B.; SIGEL JR., G.H. Fiber optic magnetometer for detecting DC magnetic fields. United States Patent 4600885, 15 de Maio de 1984.
- [21] SMITH, C. H.; SCHNEIDER, R. W. Magnetic field sensing utilizing GMR materials. Sens. Rev., v. 18, n. 4, p. 230–236, 1998.
- [22] TUMANSKI, S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. Bristol, U.K.: Inst. Phys., 2001.

- [23] MAPPS, D. J. Magnetoresistive sensors. Sens. Actuators A, v. 59, p. 9–19, 1997.
- [24] BAIBICH, M. N.; BROTO, J. M.; FERT, A.; VAN DAU, F.N.; PETROFF,
  F. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. Phys.
  Rev. Lett., v. 61, p. 2472–2475, 1988.
- [25] MCGUIRE, T. R. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys.IEEE Trans. Magn., v. 11, n. 4, p. 1018–1038, 1975.
- [26] LEE, W. Y.; TONEY, M. F.; MAURI, D. High magnetoresistance in sputtered Permalloy thin films through growth on seed layers of (Ni<sub>0,81</sub>Fe<sub>0,19</sub>)<sub>1</sub>.
   x Cr<sub>x</sub>. IEEE Trans. Magn., v. 36, n. 1, p. 381–385, 2000.
- [27] MOODERA, J. S.; Kinder, L. R.; WONG, T. M.; MESERVEY, R. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions. Phys. Rev. Lett., v. 74, n. 16, p. 3273–2376, 1995.
- [28] PARKIN, S. S. P.; KAISER, C.; PANCHULA, A.; RICE, P. M.; HUGHES, B.; MAHESH, S.; YANG, SEE-HUN Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers. Nature Mater., v. 3, p. 862–867, 2004.
- [29] KAMMERER, J. B.; HEBRARD, L.; HEHN, M.; BRAUN, F.; ALNOT, P.; SCHUHL, A. A two-axis magnetometer using a single magnetic tunnel junction. IEEE Sensors J., v. 4, n. 3, p. 313–321, 2004.
- [30] SOLIN, S. A.; THIO, T.; HINES, D. R.; HEREMANS, J. J. Enhanced roomtemperature geometric magnetoresistance in inhomogeneous narrow-gap semiconductors. Science, v. 289, p. 1530–1532, 2000.
- [31] MOUSSA, J.; RAM-MOHAN, L. R.; ROWE, A. C. H.; SOLIN, S. A. Response of an extraordinary magnetoresistance read head to a magnetic bit. J. Appl. Phys., v. 94, p. 1110–1114, 2003.
- [32] TATARA, G.; ZHAO, Y. W.; MUÑOZ, M.; GARCIA, N. Domain wall scattering explains 300% ballistic magnetoconductance of nanocontacts. Phys. Rev. Lett., v. 83, p. 2030–2033, 1999.
- [33] CHOPRA, H. D.; HUA, S. Z. Ballistic magnetoresistance over 3000% in Ni nanocontacts at room temperature. Phys. Rev. B, v. 66, 020403, 2002.
- [34] GONÇALVES, Lídice Aparecida Pereira Efeito hall planar e magnetoimpedância gigante em liga ferromagnetica amorfa Co70Fe5Si15B10. Recife, 2006. Tese de Doutorado – Programa de Pós-

graduação em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

- [35] MENDES, Kenia Carvalho Estudo da magneto-impedância gigante e do efeito hall em fitas amorfas de Co<sub>70.4</sub>Fe<sub>4.6</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub>. João Pessoa, 2000. Tese de Doutorado – Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
- [36] PHAN, Manh-Huong; PENG, Hua-Xin Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science, v. 53, p. 323-420, 2008.
- [37] VALENSUELA, R.; VAZQUEZ, M.; HERNANDO, A. A position sensor based on magnetoimpedance. J. Appl. Phys., v. 79, p. 6549–6591, 1996.
- [38] HAUSER, H.; STEINDL, R.; HAUSLEITNER, C.; POHL, A.; NICOLICS, J. Wirelessly interrogable magnetic field sensor utilizing giant magnetoimpedance effect and surface acoustic wave devices. IEEE Instrum. Meas., v. 49, p. 648–652, 2000.
- [39] HONKURA, Y. Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use. J. Magn. Magn. Mater., v. 249, p. 375–377, 2002.
- [40] DELOOZE, P.; PANINA, L. V.; MAPPS, D. J.; UENO, K.; SANO, H. Effect of transverse magnetic field on thin film magnetoimpedance and application to magnetic recording. J. Magn. Magn. Mater., v. 272–276, p. 2266–2268, 2004.
- [41] UCHIYAWA, T.; MOHRI, K.; ITHO, H.; NAKASHIMA, K.; OHUCHI, J.; SUDO, Y. Car traffic monitoring system using MI sensor built-in disk set on the road. IEEE Trans. Magn., v. 36, p. 3670–3672, 2000.
- [42] KIM, D. J.; PARK, D. G.; HONG, J. H. Nondestructive evaluation of reactor pressure vessel steels using the giant magnetoimpedance sensor. J. Appl. Phys., v. 91, n. 10, p. 7421–7423, 2002.
- [43] TEHRANCHI, M. M.; RANJBARAN, M.; EFTEKHARI, H. Double core giant magneto-impedance sensors for the inspection of magnetic flux leakage from metal surface cracks. Sensors and Actuators A: Physical, v. 170, n. 1– 2, p. 55-61, 2011.
- [44] GARCÍA-ARRIBAS, A.; MARTÍNEZ, F.; FERNÁNDEZ, E.; OZAETA, I.; KURLYANDSKAYA, G. V.; SVALOV, A. V.; BERGANZO, J.; BARANDIARAN, J. M. GMI detection of magnetic-particle concentration in

continuous flow. Sensors and Actuators A: Physical, v. 172, n. 1, p. 103-108, 2011.

- [45] KURLYANDSKAYA, G. V.; SANCHEZ M. L.; HERNANDO, B.; PRIDA, V. M.; GORRIA, P.; TEJEDOR, M. Giant magnetoimpedancebased sensitive element as a model for biosensors. Appl. Phys. Lett., v. 82, p. 3053–3055, 2003.
- [46] KURLYANDSKAYA, G. V.; MIYAR, V. F. Surface modified amorphous ribbon based magnetoimpedance biosensor. Biosensors and Bioelectronics, v. 22, p. 2341–2345, 2007.
- [47] TOTSU, K.; HAGA, Y.; ESASHI, M. Three-axis magnetoimpedance effect sensor system for detecting position and orientation of catheter tip. Sens. Actuators A, v. 111, p. 304–309, 2004.
- [48] CHIRIAC, H.; TIBU, M.; MOGA, A. E.; HEREA, D. D. Magnetic GMI sensor for detection of biomolecules. J. Magn. Magn. Mater., v. 293, p. 671– 673, 2005.
- [49] UCHIYAMA, T.; NAKAYAMA, S.; MOHRI, K.; BUSHIDA, K. Biomagnetic field detection using very high sensitivity magnetoimpedance sensors for medical applications. Phys. Status Solidi A, v. 206, n. 4, p. 639– 643, 2009.
- [50] GUSMÃO, L. A. P.; CAVALCANTI, F. M. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A. Desenvolvimento de Transdutor Magnético baseado em Magnetoimpedância Gigante. In: 6th International Seminar on Electrical Metrology (SEMETRO), Rio de Janeiro, 2005. Proceedings of the 6th International Seminar on Electrical Metrology (SEMETRO), 2005, p. 158-161.
- [51] RAMOS LOUZADA, D.; HALL BARBOSA, C.; GUSMÃO, L. A. P.; CAVALCANTI, F. M. P.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A. Desenvolvimento de transdutor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenômeno de magnetoimpedância gigante, para aplicação biomédica. In: XX CBEB - Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, São Paulo, 2006. Anais do XX CBEB, 2006, p. 1267-1270.
- [52] CAVALCANTI, F. M. P.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C. R.; COSTA MONTEIRO, E.; GONÇALVES, L. A. P.; MACHADO, F. L. A. Characterization of a Magnetic Field Transducer based on the GMI Effect. In:

XVIII IMEKO WORLD CONGRESS - Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, 2006. **Proceedings of the XVIII IMEKO WORLD CONGRESS**, 2006, p. 1-4.

- [53] RAMOS LOUZADA, D.; COSTA MONTEIRO, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C. Medição não-invasiva de ondas de pulso arterial utilizando transdutor de pressão MIG. In: IV Latin American Congress on Biomedical Engineering, CLAIB2007, Isla Margarita, Venezuela, 2007. IFMBE Proceedings CLAIB2007, Carmen Mueller-Karger, Sara Wong, Alexandra La Cruz (Eds.), 2007, v. 18, p. 436–439.
- [54] CAVALCANTI, F. M. P.; GUSMÃO, L. A. P.; BARBOSA, C. H.; COSTA MONTEIRO, E.; GONÇALVES, L. A. P.; MACHADO, F. L. A. Ring shaped magnetic field transducer based on the GMI effect. Measurement Science & Technology, v. 19, p. 1-10, 2008.
- [55] UCHIYAMA, T.; MOHRI, K.; NAKAYAMA, S. Measurement of Spontaneous Oscillatory Magnetic Field of Guinea-Pig Smooth Muscle Preparation Using Pico-Tesla Resolution Amorphous Wire Magneto-Impedance Sensor. IEEE Transactions on Magnetics, v. 47, n. 10, p. 3070– 3073, 2011.
- [56] MACHADO, F. L. A.; DA SILVA, B. L.; REZENDE, S. M.; MARTINS,
  C. S. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co<sub>70.4</sub>Fe<sub>4.6</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub>.
  Journal of Applied Physics, v.75, n. 10, p. 6563-6565, 1994.
- [57] MACHADO, F. L. A.; MARTINS, C. S.; REZENDE, S. M. Giant magnetoimpedance in the ferromagnet Co<sub>70-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub> alloys. Physical Review B, v. 15, p. 3926, 1995.
- [58] MACHADO, F. L. A.; REZENDE, S. M. A theoretical model for the giant magnetoimpedance in ribbons of amorphous soft-ferromagnetic alloys. Journal of Applied Physics, v. 79, n. 8, p. 6558-6560, 1996.
- [59] GONÇALVES, L. A. P.; SOARES, J. M.; MACHADO, F. L. A.; RODRIGUES, A. R. Hall and giant magnetoimpedance effects in the Co70Fe5Si15B10 metallic glass. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 352, n. 1, p. 3659-3662, 2006.
- [60] DUFAY, B.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C.; YELON, A.; MÉNARD, D. Physical properties and giant magnetoimpedance sensitivity of rapidly

solidified magnetic microwires. J. Magnet. Magn. Mater., v. 324, n. 13, p. 2091–2099, 2012.

- [61] LAGO-CACHÓN, D.; MARTÍNEZ-GARCÍA, J. C.; RIVAS, M.; GARCÍA, J. A. Biased giant magnetoimpedance and switching field distribution curves in Co<sub>70</sub>Fe<sub>5</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub> nanocrystalline ribbons. Journal of Alloys and Compounds, v. 536, n. 1, p. 312-314, 2012.
- [62] SUN, JIAN-FEI; LIU, JING-SHUN; XING, DA-WEI; XUE, XIANG Experimental study on the effect of alternating-current amplitude on GMI output stability of Co-based amorphous wires. Physica Status Solidi (a), v. 208, n. 4, p. 910–914, 2011.
- [63] HAYT Jr., W. H.; BUCK, J. A. Engineering Electromagnetics. 8<sup>a</sup> Ed., McGraw-Hill, 2011.
- [64] HAUSER, H.; KRAUS, L.; RIPKA, P. Giant magnetoimpedance sensors. IEEE Instrum. Meas. Mag., v. 4, n. 2, p. 28–32, 2001.
- [65] KNOBEL, V.; PIROTA, K. R. Giant magnetoimpedance concepts and recent progress. J. Magn. Magn. Mater., v. 242, p. 33–40, 2002.
- [66] PIROTA, K. R.; KNOBEL, M.; GOMEZ-POLO, C. Recent experiments and models on giant magnetoimpedance. **Physica B**, v. 320, p. 127–134, 2002.
- [67] KRAUS, L. GMI modeling and material optimization. Sens. Actuators A, v. 106, p. 187–194, 2003.
- [68] KRAUS, L. Theory of giant magneto-impedance in the planar conductor with uniaxial magnetic anisotropy. J. Magn. Magn. Mater., v. 195, p. 764–778, 1999.
- [69] MENARD, D.; BRITEL, M.; CIUREANU, P.; YELON, A. Giant magnetoimpedance in a cylindrical magnetic conductor. J. Appl. Phys., v. 84, p. 2805–2814, 1998.
- [70] PANINA, L. V.; MOHRI, K. Magneto-impedance effect in amorphous wires.Applied Physics Letters, v. 65, n. 9, p. 1189-1194, 1994.
- [71] CORREA, M. A.; BOHN, F.; ESCOBAR, V. M.; VIEGAS, A. D. C.; SCHELP, L. F.; SOMMER, R. L. Wide frequency range magnetoimpedance in tri-layered thin NiFe/Ag/NiFe films: Experiment and numerical calculation. Journal of Applied Physics, v. 110, p. 093914, 2011.
- [72] DA SILVA, R. B.; VIEGAS, A. D. C.; NASCIMENTO, V. P.; CORREA, M. A.; SCHELP, L. F.; BAGGIO-SAITOVITCH, E.; SOMMER, R. L. High

frequency magnetoimpedance in Ni[sub 81]Fe[sub 19]/Fe[sub 50]Mn[sub 50] exchange biased multilayer. **Applied Physics Letters**, v. 94, p. 042501, 2009.

- [73] PANINA, L. V.; MOHRI, K.; UCHIYAMA, T.; NODA, M.; BUSHIDA, K. Giant Magneto-Impedance in Co-Rich Amorphous Wires and Films. IEEE Transactions on Magnetics, v. 31, n. 2, p. 1249-1260, 1995.
- [74] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Electrodynamics of continuous media. Oxford: Pergamon Press, 1975.
- [75] GILBERT, T. A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetic field. Phys. Rev., v. 100, p. 1243–1255, 1955.
- [76] KIM, C. G.; JANG, K. J.; KIM, H. C.; YOON, S. S. Asymmetric giant magnetoimpedance in field annealing Co-based amorphous ribbon. Journal of Applied Physics, v. 85, p. 5447-5449, 1999.
- [77] MACHADO, F. L. A.; RODRIGUES, A. R.; PUÇA, A. A.; de ARAÚJO, A.
  E. P. Highly Asymmetric Giant Magnetoimpedance. Materials Science Forum, v. 302, p. 202-208, 1999.
- [78] MAKHNOVSKIY, D. P.; PANINA, L. V.; MAPPS, D. J. Asymmetric Magnetoimpedance in as-cast CoFeSiB Amorphous Wires due to ac Bias. Applied Physics Letters, v. 77, p. 121-123, 2000.
- [79] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; COSTA MONTEIRO, E.; HALL BARBOSA, C. Characterization of the Magnitude Impedance of Ribbon-Shaped GMI Samples and their use in Transducers aimed at Biomedical Applications. In: XI International Conference on Advanced Materials, Rio de Janeiro, 2009. Proceedings of the XI International Conference on Advanced Materials, 2009, p. 1.
- [80] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. High Sensitivity Triaxial Magnetic Field Transducer, Based on the Phase Characteristics of the GMI Effect. In: XIX IMEKO World Congress, Lisboa, 2009. Proceedings of the XIX IMEKO World Congress, 2009, p. 1755-1759.
- [81] COSTA SILVA, E. ; GUSMAO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Seesaw behavior in the impedance phase characteristic of Co75-xFexSi15B10 GMI samples. In: IX Brazilian MRS Meeting, Ouro Preto, 2010. Proceedings of the IX Brazilian MRS Meeting, 2010, p. 1.

- [82] COSTA SILVA, Eduardo Desenvolvimento de Transdutor Baseado na Fase da Magnetoimpedância Gigante para Medição de Campos Biomagnéticos. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- [83] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A. High sensitivity giant magnetoimpedance (GMI) magnetic transducer: magnitude versus phase sensing. Measurement Science & Technology, v. 22, p. 1-9, 2011.
- [84] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; BARBOSA, C. R. H.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A. Sensitivity improvement of GMI magnetic and pressure transducers for biomedical measurements. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 27, p. 79-89, 2011.
- [85] PUC-Rio. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A.; POMPÉIA, F.; LOUZADA, D. R. *Patente*, **BR n. PI 0902770-0**, 17 de Fevereiro de 2009.
- [86] PUC-Rio. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F. L. A.; POMPÉIA, F.; LOUZADA, D. R. Patente, WO/2010/094096, 2010.
- [87] DING, L.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C.; MELO, L. G. C.; YELON, A.; MÉNARD, D. Equivalent magnetic noise limit of low-cost GMI magnetometer. IEEE Sensors Journal, v. 9, n. 2, p. 159-168, 2009.
- [88] DUFAY, B.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C. P.; YELON, A.; MÉNARD, D. Characterization of an optimized off-diagonal GMI-based magnetometer. IEEE Sensors Journal, v. 13, n. 1, p. 379-388, 2013.
- [89] WU, Z. M.; ZHAO, Z. J.; LIU, L. P.; YANG, J. X.; YANG, X. L. A New Frequency-Modulation-Type MI Sensor. IEEE Transactions on Magnetics, v. 41, n. 10, p. 3694-3696, 2005.
- [90] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. Microelectronic Circuits. 6<sup>th</sup> Ed. New York: Oxford University Press, 2010.

- [91] MALÁTEK, M.; KRAUS, L. Off-diagonal gmi sensor with stress-annealed amorphous ribbon. Sensors and Actuators A: Physical, v. 164, n. 1-2, p. 41-45, 2010.
- [92] KRAUS, L.; MALATEK, M.; DVORAK, M.; Magnetic field sensor based on asymmetric inverse Wiedemann effect. Sensors and Actuators A: Physical, v. 142, p. 468-473, 2008.
- [93] GELIANG, Y.; XIONGZHU, B.; BO, Y.; YUNLONG, L.; CHAO, X. Differential-type GMI magnetic sensor based on longitudinal excitation. IEEE Sensors Journal, v. 11, n. 10, p. 2273-2278, 2011.
- [94] ALVES, F.; RACHED, L. A.; MOUTOUSSAMY, J.; COILLOT, C. Trilayer gmi sensors based on fast stress-annealing of fesibcunb ribbons. Sensors and Actuators A: Physical, v. 142, n. 2, p. 459-463, 2008.
- [95] BORK, J.; HAHLBOHM, H. D.; KLEIN, R.; SCHNABEL, A. The 8-layered magnetically shielded room of the PTB: Design and construction. In: 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Biomagnetism, Biomag2000, Finlândia, 2000. Proceedings of the 12th Int. Conf. on Biomagnetism, 2001, p. 970-973.
- [96] HARAKAWA, K.; KAJIWARA, G.; KAZAMI, K.; OGATA, H.; KADO, H. Evaluation of a high performance magnetically shielded room for biomagnetic measurement. IEEE Trans. Mag., v. 32, p. 5226-5259, 1996.
- [97] ERNÉ, S.; HAHLBOHM, H. D.; SCHEER, H.; TRONTELJ, Z. The Berlin magnetically shielded room (BMSR), Section B: Performances.
   Biomagnetism, Berlin: Walter de Gruyter, 1981, p. 79–87.
- [98] GELIANG, Y.; XIONGZHU, B.; BO, Y.; YUNLONG, L.; CHAO, X. Differential-type GMI magnetic sensor based on longitudinal excitation. IEEE Sensors Journal, v. 11, n. 10, p. 2273-2278, 2011.
- [99] ZHAO, WEN; BU, XIONGZHU; YU, GELIANG; XIANG, CHAO. Feedback-type giant magneto-impedance sensor based on longitudinal excitation. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 324, n. 19, p. 3073-3077, 2012.
- [100] AICHI STEEL. Nanotesla Sensor MI-CB-1DH. Disponível em: <http://www.aichi-mi.com/magnetometer/type-dh\_en.html>. Acesso em: 25 nov. 2013.
- [101] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Transdutor de Pressão para Medição de Ondas de Pulso

Arterial, Baseado na Fase do Fenômeno GMI. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, CBEB2008, Bahia, 2008. Anais do XXI
Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, p. 1.

- [102] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Magnetic Field Transducers based on the Phase Characteristics of GMI Sensors and Aimed to Biomedical Applications. In: 13th International Conference on Biomedical Engineering, ICBME2008, Singapura, 2008. Proceedings of the 13th International Conference on Biomedical Engineering, 2008, v. 23, p. 652-656.
- [103] COSTA SILVA, E.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; GUSMÃO, L. A. P. GMI impedance Phase Characteristics, focusing on its Dependence with the Frequency of the Excitation current. In: XXXII Brazilian Meeting on Condensed Matter Physics, Águas de Lindóia, São Paulo, 2009. Proceedings of the XXXII Brazilian Meeting on Condensed Matter Physics, 2009, p. 141.
- [104] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Transdutor de Pressão, Baseado nas Características de Fase do Efeito GMI, para Detecção de Ondas de Pulso Arterial. In: VIII SEMETRO, João Pessoa, Paraíba, 2009. Anais do VIII SEMETRO, 2009, p. 1-5.
- [105] COSTA SILVA, E.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; GUSMÃO, L. A. P. Método Computacional Automatizado de Ajuste de Curvas a Dados Experimentais. In: V Congresso Brasileiro de Metrologia, Salvador, Bahia, 2009. Anais do V Congresso Brasileiro de Metrologia, 2009, p. 1-5.
- [106] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Amplificação da Sensibilidade de Fase de Sensores GMI para Medição de Campos Biomagnéticos. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, Tiradentes, MG, 2010. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2010, p. 1-4.
- [107] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Transdutor de pressão, baseado nas características de fase do efeito GMI, destinado a aplicações biomédicas. Controle & Automação, v. 21, p. 598-608, 2010.

- [108] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Progress Toward a Hundredfold Enhancement in the Impedance Phase Sensitivity of Giant Magnetoimpedance (GMI) Magnetic Sensors. In: V Latin American Congress on Biomedical Engineering, CLAIB2011, Havana, Cuba, 2011. IFBME Proceedings - V Latin American Congress on Biomedical Engineering, Berlin: Springer-Verlag, 2011, v. 33, p. 742-745.
- [109] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Homogenization of the Impedance Phase Characteristics of Giant Magnetoimpedance Sensors. In: XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX SEMETRO, Natal, 2011. Proceedings of the XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX Semetro, 2011, p. 1-6.
- [110] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. An electronic approach to homogenize the impedance phase characteristics of heterogeneous GMI sensors. Acta IMEKO, v. 1, p. 70-76, 2012.
- [111] LEIPNER, Y.; COSTA SILVA, E.; HALL BARBOSA, C.; GUSMÃO, L.A.P.; COSTA MONTEIRO, E. Homogeneização da Sensibilidade de Fase de Amostras GMI para Medições de Campo Biomagnético, Porto de Galinhas, PE, 2012. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2012, p. 1-5.
- [112] CARNEIRO, J. H. C. C.; COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. A System For the Automatic Characterization of Giant Magneto-Impedance Samples. In: XX IMEKO World Congress, Busan, 2012. Proceedings of the XX IMEKO World Congress, 2012, p. 1-4.
- [113] COSTA SILVA, E.; VELLASCO, M. M. B. R.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; GUSMÃO, L. A. P. Modelagem da sensibilidade de amostras GMI por redes neurais. Controle & Automação, v. 23, p. 636-648, 2012.
- [114] CASTRO, R.V.C.; HALL BARBOSA, C.; COSTA SILVA, E.; SOUZA, N.L.; VON DER WEID, J.P. Application of High Sensitivity Giant Magnetoimpedance Transducers in Nondestructive Evaluation of Steel Structures. In: 17th International Workshop on Electromagnetic

Nondestructive Evaluation, Rio de Janeiro, 2012. Proc. of the 17th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation-ENDE2012, 2012, p. 14-15.

- [115] COSTA SILVA, E.; GUSMAO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Electronic approach for enhancing impedance phase sensitivity of GMI magnetic sensors. Electronics Letters, v. 49, p. 396-397, 2013.
- [116] COSTA SILVA, E.; CARNEIRO, J. H. C. C.; GUSMAO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Development of a fast and reliable system for the automatic characterization of Giant magnetoimpedance samples. Acta IMEKO, v. 2, p. 1-6, 2013. (aceito para publicação)
- [117] FORTALEZA, L. G. S.; COSTA SILVA, E.; GUSMAO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. Homogeneização das características de fase de amostras GMI para leitura gradiométrica. In: X International Congress on Electrical Metrology – SEMETRO, Buenos Aires, Argentina, 2013. Proc. of the 10th International Congress on Electrical Metrology, 2013, p. 1-4. (aceito para publicação)
- [118] PUC-Rio. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. *Patente*, **BR n. PI 1004686-0**, 13 de Outubro de 2010.
- [119] PUC-Rio. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L. A. P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E. *Patente*, WO/2012/048395, 2011.
- [120] SANKARANARAYANAN, V. World Magnetic Sensors Markets, Frost & Sullivan, 2010. Disponível em: <a href="http://www.frost.com/sublib/display-report.do">http://www.frost.com/sublib/display-report.do</a>?bdata=bnVsbEB%2BQEJhY2tAfkAxMzUwMzczNDY2Mjc5&id= N775-01-00-00-00>. Acesso em: 2 dez. 2012.
- [121] MAGER, A. Large Magnetic Shields. J. Magn. Magn. Mater., v. 2, p. 245-255, 1976.
- [122] BAUM, E.; BORK, J. Systematic design of magnetic shields. J. Magn. Magn. Mat., v. 101, p. 69-74, 1991.
- [123] BÉRON, F.; VALENZUELA, L. A.; KNOBEL, M.; MELO, L. G. C.; PIROTA, K. R. Hysteretic giant magnetoimpedance effect analyzed by first-

order reversal curves. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 8, p. 1601-1605, 2012.

- [124] HAYKIN, S. Neural Networks A Comprehensive Foundation. Macmillan College Publishing Company, Inc., 1998.
- [125] HORNIK, K.; STINCHCOMBE, M.; WHITE, H. Multi-layer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, v. 2, p. 359–366, 1989.
- [126] ENACHESCU, C. Neural Networks as approximation methods. In: International Conference on Approximation and Optimization Methods, ICAOR'96, Babes-Bolyai University, Cluj-Napoca, 1996. Proceedings of the International Conference on Approximation and Optimization Methods, 1996, v. 2, p. 83-92.
- [127] FERRARI, S.; STENGEL, R. F. Smooth Function Approximation Using Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks, v. 16, n. 1, p. 24-38, 2005.
- [128] BRUTON, L. T. RC-Active Circuits: Theory and Design. London: Prentice-Hall International, 1980.
- [129] CHEN, Wai-Kai. The Circuits and Filters Handbook: Fundamentals of Circuits and Filters. 3<sup>rd</sup> Ed. London: CRC Press, 2009.
- [130] HEINZEL, G.; RUDIGER A.; SCHILLING R. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows. Germany: Max Planck Institute (MPI) für Gravitationsphysik, 2002, 84 p. Relatório Técnico.
- [131] DUFAY, B.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C.; YELON, A.; MÉNARD, D.
  Impact of electronic conditioning on the noise performance of a two-port network giant magnetoimpedance magnetometer. IEEE Sensors J., v. 11, n.
  6, p. 1317–1324, 2011.
- [132] MELO, L. G. C.; MÉNARD, D.; YELON, A.; DING, L.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C. Optimization of the magnetic noise and sensitivity of giant magnetoimpedance sensors. Journal of Applied Physics, v. 103, p. 1-6, 2008.
- [133] DUFAY, B.; SAEZ, S.; DOLABDJIAN, C.; YELON, A.; MÉNARD, D. Development of a high sensitivity giant magneto-impedance magnetometer:

comparison with a commercial flux-gate. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 1, p. 85-88, 2013.

[134] HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. IEEE Transactions on Neural Networks, v. 5, n. 6, p. 989-993, 1994.

# Apêndice A Modelagem dos Sensores GMI por Redes Neurais

Conforme previamente discutido, a sensibilidade dos transdutores magnéticos está diretamente associada à sensibilidade de seus elementos sensores. Dessa forma, a otimização da sensibilidade dos elementos sensores é fundamental. No caso de amostras GMI, a sensibilidade é afetada por diversos parâmetros, e essa dependência ainda não é bem modelada quantitativamente de forma suficientemente abrangente, sendo que a busca do condicionamento ótimo é, usualmente, empírica [1-2, 36, 64-67].

Assim, buscou-se desenvolver um modelo computacional capaz de auxiliar os procedimentos experimentais adotados, no intuito de se definir qual a combinação ótima dos parâmetros de condicionamento responsável por maximizar a sensibilidade das amostras GMI. Redes Neurais são um excelente método de aproximação de funções, pois são altamente imunes ao ruído das variáveis de entrada e não demandam o conhecimento prévio do tipo de função que relaciona entradas e saídas [124-127]. Estas condições levaram à seleção desta ferramenta para a implementação do modelo, o qual baseia-se em duas Redes Neurais, uma para modelar a sensibilidade da fase da impedância do efeito GMI,  $S_{mod}$ , e outra para modelar a sensibilidade da fase da impedância,  $S_{jas}$ , respectivamente definidas pelas eqs. (27) e (28). Ambas as redes implementadas possuem quatro variáveis de entrada: comprimento das amostras, nível CC (indutor de assimetria - AGMI), frequência da corrente de excitação e campo magnético externo [113].

Assim, neste apêndice apresenta-se o desenvolvimento de um sistema computacional, baseado em redes neurais, capaz de estimar a sensibilidade de amostras GMI em função dos parâmetros que a influenciam.

### A.1. Sensibilidade das Amostras GMI

As Figuras 87 e 88 retratam, respectivamente, os valores de módulo e fase, experimentalmente obtidos, de uma amostra GMI, em função do campo magnético externo aplicado longitudinalmente ao comprimento das amostras. Ambas as Figuras referem-se a um caso particular, dentre as diversas combinações de parâmetros analisadas, no qual uma amostra com 3 cm de comprimento foi condicionada por uma corrente  $i_C = [80 + 15 \operatorname{sen}(2\pi 10^5 \operatorname{t})] \operatorname{mA}$ .



Figura 87 – Módulo da impedância em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm submetida a uma corrente  $i_c$  = [80 + 15 sen(2 $\pi$  10<sup>5</sup> t)] mA.



Figura 88 – Fase da impedância em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm submetida a uma corrente  $i_c = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi \ 10^5 \text{ t})] \text{ mA}.$ 

A sensibilidade de módulo  $S_{mod}$  máxima, obtida a partir da curva de caracterização apresentada na Figura 87, de forma aproximada, é dada por:

$$\left|S_{\text{mod}_{máx}}\right| = \left|\frac{\Delta \left|Z_{sens}(H)\right|}{\Delta H}\right|_{máx} = \left|\frac{1,144-1,121}{-1-(-0,9)}\right| = 0,23 \ \Omega \ Oe^{-1}$$
(135)

De forma equivalente, a sensibilidade de fase  $S_{fas}$  máxima, obtida a partir da curva de caracterização apresentada na Figura 88 é dada por:

$$\left|S_{fas_{máx}}\right| = \left|\frac{\Delta\theta_{sens}(H)}{\Delta H}\right|_{máx} = \left|\frac{27,45 - 26,52}{-1,2 - (-1,1)}\right| = 9,3^{\circ} Oe^{-1}$$
(136)

Variando-se os parâmetros de condicionamento das amostras GMI, os comportamentos das curvas de módulo (Figura 87) e fase (Figura 88) em função do campo magnético são alterados. Dessa forma, objetivando-se a maximização da sensibilidade das amostras GMI, foram analisadas experimentalmente diversas combinações dos parâmetros de interesse: comprimento das amostras, nível CC, frequência da corrente de excitação e campo magnético externo, de modo a se observarem suas respectivas influências sobre o comportamento das amostras GMI [83-84, 112, 116].

No entanto, não se têm disponíveis as expressões analíticas do módulo da impedância em função do campo magnético, Z(H), e da fase da impedância em função do campo magnético,  $\theta(H)$ . Assim, traçou-se um polinômio de ajuste para cada uma das diversas curvas experimentalmente obtidas de  $|Z_{sens}(H)| = \theta_{sens}(H)$ , como p. ex. as apresentadas nas Figuras 87 e 88, em função da variação do nível CC e frequência da corrente de condicionamento e do comprimento das amostras.

Tais polinômios de ajuste foram definidos por um programa desenvolvido em MATLAB [105], que permite o ajuste polinomial automático a um conjunto de dados experimentais e baseia-se na metodologia apresentada na Figura 89.



Figura 89 - Diagrama esquemático do método computacional de ajuste proposto.

Dessa forma, foi possível obter expressões analíticas para  $|Z_{sens}(H)|$  e  $\theta_{sens}(H)$  para todos os casos experimentalmente analisados e, consequentemente, as respectivas sensibilidades de módulo  $(S_{mod})$  e fase  $(S_{fas})$  – as quais serão as saídas das redes neurais desenvolvidas. A Figura 90 explicita os polinômios de ajuste definidos a partir dos pontos experimentalmente obtidos –  $|Z_{sens}(H)|$  e  $\theta_{sens}(H)$  – para uma fita GMI de 15 cm submetida a uma corrente  $i_C = [100 + 15 \operatorname{sen}(2\pi 10^7 \operatorname{t})]$  mA. Nesta mesma Figura, também, apresentam-se as respectivas sensibilidades  $S_{mod}$  e  $S_{fas}$  calculadas a partir dos polinômios obtidos.



Figura 90 – Fita GMI de 15 cm submetida a uma corrente i<sub>C</sub> = [100 + 15 sen( $2\pi \ 10^7 \ t$ )] mA - (a) Polinômio de ajuste  $|Z_{sens}| \times H$ , (b) Sensibilidade de módulo  $S_{mod} \times H$ , (c) Polinômio de ajuste  $\theta_{sens} \times H$ , (d) Sensibilidade de fase  $S_{fas} \times H$ .

Observando-se a Figura 90, percebe-se que os polinômios de ajuste modelam satisfatoriamente os conjuntos de dados experimentais, tanto no caso do módulo da impedância,  $|Z_{sens}(H)|$ , quanto da fase da impedância,  $\theta_{sens}(H)$ . No cálculo das sensibilidades de módulo,  $S_{mod}$ , e de fase,  $S_{fas}$ , recomenda-se que os pontos limítrofes – inferior e superior – do conjunto de dados experimentais não sejam utilizados, a fim de se evitar a ocorrência de descontinuidades [105].

Assim, percebe-se que o método de ajuste proposto permite a obtenção das expressões analíticas polinomiais do módulo e fase dos sensores GMI em função do campo magnético e, consequentemente, das respectivas sensibilidades  $S_{mod}$  e  $S_{fas}$ , as quais serão as saídas das redes neurais desenvolvidas e apresentadas na seção subsequente.

Por sua vez, as redes neurais generalizam o problema, permitindo a obtenção das sensibilidades de módulo e fase (saídas das redes) das amostras GMI em função de quatro variáveis de interesse (entradas da rede): comprimento das amostras, nível CC e frequência da corrente de excitação, além do campo magnético externo. Dessa forma, as redes neurais possibilitam estimar a sensibilidade de situações ainda não verificadas experimentalmente, fornecendo indícios que auxiliarão os procedimentos experimentais em busca do condicionamento ótimo das amostras GMI [113].

#### A.2. Redes Neurais

#### A.2.1. Normalização

Tendo calculado os valores da sensibilidade de módulo  $S_{mod}$  e fase  $S_{fas}$  dos sensores GMI para cada ponto do conjunto experimental, pelo método proposto na subseção A.1, foram implementadas duas redes neurais *feedforward Multilayer Perceptron*, uma para análise de  $S_{mod}$  e outra para análise de  $S_{fas}$ , sendo estas as respectivas saídas das redes. Por sua vez, ambas as redes neurais possuem as mesmas 4 variáveis de entrada: comprimento das amostras GMI, nível CC e frequência da corrente e campo magnético aplicado. Os dados experimentais obtidos permitiram 1970 diferentes combinações de padrões entrada-saída. A Figura 91 apresenta a representação esquemática das Redes Neurais propostas.



Figura 91 – Diagrama de blocos das duas Redes Neurais desenvolvidas - (a) Módulo e (b) Fase.

Tanto as entradas quanto as saídas das Redes foram tratadas como dados contínuos e submetidas à normalização linear. A Tabela 8 indica a faixa de valores de cada parâmetro antes e depois da normalização.

Entradas das Redes Neurais				
Davâmatua	Limites experimentais		Valores	
rarametro	Mínimo	Máximo	Normalizados	
Comprimento	1 cm	15 cm	[0,1]	
Nível CC	0 mA	100 mA	[0,1]	
Frequência	75 kHz	30 MHz	[0,1]	
Campo Magnético	-2 Oe	2 Oe	[-1,1]	
	Saída da Rede de Módulo			
Parâmatro	Limites experimentais		Valores	
rarametro	Mínimo	Máximo	Normalizados	
Sensibilidade de Módulo	-12,45 Ω Oe <sup>-1</sup>	12,65 Ω Oe <sup>-1</sup>	[-1,1]	
Saída da Rede de Fase				
Parâmetro	Limites experimentais		Valores	
	Mínimo	Máximo	Normalizados	
Sensibilidade de Fase	-12,69° Oe <sup>-1</sup>	15,75° Oe <sup>-1</sup>	[-1,1]	

Tabela 8 – Normalização dos parâmetros de interesse.

### A.2.2. Topologia

A função de ativação para os neurônios da(s) camada(s) escondida(s) foi a tangente hiperbólica (*tansig* no MATLAB). Porém, optou-se pela função linear (*purelin* no MATLAB) como a função de ativação do neurônio da camada de saída de ambas as redes, pois esta função não satura e consequentemente possibilita que a rede gere saídas fora da região [-1,+1]. Deseja-se que a rede seja capaz de modelar combinações de parâmetros de entrada que gerem saídas fora da região [-1,+1], visto que as sensibilidades máximas obtidas a partir do conjunto experimental não são necessariamente as máximas sensibilidades possíveis.

Durante o estágio de treinamento utilizou-se a técnica de "validação cruzada" com parada antecipada (*early stopping*) [124], baseada na métrica de erro (função de desempenho) MSE (*Mean Squared Error* – Erro Médio Quadrático). O conjunto de dados experimentais foi dividido em:

- Treinamento (70 % ou seja, 1379 padrões)
- Validação (20 % ou seja, 394 padrões)
- Teste (10 % ou seja, 197 padrões)

Utilizou-se o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt backpropagation [134], o qual é a função de treinamento padrão do MATLAB (*trainlm*) para redes neurais *feedforward*.

O número máximo de épocas de treinamento foi arbitrado como 1000 e o maior número de falhas sucessivas na validação – *early stopping* – foi definido (*net.trainParam.max\_fail* no MATLAB) como 50. Escolheu-se um número de épocas razoavelmente grande, pois deseja-se que, em geral, o treinamento seja interrompido pelo crescimento do erro em relação ao conjunto de validação antes do número máximo de épocas ser atingido. Ainda, o número máximo de falhas sucessivas na validação também é relativamente elevado, pois só deseja-se interromper o treinamento quando o erro em relação ao conjunto de validação crescer por diversas épocas seguidas (no caso tratado, 50), visto que esse erro pode crescer por algumas épocas e depois voltar a decrescer.

Finalmente, os números de neurônios na(s) camada(s) escondida(s), bem como a quantidade de camadas escondidas, foram determinados por meio de sucessivos testes, objetivando a minimização do erro em relação ao conjunto de validação. As métricas de avaliação do erro utilizadas foram o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e o RMSE (*Root Mean Squared Error*), as quais são expressas por

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left| \frac{P_j - T_j}{T_j} \right| \quad e \tag{137}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left( P_j - T_j \right)^2} , \qquad (138)$$

onde  $P_j$  é o valor previsto pela rede para a amostra *j* do conjunto de teste,  $T_j$  é o valor experimental (alvo) da amostra *j* do conjunto de teste e *N* é quantidade de amostras do conjunto de teste.

#### A.2.3. Resultados

Foram analisadas redes com 5, 10, 15 e 20 neurônios em cada camada escondida, sendo que foram testadas configurações com uma e com duas camadas escondidas. Cada topologia analisada foi simulada 10 vezes, sendo que em cada repetição os pesos sinápticos eram reinicializados com valores aleatórios.

A Figura 92 permite observar os valores médios e ótimos do MAPE e do RMSE para cada topologia testada da rede neural cuja saída é a sensibilidade de módulo  $S_{mod}$  [113].



Figura 92 – Análise do desempenho da rede, que modela a sensibilidade de módulo do efeito GMI, em relação aos pontos do conjunto de teste - (a) RMSE ótimo, (b) MAPE ótimo, (c) RMSE Médio e (d) MAPE Médio.

Já a Figura 93 permite observar os valores médios e ótimos do MAPE e do RMSE para cada topologia analisada da rede neural cuja saída é a sensibilidade de fase  $S_{fas}$  [113].



Figura 93 – Análise do desempenho da rede, que modela a sensibilidade de fase do efeito GMI, em relação aos pontos do conjunto de teste - (a) RMSE ótimo, (b) MAPE ótimo, (c) RMSE Médio e (d) MAPE Médio.

Observando-se as Figuras 92 e 93, percebe-se que o MAPE assume valores elevados, tanto para a rede que modela  $S_{mod}$  quanto para a que modela  $S_{fas}$ . No entanto, deve-se ressaltar que ambos os conjuntos de teste apresentam um grande número de amostras (sensibilidades) com valores extremamente pequenos, o que tende a aumentar o MAPE. Por exemplo, no caso do módulo, o valor mínimo da sensibilidade  $S_{mod}$  é cerca de 9,8 × 10<sup>-6</sup>  $\Omega$  Oe<sup>-1</sup>, e no caso da fase o valor mínimo da sensibilidade  $S_{fas}$  é aproximadamente (2,9 × 10<sup>-4</sup>)<sup>o</sup> Oe<sup>-1</sup>.

Nota-se também que, em geral, os valores do MAPE obtidos para a rede que modela  $S_{fas}$  são superiores aos da rede que modela  $S_{mod}$ . Este fato está relacionado ao conjunto de dados (treinamento+validação+teste) referente à  $S_{mod}$ , o qual possui 1970 elementos, ter apenas 422 valores, em módulo, superiores a 1  $\Omega$  Oe<sup>-1</sup>. Por outro lado, no conjunto de dados (treinamento+validação+teste) referente a  $S_{fas}$ , o qual também possui 1970 elementos, existem 1248 valores, em módulo, superiores a 1° Oe<sup>-1</sup>. Ou seja, a quantidade de valores pequenos (numericamente menores que 1) presente no conjunto de dados referente a  $S_{mod}$  é maior do que a presente em  $S_{fas}$  e, consequentemente, o MAPE relacionado a  $S_{fas}$  tende a ser menor do que o relacionado a  $S_{mod}$ . A fim de se utilizar uma métrica de erro menos influenciada pela presença de valores pequenos no conjunto de dados, utilizou-se o RMSE – também apresentado nas Figuras 92 e 93.

Tendo em vista um compromisso entre os resultados do MAPE e do RMSE, concluiu-se que ambas as redes podem ser satisfatoriamente implementadas com duas camadas escondidas tendo 10 neurônios em cada. A Figura 94 representa a topologia adotada.



A configuração ótima para a topologia selecionada da rede que modela  $S_{mod}$  apresentou um RMSE de 0,5164  $\Omega$  Oe<sup>-1</sup> e um MAPE de 247 %. A Figura 95 apresenta a comparação entre a saída da rede neural, que modela a sensibilidade de módulo, e os valores alvo, ou seja, os valores de sensibilidade advindos do conjunto de teste.



Figura 95 – Comparativo entre a saída da rede ( $S_{mod}$ ) e os dados experimentais (alvos) pertencentes ao conjunto de teste.

A configuração ótima para a topologia selecionada da rede que modela  $S_{fas}$  apresentou um RMSE de 0,7840° Oe<sup>-1</sup> e um MAPE de 160 %. A Figura 96 apresenta a comparação entre a saída da rede neural, que modela a sensibilidade de fase, e os valores alvo, ou seja, os valores de sensibilidade advindos do conjunto de teste.



Figura 96 – Comparativo entre a saída da rede ( $S_{tas}$ ) e os dados experimentais (alvos) pertencentes ao conjunto de teste.

Pode-se notar, das Figuras 95 e 96, que as redes neurais desenvolvidas conseguem aproximar satisfatoriamente o comportamento das sensibilidades  $S_{mod}$  e  $S_{fas}$  das amostras GMI [113].

# Apêndice B Características do Circuito Eletrônico do Transdutor GMI

### B.1. Configuração Mecânica da PCB

As dimensões da PCB utilizada para montagem do *módulo I* do ciruito eletrônico do magnetômetro GMI, cujo esquemático é mostrado na Figura 51, são apresentadas na Figura 97.

O circuito eletrônico é montado na região denominada "parte A", enquanto que a amostra GMI é posicionada no extremo da "parte B", de modo a se garantir um afastamento mínimo entre o sensor e o circuito eletrônico montado. Dessa forma, minimiza-se a interferência magnética, gerada pelo circuito eletrônico, sobre o elemento sensor GMI.



Figura 97 – Configuração mecânica da PCB desenvolvida para montagem do circuito eletrônico do magnetômetro GMI.

## B.2. Lista de Componentes

## B.2.1. Módulo I

A Tabela 9 apresenta a lista de componentes ativos empregados no circuito eletrônico desenvolvido para implementação do *módulo I*, mostrado na Figura 51, e a Tabela 10 contém a lista de componentes passivos.

Tabela 9 – Lista dos componentes ativos empregados no circuito eletrônico do *módulo I*, apresentado na Figura 51.

Componentes Ativos			
Símbolo	Modelo	Encapsulamento	Quantidade
U1 e U2	OPA2822U	SOIC / 8 pinos	2
Q1	FDC6304P	SuperSOT / 6 pinos	1
U4 e U5	AD8611	SOIC / 8 pinos	2
U6	SN74AHCT1G86DBVT	SOT-23 / 5 pinos	1
U8	INA129U	SOIC / 8 pinos	1
U9 e U10	MAX16910CASA8/V+	SOIC / 8 pinos	2
U12, U13 e U14	AD8599ARZ	SOIC / 8 pinos	3

Tabela 10 – Lista dos componentes passivos empregados no circuito do *módulo I*, apresentado na Figura 51.

Componentes Passivos			
Resistores de Filme Metálico			
Resistores	Valor	Modelo	Quantidade
R <sub>7</sub>	3R9	SFR16S0003908JA500	1
R <sub>33</sub>	10R	SFR16S0001009FR500	1
R <sub>S1A</sub>	22R1	SFR16S0002219FR500	1
R <sub>8A</sub>	30R1	SFR16S0003019FR500	1
R <sub>8B</sub>	47R5	SFR16S0004759FR500	1
R <sub>34</sub> e R <sub>42</sub>	49R9	SFR16S0004999FR500	2
R <sub>3</sub>	150R	SFR16S0001500FR500	1
R <sub>6</sub> , R <sub>9</sub> e R <sub>10</sub>	200R	SFR16S0002000FR500	3
$R_{35}, R_{X2} e R_{X3}$	499R	SFR16S 1% R5 499R	3
R <sub>G2A</sub>	909R	SFR16S0009090FR500	1
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>38</sub> e	1kR	SFR16S0001001FR500	4
R <sub>G1A</sub>			
R <sub>4</sub> e R <sub>5</sub>	1k5R	SFR16S0001501FR500	2
$R_{21}, R_{22}, R_{23},$	4k75R	SFR16S0004751FR500	9
$R_{24}, R_{25}, R_{26},$			
R <sub>28</sub> , R <sub>36</sub> e R <sub>37</sub>			
R <sub>X4</sub>	10kR	SFR16S0001002FR500	1
R <sub>32</sub>	22k1R	SFR16S0002212FR500	1

3
2
4
12)
Quantidade:
1
2
6
23
3
1
3
12
7
,
, 
Quantidade
Quantidade 4
<b>Quantidade</b> 4
Quantidade 4 Quantidade
Quantidade 4 Quantidade 1
Quantidade 4 Quantidade 1 2
Quantidade 4 Quantidade 1 2 1

Os principais aspectos dos componentes ativos já foram discutidos ao longo do capítulo 4. No entanto, devido à necessidade de alta resolução requerida pelo transdutor magnético GMI desenvolvido, durante seu projeto, atentou-se inclusive para as características dos elementos passivos empregados, objetivando-se a minimização do ruído eletrônico total. Dessa forma, os aspectos mais relevantes envolvidos na seleção destes componentes serão aqui discutidos.

Todos os resistores utilizados no circuito são de filme metálico, a maioria dos quais são da família SFR16S (*Vishay*), com tolerância de ±1 %, potência nominal de 500 mW, baixo coeficiente de temperatura ±100 ppm/°C e baixo ruído 0,1  $\mu$ V/V. As exceções são as resistências  $R_7$  e  $R_{16}$ , ambas de 3,9  $\Omega$ , as quais, apesar de também serem da família SFR16S, apresentam tolerância de ±5 %; além

das resistências  $R_{27}$ ,  $R_{39}$ ,  $R_{40}$  e  $R_{41}$ , todas de 330 k $\Omega$ , as quais possuem tolerância de ±1 %, potência nominal de 125 mW, baixo coeficiente de temperatura ±50 ppm/°C e baixo ruído. Os baixos coeficientes térmicos das resistências contribuem para a redução do ruído térmico total e, por sua vez, os baixos níveis de ruído intrínseco das resistências contribuem para a redução do ruído eletrônico total.

Todos os potênciometros utilizados são multivoltas (25 voltas) da família 3296W (*Bourns*) com tolerância de  $\pm 10$  %, potência nominal de 500 mW e baixo coeficiente de temperatura  $\pm 100$  ppm/°C. O ruído térmico dos potenciômetros é da ordem do apresentado pelos resistores, de modo que ambos contribuem de forma similar para o ruído térmico total. A tolerância dos potenciômetros é significativamente superior à dos resistores utilizados, porém este não é um problema grave, visto que a tolerância refere-se ao valor de fundo de escala, sendo que a resistência dos potenciômetros é ajustável. Por fim, o fato dos potenciômetros empregados serem multivoltas permite que se ajuste com precisão os valores de suas resistências.

Todos os capacitores empregados são capacitores cerâmicos multicamadas SMD (*surface mounting device*) com encapsulamento 1812 (4,5 mm x 3,2 mm), à exceção do capacitor  $C_{XI}$  utilizado no ponto de ajuste, o qual também é um capacitor cerâmico multicamadas, porém com encapsulamento radial, a fim de se facilitar a manipulação. Os capacitores cerâmicos multicamadas foram selecionados devido a apresentarem alta estabilidade térmica, baixa tolerância e fatores de qualidade (Q – *Quality Factor*) elevados, mesmo para frequências razoavelmente altas.

Os capacitores de 100 pF (*Kemet*), 1 nF (*Kemet*) e 100 nF (*TDK*), apresentam dielétricos COG e tolerâncias de ±5 %; os de 10 nF (*Vishay*) apresentam dielétricos COG e tolerâncias de ±1 %; aqueles de 1  $\mu$ F (*Kemet*), 4,7  $\mu$ F (*Kemet*), 6,8  $\mu$ F (*TDK*) e 10  $\mu$ F (*Kemet*) apresentam dielétricos X7R e tolerâncias de ±10 %; por sua vez, os capacitores de ajuste  $C_{XI}$  apresentam dielétricos X7R e tolerâncias de ±5 %.

Os capacitores com dielétricos C0G são ultra-estáveis termicamente, exibindo coeficientes de temperatura de  $\pm$  30 ppm/°C e ESRs (*Equivalent Series Resistance*) extremamente baixos; enquanto que os com dielétricos X7R são estáveis termicamente, exibindo uma variação máxima admissível de  $\pm$ 15 % de seu valor de capacitância nominal, para variações térmicas entre -55 °C e 125 °C, além de possuirem ESRs (*Equivalent Series Resistance*) razoavelmente baixos.

## B.2.2. Módulo II

A Tabela 11 apresenta a lista de componentes ativos empregados no circuito eletrônico desenvolvido para implementação do *módulo II*, mostrado na Figura 50, o qual foi montado numa placa de circuito universal. A Tabela 12 contém a respectiva lista de componentes passivos.

Tabela 11 – Lista dos componentes ativos empregados no circuito eletrônico do *módulo II*, apresentado na Figura 50.

Componentes Ativos			
Símbolo	Modelo	Encapsulamento	Quantidade
U15	LM317	TO-220 / 3 pinos	1
U16	LM337	TO-220 / 3 pinos	1
U17	MAX16910CASA8/V+	SOIC / 8 pinos	1
U18	LTC6900	TSOT-23 / 5 pinos	1
U19 e U 20	OPA2822U	SOIC / 8 pinos	2

Tabela 12 – Lista dos componentes passivos empregados no circuito do *módulo II*, apresentado na Figura 50.

<b>Componentes Passivos</b>			
Resistores de Filme Metálico			
Resistores	Valor	Quantidade	
R46	120R	1	
R <sub>44</sub>	240R	1	
R <sub>49</sub> e R <sub>51</sub>	300R	2	
R <sub>56</sub>	330R	1	
R45	430R	1	
R <sub>72</sub>	499R	1	
R <sub>63</sub>	680R	1	
R <sub>70</sub>	750R	1	
R <sub>58</sub> , R <sub>60</sub> e R <sub>67</sub>	1kR	3	
R <sub>65</sub>	1k2R	1	
R <sub>50</sub>	1k3R	1	
R <sub>42</sub>	1k5R	1	
R <sub>43</sub>	2kR	1	
R <sub>64</sub>	4k7R	1	
R <sub>48</sub>	5k6R	1	
R <sub>57</sub>	8k2R	1	
R <sub>55</sub> , R <sub>62</sub> e R <sub>69</sub>	9k1R	3	

R <sub>54</sub> , R <sub>61</sub> e R <sub>68</sub>	20kR	3	
R <sub>66</sub>	36kR	1	
R <sub>59</sub>	43kR	1	
R <sub>71</sub>	51kR	1	
R <sub>52</sub> e R <sub>53</sub>	100kR	2	
R <sub>47</sub>	150kR	1	
Capacitores Cerâmicos (radiais)			
Capacitores	Valor	Quantidade	
C <sub>72</sub> e C <sub>74</sub>	47 pF	2	
C <sub>76</sub>	100 pF	1	
C <sub>71</sub> , C <sub>73</sub> e C <sub>75</sub>	1 nF	3	
C <sub>62</sub> , C <sub>65</sub> e C <sub>70</sub>	100 nF	3	
C <sub>64</sub> , C <sub>67</sub> e C <sub>68</sub>	1 uF	3	
C <sub>69</sub>	4,7 uF	1	
C <sub>63</sub> e C <sub>66</sub>	10 uF	2	
Potenciômetros (25 voltas)			
Potenciômetros	Valor Nominal	Quantidade	
P <sub>9</sub> e P <sub>10</sub>	100R	2	
P <sub>12</sub>	1kR	1	
P <sub>11</sub>	100kR	1	