

Medidor residencial não-invasivo de baixo custo para análise do consumo de energia elétrica

Valéria Cristina dos Santos Silva
Lia Toledo Moreira Mota
Josué Marcos de Moura Cardoso
Vitor Chaves de Oliveira
Daniel Braga Barros
CEATEC
PUC-Campinas
Campinas, Brasil
vahhchristinaa@gmail.com

Lorenzo de Campos Coiado
FEC
UNICAMP
Campinas, Brasil

Rômulo Gustavo Eugênio dos Anjos
FEEC
UNICAMP
Campinas, Brasil

Abstract—This work aims to present a nonintrusive monitoring method to analyze the power curve of a power distribution board installed on a building. The method consists of a sensor, which has a low cost of hardware and software implementation, to measure the current flow through the power distribution board. The device be directly installed on the circuit of the residential power distribution board to provide real-time data of energy usage to the user. Due its easy assembly, the device facilitates the implementation of new procedures that highlight the importance of rational and efficient use of electricity. The sensor is built using concentric solenoids with a ferrite core. The ferrite was chosen due its low cost and its excellent response for low frequencies applications, which is the case of Brazilian electrical network that operates at 60Hz. The laboratory tests showed that it was possible to describe this sensor relating the dimensions of ferrite core and the number of transformer coils. The electric current, that circulates inside the through the power distribution board, flows through the primary coil of transformer. Then, due the electromagnetic field created, it induces a current in the secondary coil. Using the Least Squares Method is possible to determine the efficiency of the current sensor of the transformer with a ferrite core. The smallest ferrite core has an efficiency of 2.9 percent. The efficiency measured on previous works using the best configuration of ferrite core was 2 percent. Therefore, the results presented on this work reveal that ferromagnetic core is a viable procedure to retain the magnetic flow of a circuit. In this context, the method proposed has the advantage of making possible to install the sensor directly on a power distribution board of a building. Therefore, it would be possible to provide the load analysis of the whole building and not just for a particular system.

Keywords—Energy efficiency, energy consumption, current sensor, nonintrusive method.

I. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais há uma grande preocupação com a escassez de recursos naturais. Segundo diversos autores a degradação ambiental e a perda de qualidade de vida devido ao progresso

econômico tem sido amplamente discutido [1-4]. Neste mesmo cenário observa-se um aumento na demanda de energia elétrica nos últimos anos, obrigando os setores econômicos e governamentais a implementarem práticas visando o aumento da eficiência energética.

O desenvolvimento de dispositivos que demandam um consumo e energia inferior como os televisores e as lâmpadas LED (Light Emitter Diode) e a implementação de programas governamentais baseados no uso eficiente da energia elétrica, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) e a Lei da Eficiência Energética são algumas alternativas propostas para amenizar o aumento nesta demanda energética [5-6]. Mesmo assim, a demanda por energia elétrica continua crescendo, em grande parte devido ao aumento do poder aquisitivo e a inserção de novas tecnologias em setores como a indústria, transporte e residências. Sendo o setor residencial responsável por cerca de 25% da demanda total de eletricidade do país [7-8].

O relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2018 mostra que o total da geração de energia elétrica no Brasil atingiu a marca de 588 TWh, que comparado ao ano anterior demonstra um aumento de 1,6%. Quando se analisa o consumo de energia observa-se um crescimento de 1,2% comparado ao ano de 2016, totalizando um consumo de 526, TWh [7]. Com base nestes dados, o Plano Nacional de Energia estima que em 2050 observando apenas o setor residencial brasileiro haverá um aumento de 212 TWh quando comparado ao ano de 2013, passando assim de um consumo de 124 TWh para um consumo de 336 TWh [8].

Diante deste cenário torna-se necessária a adoção de medidas de conscientização do uso racional da energia elétrica. Além das políticas de conscientização, os sistemas que informam o consumo de energia em tempo real são importantes para que o próprio usuário monitore o seu padrão de consumo e implemente medidas para essa redução. Estes sistemas de monitoramento se propõe a capturar informações contínuas a

respeito de valores de corrente e tensão dos quadros de energia residenciais com o objetivo de fornecer valores de energia consumida naquela residência e através de um microprocessador apresentam essas informações de forma simples e eficiente ao usuário [11-14].

Em meados dos anos 80 surgiram as técnicas de monitoramento de consumo residencial, que pode ser dividido em duas tipologias: invasivo e não-invasivos [10]. Inicialmente surgiram nas residências uma abordagem de monitoramento invasivo aplicado as tomadas elétricas, sendo necessário um dispositivo para cada equipamento que se desejava monitorar e depois um levantamento do consumo residencial. Porém, era necessário um sensor para cada dispositivo que se desejava monitorar, o que tornava o custo extremamente elevado. Já o monitoramento não-invasivo torna possível a detecção da quantidade de energia elétrica consumida em uma residência através de um único ponto, o quadro de distribuição [11-12].

O sistema de monitoramento não-invasivo é composto normalmente por um hardware complexo em que se necessita, na grande maioria das vezes, um técnico especializado para colocar os sensores junto ao quadro de distribuição e um software que identifique as variáveis elétricas (corrente, tensão e fator de potência) e seja capaz de detectar a carga total do dispositivo [15-17].

A grande maioria das técnicas empregadas neste monitoramento são algoritmos extremamente complexos, como por exemplo análise do espectro da frequência da corrente utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) [18] ou a assinatura de carga utilizando a Estatística de Ordem Superior (EOS) [19]. Existem ainda propostas com hardwares de baixo custo que implementam técnicas de desagregação das variáveis elétricas atreladas a microcontroladores e aplicando o conceito de Internet das Coisas [20-21]. Porém, a maioria destes métodos foram aplicados em dispositivos específicos, como nos sistemas invasivos.

Desta forma este trabalho visa apresentar um método de monitoramento não-invasivo para análise do consumo de energia residencial através de um sensor que mede a indução de corrente que flui sobre o quadro de distribuição de energia, sendo este de baixo custo de hardware e software.

II. VERIFICAÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA

O autor [22] descreve em seu trabalho um método não destrutivo para análise do consumo ou geração de energia elétrica em circuitos de baixa corrente através de um sensor de solenoides concêntricos com núcleo de ar, que era instalado em um condutor elétrico do quadro de distribuição da edificação em questão.

Sabendo-se a corrente elétrica que flui sob um determinado circuito, calculada pelo sensor desenvolvido, e a tensão do terminal do circuito elétrico (tensão conhecida e correspondente a tensão nominal), torna-se possível através das equações (1) e (2) [22] determinar a geração e o consumo de energia.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt \quad (2)$$

Onde “P” corresponde a potência do circuito em questão dada em Watts, a tensão “V” em Volts é a tensão nominal, “I” é a corrente em Ampères e a Energia “E” é calculada pela integral da potência em relação ao tempo “t” em horas. Em uma edificação a tensão já é conhecida no quadro de energia e a potência é dada pela variação da corrente. O sensor proposto tem como objetivo mensurar a corrente através da indução eletromagnética e através desta corrente calcular a potência e a energia produzida da edificação analisada.

III. SENSOR PROPOSTO

O sensor proposto consiste em solenoides concêntricos, sem um núcleo pré-determinado, possibilitando a utilização de núcleos de ferrite e neodímio. O sensor desenvolvido por [22] consistia em solenoides concêntricos com núcleo de ar, porém, nesta configuração o fluxo magnético se dissipava com facilidade reduzindo a eficiência do sensor. Como alternativa propõe-se a utilização de núcleos ferromagnéticos com o objetivo de reter o fluxo magnético gerado no circuito da edificação ampliando a precisão e confiabilidade do método.

Os núcleos de ferrite normalmente são utilizados para frequências mais baixas, excelente para a aplicação na rede elétrica, que opera em 60 Hz. Para o sensor desenvolvido a corrente elétrica do circuito em questão flui na bobina primária do transformado (I_f) e induz, através de um campo eletromagnético, uma corrente na bobina secundária (I_i). Matematicamente existe uma relação entre essas duas correntes, que através de deduções em [13] é determinada na equação (3):

$$|I_i| = \eta \cdot |I_f| \quad (3)$$

O coeficiente η pode ser adotado com a eficiência do transformador. A equação (3) mostra que a corrente induzida é linearmente relacionada a corrente primária e, por isso, a relação entre elas pode ser determinada pela equação (4) de função linear.

$$y = a \cdot x \quad (4)$$

Onde x e y correspondem ordenadamente à entrada e saída do sistema sob análise e o coeficiente angular “a” diz respeito à eficiência do transformador a ser determinada.

Através do método dos mínimos quadrados é possível determinar essa eficiência. Este método depende da representação vetorial das entradas e saídas do sistema sob análise, conforme a equação (5):

$$\eta = [(\hat{i}_f)^T \cdot (\hat{i}_f)]^{-1} \cdot (\hat{i}_f)^T \cdot (\hat{i}_i) \quad (5)$$

IV. GEOMETRIA DOS SOLENOIDES

Foi desenvolvido um solenoide com núcleo de ar, correspondente ao enrolamento primário do sensor, com 10 espiras tendo distância de 1 cm entre si com bitola de fio de 2,5 mm, seguindo o modelo proposto por [22]. No modelo utilizado, o diâmetro das espiras era de 2,0 cm e na modelo atual foi 4,0 cm, conforme a Figura 1.



Fig. 1. Solenoide com núcleo de ar

Foram construídos solenoides com núcleo de ferrite, devido à propriedade eletromagnética deste material, o torna mais apropriado para a concatenação do campo eletromagnético na faixa de 50 à 60Hz. Os ferrites utilizados tem diferentes dimensões e quantidade de espiras etiquetados de acordo com suas características conforme a Tabela 1.

TABELA 1. DESCRIÇÃO DOS FERRITES UTILIZADOS

Ferrite	Nº de espiras	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Volume (cm³)	Massa (g)
A	70	1	5	3,93	17,72
B	75	1	5	3,93	17,72
C	40	0,6	3	0,85	4,25
D	50	0,6	4	1,13	6,01
E	130	1	10	7,85	35,43
F	130	0,6	9	2,54	12,75

V. TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO

A bancada de testes utilizada por [22] para construção do protótipo foi mantida, conforme a Figura 2, para testes do sensor com núcleo magnético de ferrite.

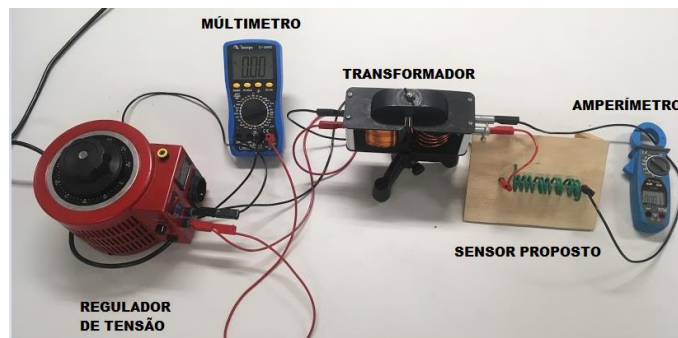


Fig. 2. Bancada de Testes

O dispositivo denominado VARIAC é um equipamento regulador de tensão AC que varia entre 0 e 250V, ligado ao mesmo tem-se um multímetro digital para facilitar a visualização da tensão injetada pelo VARIAC. O transformador foi montado de modo a funcionar como um abaixador de tensão de relação 800: 5 espiras no primário e no secundário respectivamente. Acoplado ao secundário do transformador encontra-se o sensor indutor utilizado para gerar um campo eletromagnético rotatório envolta do mesmo. Junto ao polo negativo do sensor encontra-se um Alicate Amperímetro para verificar a corrente do primário do sensor.

Para realizar os ensaios referente aos núcleos de ferrite no interior do sensor proposto foram inseridos o enrolamento ferromagnético nas diferentes configurações. Estes possuindo suas extremidades ligadas à um multímetro para verificação da corrente induzida.

VI. RESULTADOS E ANÁLISE

Conforme descrito no item 4 os solenoides de ferrite foram etiquetados de acordo com suas características (dimensões e número de espiras).

A. Ferrite A

O Ferrite A é caracterizado por 1 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento, com massa de 17,71g e 70 espiras de fio de cobre. Na figura 3 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 2,09 mA.

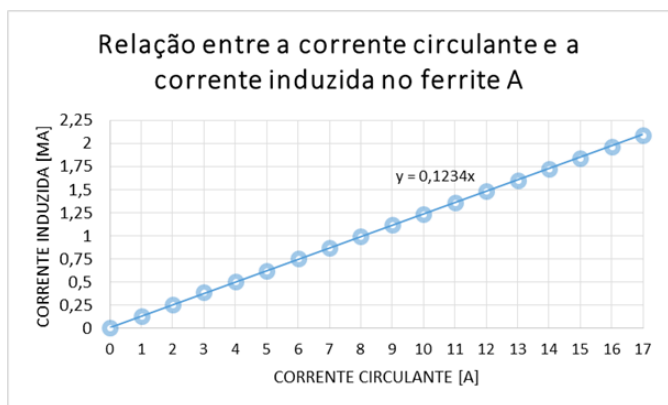


Fig. 3. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite A

B. Ferrite B

O Ferrite B é caracterizado pelas mesmas dimensões do Ferrite A, porém enquanto o anterior possui 70 espiras o ferrite B possui uma configuração de 75 espiras. Na figura 4 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 2,09 mA, sendo que a diferença de apenas 5 espiras não influencia diretamente nesta relação.

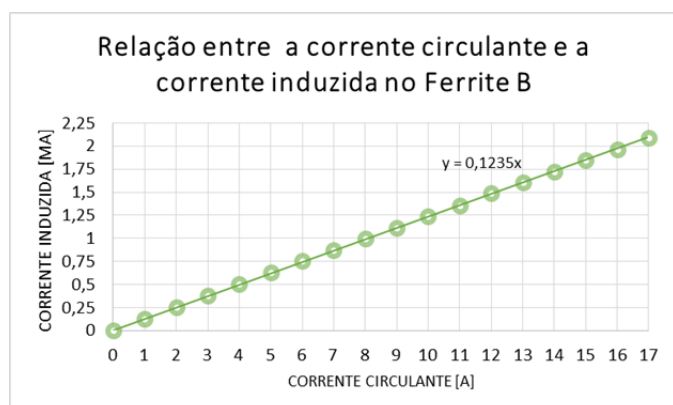


Fig. 4. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite B

C. Ferrite C

O Ferrite C é caracterizado por 0,6 cm de diâmetro, 3 cm de comprimento, massa de 4,25g e 40 espiras, sendo o ferrite de menor dimensão. Na figura 5 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 0,505 mA.

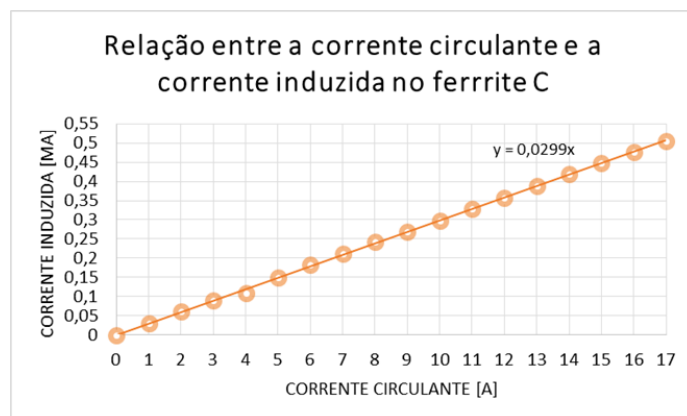


Fig. 5. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite C

D. Ferrite D

O Ferrite D é caracterizado por 0,6 cm de diâmetro, 4 cm de comprimento, massa de 6,01 g e 50 espiras. Na figura 6 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 0,781 mA.

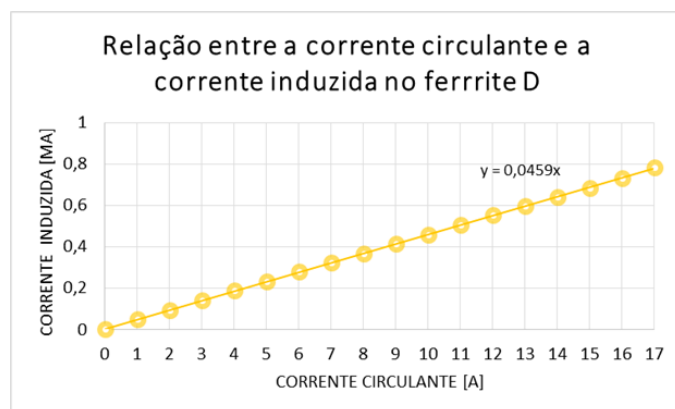


Fig. 6. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite D

E. Ferrite E

O Ferrite E é caracterizado por 1 cm de diâmetro, 10 cm de comprimento, massa de 35,43 g e 130 espiras, sendo a maior dimensão de ferrite utilizada nos ensaios. Na figura 7 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 84,2 mA.

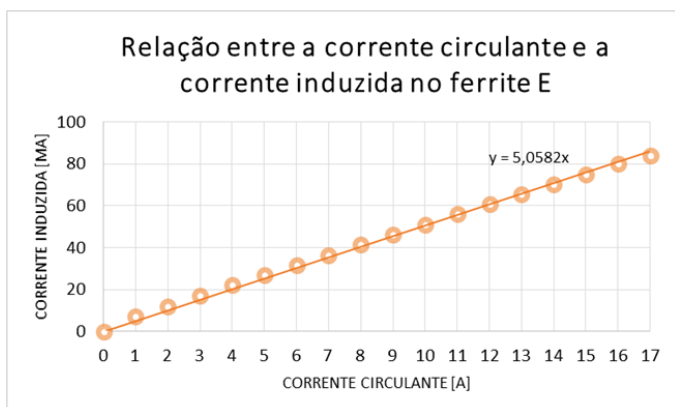


Fig. 7. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite E

F. Ferrite F

O Ferrite F é caracterizado por 0,6 cm de diâmetro, 9 cm de comprimento, massa de 12,75 g e 130 espiras, sendo a segunda maior dimensão de ferrite utilizada nos ensaios. Na figura 8 encontra-se a relação entre a corrente que circula no enrolamento primário do sensor proposto e a corrente induzida em consequência da mesma. Observa-se que existe uma relação linear entre as mesmas e para uma corrente circulante de 17 A há uma corrente induzida de 28,75 mA.

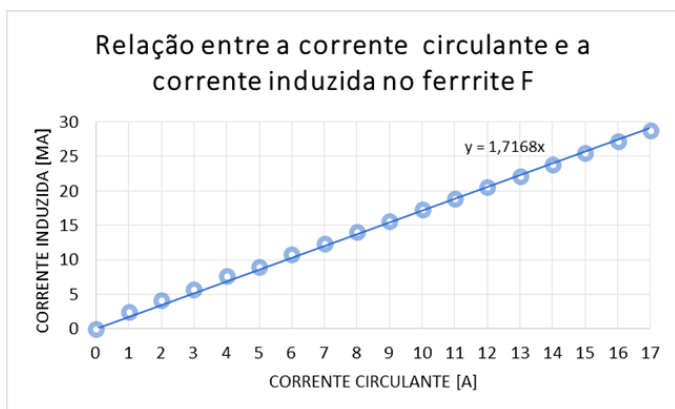


Fig. 8. Gráfico da relação entre a corrente circulante e a corrente induzida no Ferrite F

VII. MODELO MATEMÁTICO

Utilizando as equações (3) e (4) do tópico 2 deste trabalho pode-se determinar os modelos matemáticos para os diferentes núcleos de ferrite, conforme a Tabela 2.

TABELA 2. MODELO MATEMÁTICO PARA A CORRENTE CIRCULANTE (IF) VERSUS A CORRENTE INDUZIDA (II)

Ferrite	Modelo Matemático
A	$I_i = 0,1234 \times I_f$
B	$I_i = 0,1235 \times I_f$
C	$I_i = 0,0299 \times I_f$
D	$I_i = 0,0459 \times I_f$
E	$I_i = 5,0582 \times I_f$
F	$I_i = 1,7168 \times I_f$

VIII. COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚCLEOS DE FERRITE

Conforme os testes realizados, o ferrite melhora a eficiência do sensor proposto. Conforme o aumento do tamanho do núcleo ferromagnético e da quantidade de espiras têm-se uma melhor resposta. Com o levantamento dos modelos matemáticos pode-se classificar os ferrites conforme sua eficiência, onde o Ferrite E apresenta a maior eficiência e o Ferrite C a menor. O ferrite com menor dimensão apresenta uma eficiência de 2,9% o que pode ser considerado superior ao sensor desenvolvido pelo autor [22], que apresentava uma eficiência de 2% em sua melhor configuração, o que demonstra a viabilidade da utilização de núcleos ferromagnéticos como uma forma de reter o fluxo magnético do circuito analisado.

O método aqui proposto é um método de monitoramento da corrente que flui pelo quadro de distribuição da edificação, permitindo ao habitante residencial ter uma noção exata do seu consumo de energia, o que é fundamental para iniciativas relacionadas a redução do consumo de energia elétrica. Atualmente, essa verificação quando é feita de forma extremamente complexa mas voltadas para sistemas e equipamentos específicos, como o sistema de ar condicionado e máquinas de lavar [15-21].

Neste contexto, o método aqui proposto tem a vantagem de poder ser instalado diretamente no quadro de energia da edificação, promovendo assim a análise da carga de toda a edificação e não projetado para um sistema específico. Existe ainda o fato que esse sistema pode ser acoplado a um microcontrolador [22] o que possibilitará uma interface simples e didática que determinará de forma automática ao usuário dados referentes ao consumo de energia, de acordo com as Equações (1) e (2).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de fomento que colaboraram para a execução deste artigo e à Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) pela infraestrutura concedida, como os laboratórios e os equipamentos utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. L. Herzer, Letícia Araujo; Ferreira, "CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS NO BRASIL : UM PANORAMA REFERENTE ÀS CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS PARA EDIFICAÇÕES LEED E AQUA-HQE," in *Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade*, 2016, vol. 8.
- [2] M. Monzoni, A. Vendramini, P. Peirão, F. Rocha, and F. Storino, "Edificações sustentáveis e eficiência energética," 2017.
- [3] A. Battaglini, J. Lilliestam, A. Haas, and A. Patt, "Development of SuperSmart Grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 10, pp. 911–918, 2009.
- [4] J. Haase, G. Zucker, and M. Alahmad, "Energy efficient building automation: A survey paper on approaches and technologies for optimized building operation," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 5350–5356, 2014.
- [5] Procel Edifica. Avaliabe online: <http://www.procelinfo.com.br>. (Accessed on 13/09/2018).

- [6] Poder Legislativo do Brasil, Lei 10.295 de 17/10/2001: Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação de Energia e Uso Racional da Energia e dá outras providências.
- [7] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Balanço Energético Nacional 2018: Relatório Síntese: ano base 2017,” p. 62, 2018.
- [8] EPE, “PNE2050 - Demanda de Energia,” vol. 76, pp. 28–49, 2016.
- [9] E. O’Driscoll and G. E. O’Donnell, “Industrial power and energy metering e a state-of-the-art review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 41, pp. 53–64, 2013.
- [10] M. W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, and Y. Rezgui, “Building energy metering and environmental monitoring - A state-of-the-art review and directions for future research,” *Energy and Buildings*, vol. 120, pp. 85–102, 2016.
- [11] A. Ravishankar, A. Vignesh, V. Vel, S. R. R. Dhiwaakar Purusothaman, and V. Vijayaraghavan, “Low-cost non-intrusive residential energy monitoring system,” *2014 IEEE Conf. Technol. Sustain. SusTech 2014*, pp. 130–134, 2014.
- [12] T. Juhana and A. I. Irawan, “Smart non intrusive power consumption monitoring system,” *Proceeding 2016 10th Int. Conf. Telecommun. Syst. Serv. Appl. TSSA 2016 Spec. Issue Radar Technol.*, no. 1992, pp. 0–3, 2017.
- [13] S. S. Refaat and H. Abu-Rub, “Implementation of smart residential energy management system for smart grid,” *2015 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3436–3441, 2015.
- [14] L. T. M. Mota, A. de A. Mota, and L. C. Coiado, “Non-destructive current sensing for energy efficiency monitoring in buildings with environmental certification,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, pp. 16740–16762, 2015.
- [15] L. Farinaccio and R. Zmeureanu. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses. *Energy and Building*, 30(3):245–259, 1999
- [16] E. R. Proper. Automated classification of power signals. Dept. of mechanical engineering, system desing and management program, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2008
- [17] M. Zeifman and K. Roth. Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook. *Consumer Eletronics - IEEE Transactions*, 57(1):76–84, 2011.
- [18] R.A.S.Fernandes, I.N.daSilva, and M.Oleskovicz. Data mining applied to harmonic current source identification in residential consumers. *IEEE LATIN AMERICAN TRANSACTION*, 9(3):302–310, 2011.
- [19] J.D.S.Guedes, D.D.Ferreira, B.H.G.Barbosa, C.A.Duque, andA.S.Cerqueira. Non-intrusive appliance load identification based on higher-order statistics. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 13(10):3343–3349, 2015.
- [20] G.Srinivasan, C.Anandan, A.K.JainS,S.S.Ahmed, andV.Vijayaraghavan. Lowcost non-intrusive device identification system. In *IEEE, Arlington*, 2016. *Circuits and Systems Conference (DCAS), IEEE*.
- [21] M. Nardello, M. Rossi, and D. Brunelli. A low-cost smart sensor for non intrusive load monitoring applications. *IEEE*, 5(17):1362–1368, 2017.
- [22] L. C. COIADO, “Análise de campos eletromagnéticos em edificações urbanas,” *Dissertação de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana.Pontifícia Universidade Católica de Campinas*, 2015.