

Comparative Analysis of Current Transducers for Development of Smart Plug Through Rank Order Centroid Method

A. Ribeiro, D. Sadok, M. Brito, Á. de Araújo, P. Endo, and J. Kelner

Abstract—The development of electronic design evolves every day. The adequate selection of electronic components is at the heart of a project's success. Therefore, it is necessary to make a preliminary study of the characteristics of the components to be used in order to select the most appropriate ones for each application. For a smart plug project, an essential part is the current measurement system where the transducer represents a critical component. In this context, this paper makes a comparative study among three current transducer technologies: hall effect sensor, current transformer (CT) and shunt resistor. The applied current was measured by conducting a test using an existing sensor available on the market for each technology. In addition, a comparative analysis of the characteristics of the transducers was carried out and for some transducers both qualitative and quantitative analysis were undertaken. Finally, a multicriteria technique is used in the selection of transducers, taking into consideration the weight defined for each criteria in the project, using the mathematical process ROC (Rank Order Centroid). From the analysis, we can state that the hall effect sensor presents the best results when compared to the other transducers.

Index Terms—Electrical Current Measurement, Transducer, Current Sensing, Multicriteria Comparison, Decision Matrix, Rank Order Centroid Method.

I. INTRODUÇÃO

ATIVIDADES da comunicação, indústria e transporte dependem substancialmente do fornecimento confiável de energia elétrica para operarem [1]. Consequentemente, o gerenciamento do sistema de fornecimento de energia tem se tornado extremamente crucial, sendo necessário otimizar a eficiência energética, reduzir os custos de produção e distribuição de energia e também minimizar as emissões de gases. No cenário de casas inteligentes (*smart homes*), por exemplo, é bastante comum encontrar sistemas de gerenciamento de energia baseados em dispositivos IoT (*Internet of Things*). Estes dispositivos integrados a soluções inteligentes de tomadas de decisões [2] possibilitam automatizar tarefas que auxiliam a redução do consumo

Andrea Maria N. C. Ribeiro, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: amnc@cin.ufpe.br).

Djamel Sadok, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: jamel@cin.ufpe.br).

Marcio Evaristo C. Brito, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: marcio.evaristo@ufpe.br).

Álvaro de Araújo Cavalcanti, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: alvaro.cavalcanti@ufpe.br).

Patricia T. Endo, Universidade de Pernambuco (UPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: patricia.endo@upe.br).

Judith Kelner, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil (e-mail: jk@cin.ufpe.br).

de energia, detectando a presença humana no ambiente e desligando equipamentos que não estejam em uso, por exemplo.

Para tanto, é necessário que instrumentos de medição de corrente, denominados *smart plugs*, sejam instalados nestes ambientes. Estes dispositivos podem ser utilizados para monitorar a intensidade de corrente, controlar a corrente ao longo do tempo, bem como investigar processos e fenômenos fora do comportamento comum. Porém, um dos maiores desafios desse sistema de monitoramento de energia é encontrar tecnologias apropriadas para a obtenção de medidas precisas e mais exatas.

Os erros e ruídos de medição estão presentes em todos os sistemas de medição, pois não existem sistemas e operadores perfeitos; nem medições e ambientes controlados de forma estável. Logo, é pouco provável eliminar os erros e incertezas de medição, mas é possível reduzi-los através do controle e estudos das suas principais fontes.

Os erros e incertezas presentes em instrumentos eletrônicos são oriundos das partes envolvidas no sistema de medição: aquisição de sinais, conversão e reconstrução. A Tabela I [3] mostra possíveis fontes de erros e incertezas em circuitos eletrônicos.

TABELA I
FONTES DE ERROS E INCERTEZAS EM CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Sistema	Fonte de Erro	Descrição
Aquisição de Sinais	Transdutor	Não linearidade
	Interface	Terminação do circuito
	Amplificador	Erro dos componentes
	Filtro passa baixa	Erro na amplitude em função do ganho e fase
Conversão	Qualidade do sinal	Exatidão do sinal
	Multiplexador	Erros de transferência e inerentes ao componente
	Amostrador	Erros de aquisição e inerentes ao componente
	Resolução	Interpolação do sinal
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído
Reconstrução	Filtro	Atenuação devido a amostragem
	Conversor A/D	Erros de quantização
	Conversor A/D	Erros inerentes ao componente
	Filtro	Atenuação devido a reconstrução
	Filtro passa baixa	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído
	Resolução	Erro na amplitude do sinal reconstruído

É possível observar que, no sistema de aquisição de sinais,

uma das principais fontes de erro é o transdutor utilizado no módulo de entrada do sistema de medição [4]. Logo, quando um projeto está sendo desenvolvido, é fundamental a escolha correta do dispositivo sensor mais apropriado para que as medidas sejam mais próximas das reais.

É relevante ressaltar que, como cada projeto tem características próprias, as análises e escolhas dos dispositivos dependerão diretamente dos requisitos do sistema. Para projetos com especificações diferentes, serão necessários novos e específicos estudos, podendo utilizar ferramentas e metodologias similares. Por exemplo, em [5] foi realizado um estudo comparativo entre duas tecnologias de sensores de corrente alternada. Através de experimentos, a análise comparativa tinha o objetivo de indicar o sensor mais apropriado para ser inserido no projeto de monitoramento de energia residencial baseado em energia renovável.

O foco da análise comparativa de transdutores desta pesquisa é subsidiar a escolha mais adequada do transdutor para o projeto de desenvolvimento de um *smart plug*, equipamento híbrido, capaz de medir grandezas elétricas e controlar, de forma individualizada, cargas residenciais remotamente. O *plug* foi especificado para ser um dispositivo de baixo custo, capaz de medir corrente em uma faixa de 0,1 - 10 A e com uma corrente de disparo variável de até 7 A; isto é, se o sistema identificar uma corrente maior ou igual a corrente de disparo preestabelecida, o componente de proteção será disparado e o circuito do *plug* abrirá, impedindo que nenhuma corrente passe para a carga e evitando que a sobrecarga evolua para um evento mais complexo, como um incêndio. A corrente de disparo está relacionada diretamente com as características elétricas da carga conectada ao *plug* e é definida como a corrente que ativará o sistema de proteção.

Para atingir o objetivo dessa pesquisa, realizou-se uma análise quantitativa entre as características de três tecnologias de transdutores diferentes: sensor de efeito *hall*, transformador de corrente (TC), resistor *shunt*; bem como a realização do estudo qualitativo, presente na maioria das pesquisas [6], [7], que serviu para ratificar os dados obtidos. Além disso, este trabalho propõe a utilização do método multicritério e de uma matriz de decisão para definir o transdutor mais adequado para cada projeto. Os métodos multicritérios de tomada de decisão proveem uma classificação e um ranqueamento dos candidatos a solução, apresentando-se como métodos de apoio eficazes para resolução de problemas em que existem critérios conflitantes [8], [9].

O artigo está estruturado em 7 seções: iniciando com a introdução, seguida da Seção II, que apresenta o estudo dos trabalhos relacionados; Seção III, que consta a fundamentação teórica sobre o tema; a Seção IV, que descreve a metodologia utilizada; a Seção V, mostra a análise das características dos transdutores; a Seção VI aplica o método multicritério para a escolha do transdutor mais adequado; finalizando com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros com a Seção VII.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [1], um *smart plug* foi desenvolvido para ser integrado em um cenário de IoT, objetivando o monitoramento

e gerenciamento de energia através de ZigBee. Na sua implementação, não foi realizada qualquer análise comparativa entre as diferentes tecnologias existentes. O dispositivo foi escolhido pelas suas especificações, sem nenhum estudo mais aprofundado como o que foi realizado no desenvolvido neste artigo.

Em [10], foi realizado um projeto de um chip com sensor de efeito *hall* para ser utilizado em medidores de energia residenciais. Foi feito um levantamento dos principais parâmetros do sistema.

Na pesquisa realizada em [5], o objetivo foi determinar o sensor mais adequado e acessível para o monitoramento de energia de uma rede elétrica residencial baseada em fontes de energia renováveis. Um experimento comparativo foi executado utilizando apenas duas tecnologias de transdutores de corrente diferentes, sensor de efeito *hall* e o transformador de corrente. Foi concluído que o transformador SCT 013 é robusto, barato e fácil de implementar do ponto de vista do hardware; já o sensor ACS 712 é um pouco mais caro, porém mais preciso.

Já em [6], os autores analisaram quatro sensores de corrente, avaliando suas características mais relevantes: custo, linearidade no intervalo de medição, capacidade de medir correntes elevadas, consumo de energia, problemas de saturação de altas correntes contínuas, variação do sinal de saída com a variação da temperatura, problemas com *offset* de correntes contínuas e problemas com saturação e histerese.

O trabalho apresentado em [7] investiga as vantagens e limitações de seis tipos de tecnologias de sensores de corrente. As tecnologias consideradas foram: resistor *shunt*, TC, bobina de *rogowski*, sensor de corrente de efeito *hall*, sensor de magneto resistivo (GMR – *Giant Magneto Resistive*) e sensor de magneto impedância (MI – *Magneto Impedance*). A ênfase da pesquisa foi dada às características que aumentam ou limitam o potencial de cada tecnologia avaliada no processo de empacotamento. Os resultados da pesquisa mostraram, de forma comparativa, as características e desempenho das seis tecnologias avaliadas.

As pesquisas apresentam uma análise das características dos transdutores de maneira qualitativa diferente da pesquisa desenvolvida nesse artigo, que apresenta, além de uma análise qualitativa, uma análise quantitativa das características entre os transdutores, sensor de efeito *hall*, TC e resistor *shunt*.

Outro diferencial desta pesquisa é a utilização do método multicritério para auxiliar na escolha do transdutor mais apropriado para um projeto específico (*smart plug*), justificando, assim, a seleção do componente eletrônico a ser utilizado no projeto de sistema embarcado.

III. TRANSDUTORES

O transdutor é definido como módulo de um sistema de medição “que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com a grandeza de entrada” [4]. O transdutor é o elemento responsável pela primeira etapa do sistema de medição e está em contato com o mensurando. Ele é um elemento primordial para o sistema de medição de corrente elétrica e, portanto, é relevante entender as

tecnologias existentes e suas principais características. Para a realização do experimento nesse artigo, três tecnologias de transdutores foram escolhidas: efeito *hall*, TC e resistor *shunt*.

A. Transdutor de Efeito Hall

Sensores magnéticos convertem informações magnéticas ou magneticamente codificadas em sinais elétricos para processamento por circuitos eletrônicos. São dispositivos que estão se tornando cada vez mais populares, pois podem ser utilizados em diferentes aplicações. Uma aplicação dessa tecnologia é o sensor de efeito *hall*, um tipo de sensor magnético cujo sinal de saída é função da densidade do campo magnético.

O sensor de efeito *hall* é utilizado nos sistemas de medição, sendo responsável por converter o campo magnético gerado pela corrente em uma tensão proporcional na saída, V_H , medida por um circuito externo. O seu princípio de funcionamento é dado pelo aparecimento de uma ddp (diferença de potencial), V_H , que será produzida através de um material semicondutor com corrente passante sob influência de um campo magnético gerado perpendicularmente por um condutor.

A força de *Lorentz* é a responsável pelo aparecimento da diferença de potencial, V_H , pois as cargas elétricas tendem a se desviar de sua trajetória, acumulando-se nas superfícies laterais do semicondutor, gerando assim uma tensão na saída. Através da equação abaixo é possível calcular essa diferença de potencial, [11]:

$$V_H = \frac{iB}{nel} \quad (1)$$

Onde:

V_H é a diferença de potencial *hall* entre as superfícies laterais de uma camada condutora;

i é a corrente percorrida ao longo dessa camada condutora;

B é o módulo do vetor campo magnético gerado pela corrente i que se deseja medir;

n é o número de portadores por unidade de volume;

e é a carga elétrica elementar, $1,6 \times 10^{-19} C$;

l é a espessura da camada condutora.

O sensor de efeito *hall* apresenta algumas vantagens e desvantagens devidas as suas características: possibilita medição de corrente alternada e contínua; pode medir corrente alternada com frequências de até centenas de kHz; apresenta isolamento galvânica; é sensível a mudança de temperatura; é um elemento ativo, que precisa ser alimentado por uma fonte de tensão externa, CC, para que entre em operação.

B. Transformador de Corrente (TC)

O TC é um dispositivo constituído por dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo ferromagnético, circuito magnético comum. A maioria dos transformadores de corrente apresenta dois enrolamentos, o enrolamento primário, conhecido como entrada do TC, e o enrolamento secundário, também chamado saída do TC. Na prática, os TCs, na sua maioria, são projetados para funcionar o mais

próximo dos transformadores ideais; logo, é possível aplicar suas propriedades [12] e utilizar a expressão fundamental, equação 2, do transformador ideal para calcular os valores de tensão, corrente dos terminais dos enrolamentos primário e secundário. A lei de *Biot-Savart* e a lei de indução de *Faraday* são as duas leis que regem o princípio de funcionamento do TC.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

Onde:

v_1 e v_2 são as tensões dos terminais dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente;

i_1 e i_2 são as correntes que percorrem os terminais primário e secundário, respectivamente;

N_1 e N_2 são os números de espiras do terminal primário e do terminal secundário respectivamente.

Os TCs têm sido amplamente utilizados para detecção de corrente AC com a sua largura de banda até dezenas de MHz. Esta técnica de detecção fornece isolamento galvânica e consome pouca energia [7].

Os TCs usados como elemento sensor de um circuito de medição de corrente apresentam no enrolamento primário um número de espiras muito menor que no enrolamento secundário e compatível com a corrente que se quer medir. Em alguns TCs, o enrolamento primário é constituído pelo próprio condutor de medição, contendo uma única espira. A corrente aplicada na carga que está conectada em um dos terminais do enrolamento primário será convertida em tensão nos terminais do enrolamento secundário; logo, uma alternativa para obtenção do valor da corrente no secundário do TC é a utilização de um resistor com uma resistência conhecida e a aplicação da lei de Ohm. Após o cálculo da corrente no secundário do TC, é possível calcular o valor da corrente na carga conectada ao enrolamento primário (equação 2).

O TC apresenta algumas vantagens e desvantagens devidas as suas características: mede, apenas, correntes alternadas; mede uma ampla banda de frequência; apresenta isolamento galvânica; corrente no enrolamento secundário proporcional à corrente no primário; elemento passivo.

C. Shunt

O resistor *shunt* é um resistor que apresenta uma resistência muito baixa, isto é $R_{Shunt} \ll R_{Carga}$. Opera como um sensor de corrente, pois monitora o fluxo de corrente de um determinado circuito eletrônico através da queda de tensão, V_{Shunt} , mediante a resistência, R_{Shunt} , inserida em série com a carga. Por ter uma resistência muito baixa a sua inserção em qualquer circuito eletrônico não afetará o funcionamento e medição de corrente do sistema.

O princípio de funcionamento do resistor *shunt* é baseado na Lei de Ohm, equação 3. A sua principal finalidade é a medição da corrente que passa por uma carga através de um determinado circuito.

$$R_{Shunt} = \frac{V_{Shunt}}{I_{Shunt}} \quad (3)$$

O resistor *shunt* apresenta algumas vantagens e desvantagens devidas as suas características: mede corrente alternadas e contínuas até dezenas de MHz; baixo custo; não há isolamento galvânico; aquecimento do resistor quando submetidos a correntes elevadas; é um elemento passivo do circuito.

IV. ENSAIO DE CORRENTE APLICADA

O ensaio de corrente aplicada é o principal ensaio a ser realizado em um transdutor de corrente e tem por objetivo verificar características, tais como: linearidade, precisão e exatidão.

A. Infraestrutura

O experimento foi realizado em um laboratório à temperatura ambiente, com a utilização de um osciloscópio, de uma caixa de aferição de relé de proteção e dos três modelos de transdutores comerciais, cada um com uma tecnologia diferente. Foi utilizado um resistor de $0,1 \Omega$ para representar o resistor *shunt*, o sensor modelo ACS 712 de 20 A para representar o sensor efeito *hall* e um transformador de corrente modelo SCT 013 com relação de espiras de 0,005.

O osciloscópio, modelo TDS1001B da Tektronix, foi responsável em exibir o sinal do circuito com o transdutor de corrente possibilitando extrair valores relevantes, como tensão RMS (*root mean square*) com exatidão de 3%.

O equipamento utilizado para aplicação das correntes desejáveis foi a caixa de aferição de relé de proteção Omicron, modelo CMC 256-6, responsável pela aplicação de corrente e tensões senoidais, ajustáveis em frequência, fase e amplitude, com exatidão de 0,02%.

As características elétricas dos transdutores selecionados estão especificadas na Tabela II.

TABELA II
CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES USADOS NO EXPERIMENTO

	Hall	TC	Shunt
Princípio de Funcionamento	Efeito <i>hall</i>	Lei de <i>Faraday</i>	Lei de Ohm
Corrente nominal(A)	20	100	4,5
Sensibilidade (mV/A)	100	88,5	100
Saída nominal	100 mV/A	$i_1 \cdot 5 \times 10^{-4}$ A	$V_{Shunt}/0,1$ A
Dimensões(CxLxA mm)	32x13x14	57x32x22	15x5x5
Peso(g)	3,2	71	4
Isolação elétrica	sim	sim	não

B. Métricas

As métricas do experimento foram a intensidade de corrente e tensão RMS correspondente a cada circuito com transdutor (Figura 1), com o objetivo de analisar as seguintes características de cada transdutor:

- **Exatidão:** “*refere-se ao grau de proximidade ou concordância entre o valor medido e o valor verdadeiro*” [13].
- **Linearidade:** é uma característica típica de equipamentos cuja relação entre entrada e saída pode ser considerada linear. Assim, a reta é uma forma gráfica que representa

essa relação entre a entrada e a saída para resposta nominal. Não é possível fazer a mesma afirmativa para a característica de resposta real [14], devido às limitações construtivas pela não idealidade dos fenômenos físicos envolvidos [15].

- **Erro de medição:** é definido como a diferença entre o valor indicado pelo sistema e o valor verdadeiro do mensurando [15]. É possível calcular o erro de medição percentual, através da Equação 4.

$$Erro_{Medição}(\%) = \frac{|I_{Medida} - I_{VV}|}{I_{VV}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Onde:

$Erro_{Medição}(\%)$ erro de medição percentual;
 I_{Medida} valor da corrente do sistema de medição;
 I_{VV} valor verdadeiro da corrente.

Para realização do teste, aplicou-se sistematicamente correntes em dois intervalos: o primeiro intervalo foi de 0,05 A até 0,5 A com incrementos de 0,05 A, e o segundo intervalo foi de 1 A até 7 A com incrementos de 0,5 A. A faixa de corrente aplicada no ensaio foi dividida em dois intervalos para possibilitar a análise do comportamento de cada tecnologia dos transdutores de corrente na ordem de miliampere, pois nessa faixa de corrente o sinal analisado é mais sensível a interferências e ruídos da rede elétrica.

C. Procedimento Adotado

Os procedimentos adotados para o ensaio seguiram as seguintes etapas:

- Realização das conexões, seguindo o diagrama da Figura 1, de acordo com cada tipo de transdutor a ser analisado;
- Energização dos equipamentos e do circuito; e
- Aplicação dos valores de corrente, com o auxílio da caixa de teste.

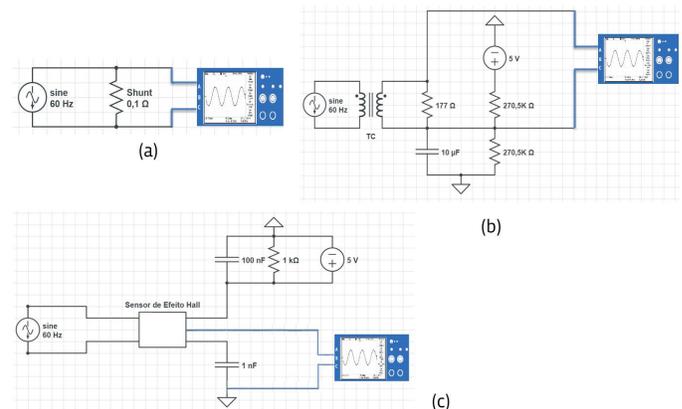


Fig. 1. Circuitos utilizados para o ensaio de corrente aplicada. (a) Uso do resistor *shunt*; (b) Uso do TC; (c) Uso do sensor de efeito *hall*.

Para cada valor de corrente aplicada foram salvos os valores de todos os pontos que formam a curva senoidal da tensão da saída do circuito com o transdutor, além da imagem do osciloscópio com as informações de medição relevantes.

V. RESULTADOS

Após a realização dos experimentos, foi necessário selecionar os dados relevantes para a análise e avaliação da performance. Os valores de tensão RMS capturados pelo osciloscópio foram os dados que subsidiaram a análise dos resultados, juntamente com os valores de corrente de referência correspondente a cada circuito analisado.

A. Exatidão

As Figuras 2 e 3 exibem gráficos que relacionam a corrente injetada (eixo das abcissas) e a corrente medida (eixo das coordenadas). A curva referência da exatidão obtida através da reta ideal está representada em cor preta. Os pontos experimentais representam as medições realizadas por cada tipo de transdutor. A exatidão do transdutor será maior quanto mais próximos esses pontos experimentais estiverem da reta de referência da exatidão (reta ideal).

Analisando o gráfico, da Figura 2 é possível concluir que o transformador de corrente é o transdutor com maior exatidão, ou seja, é o transdutor que fornece valores medidos mais próximos dos valores verdadeiros.

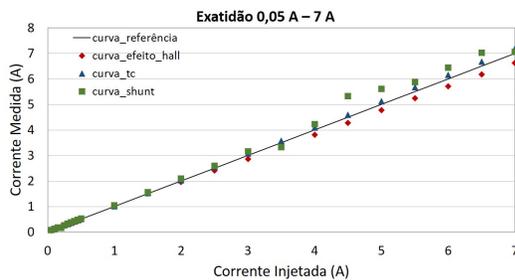


Fig. 2. Análise da exatidão dos valores medidos pelos transdutores na faixa de corrente de 0,05 A até 7 A.

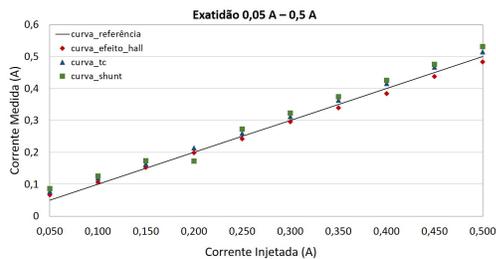


Fig. 3. Análise da exatidão dos valores medidos pelos transdutores na faixa de corrente de 0,05 A até 0,5 A.

Como não foi possível ter uma boa visualização do comportamento da exatidão na faixa de corrente entre 0,05 A e 0,5 A através da Figura 2, foi indispensável uma nova análise da exatidão dos transdutores apenas nessa faixa de corrente. Por meio da Figura 3, é possível afirmar que os valores de correntes medidos foram mais próximos dos valores de correntes verdadeiros na faixa de corrente mais baixa (0,05 A até 0,5 A) para todos os transdutores. Também é possível

observar que nessa faixa de corrente o transdutor de efeito *hall* é a tecnologia com maior exatidão.

B. Linearidade

O erro de linearidade tem relevância na análise de um equipamento ou sensor de medição, pois, através dele, é possível analisar as características de resposta dos equipamentos ou sensores. Ele é definido como a diferença entre duas curvas (a reta referência da linearidade e a curva de calibração) obtida a partir das medições realizadas, ou seja, é um parâmetro que exprime o quanto uma resposta real se afasta de uma reta, [16] [17].

A linearidade independente é um dos tipos existentes de especificação da linearidade e, por ser a especificação preferível na maioria dos casos [3], será utilizada na análise de linearidade dos três transdutores de medição de correntes avaliados.

Cálculos foram realizados para encontrar a reta referência da linearidade da cada transdutor. Na linearidade independente o ajuste da reta referência é dado pelo método dos mínimos quadrados. Assim, de posse dos dados das correntes medidas para cada transdutor e com os dados de corrente verdadeira, os valores de "a" e "b" da equação que representa a reta referência da linearidade $y_{ref} = ax + b$ foram calculados. Utilizando a lista com os valores de x foram obtidos os respectivos valores de y_{ref} , já que a lista com os valores de x e os valores de corrente verdadeira para cada sensor foram obtidos no experimento. Com os valores de y_{ref} , foi possível traçar a reta referência da linearidade (preta) representada na Figura 4, que constituem as respectivas retas de referência dos transdutores de efeito *hall*, transformador de corrente e resistor *shunt*.

Se a curva de calibração (representada na cor vermelha, azul e verde, respectivamente, nos gráficos da Figura 4) de um instrumento para uma determinada entrada não for uma linha reta, ainda assim, o mesmo pode ser muito preciso. Em muitas aplicações, no entanto, o comportamento linear é o mais desejável, tendo em vista que a conversão de uma leitura para o valor medido correspondente da entrada é mais conveniente, pois é necessário realizar apenas uma multiplicação por uma constante fixa, em vez de consultar uma curva de calibração não-linear ou calcular o resultado de uma equação de calibração não-linear. Além disso, quando o instrumento é parte de um sistema maior, o comportamento linear das partes geralmente simplifica o projeto e a análise do sistema como um todo. Portanto, especificações que relacionam o grau de conformidade a um comportamento linear são comuns [3].

Na Figura 4.a é possível analisar a característica linear do transdutor de efeito *hall*. Nela, alguns pontos da curva de calibração não coincidem com a reta referência.

Já a Figura 4.b ilustra a relação da corrente de referência com a corrente medida para a análise da linearidade do TC. A curva de calibração tem aspecto linear e a maior parte dos pontos que representam a curva de calibração está contida na reta referência.

Por fim, na Figura 4.c é possível observar, a partir da medição da corrente de 3,5 A, os pontos da curva de calibração que passam a não coincidir com a reta referência. Na prática,

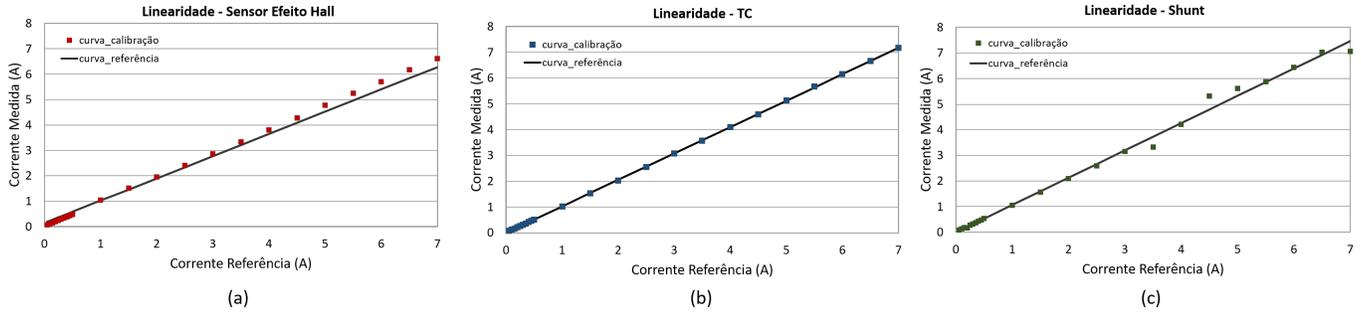


Fig. 4. Análise da linearidade do (a) sensor de efeito *hall*, (b) TC e (c) resistor *shunt*, através da relação entre a corrente medida e corrente de referência.

o resistor já começava a esquentar. O aumento da temperatura interfere diretamente no valor da resistência do componente prejudicando, assim, o resultado da medição.

Após a análise dos gráficos de linearidade dos três transdutores, foi possível montar a Tabela III que apresenta uma análise qualitativa da linearidade entre os transdutores *hall*, TC e *shunt*. É possível concluir que o TC apresenta uma linearidade muito boa, pois maior parte dos pontos da curva de calibração coincide com a reta referência. Já o sensor de efeito *hall* apresenta uma linearidade boa quando comparamos as três curvas. O resistor *shunt*, por apresentar menor quantidade de pontos da curva de calibração na reta referência, é classificado com uma linearidade razoável (Tabela III).

TABELA III
ANÁLISE QUALITATIVA DA
LINEARIDADE DOS TRANSDUTORES

Transdutor	Linearidade
Sensor de efeito <i>hall</i>	Boa
TC	Muito boa
Resistor <i>Shunt</i>	Razoável

Objetivando fazer uma análise quantitativa da linearidade das tecnologias dos transdutores de corrente, foi necessário calcular o valor percentual da não linearidade para cada transdutor. Para calcular o percentual de não linearidade, é preciso calcular alguns parâmetros, já que o cálculo da não linearidade é dada pela Equação 5.

$$Não\ Linearidade(\%) = \frac{Desvio_{Máx.}}{Norm} \cdot 100\% \quad (5)$$

Para encontrar o valor de $Desvio_{Máx.}$, é necessário calcular os desvios de saída entre o valor medido pela curva de calibração e a reta referência, dado pela Equação 6:

$$Desvio_i = |y_i - y_{ref}| \quad (6)$$

Logo, o $Desvio_{Máx.}$ será o maior valor entre os valores do $Desvio_i$ calculados. A Norm é o normalizador que pode ser a saída atual, o fundo escala da saída ou a faixa dinâmica de saída. Para o sistema, temos que calcular (Equação 7 e Equação 8):

$$A(\%) = \pm \frac{Desvio_{Máx.}}{y_{Máx.}} \cdot 100\% \quad (7)$$

$$B(\%) = \pm \frac{Desvio_{Máx.}}{Fundo\ de\ escala\ de\ saída} \cdot 100\% \quad (8)$$

Após o cálculo da não linearidade, é possível analisar quantitativamente as linearidades dos transdutores. O que apresentar menor valor da não linearidade resultará numa maior linearidade. Com a Tabela IV é possível concluir que nos três casos o valor de A% é o maior quando comparado com os respectivos valores de B%.

TABELA IV
ANÁLISE QUANTITATIVA DA
LINEARIDADE DOS TRANSDUTORES

Transdutor	Não Linearidade	
	A %	B %
Sensor de efeito <i>hall</i>	8,06	6,64
TC	0,66	0,37
Resistor <i>Shunt</i>	9,86	7,49

Como esperado, a análise quantitativa confirmou a análise qualitativa. Com a análise quantitativa, é possível mensurar quão linear é um determinado transdutor, conhecendo assim a origem do resultado obtido. O grau de qualidade estipulado na análise qualitativa é subjetivo, por isso foi relevante para a pesquisa realizar a análise quantitativa.

C. Erro de Medição

Os gráficos das Figuras 5 e 6 representam os erros de medição dos circuitos. São representados os erros de medição percentual nas faixas de 0,05 A até 0,5 A e de 1 A até 7 A, respectivamente. Através deles, é possível observar a variação dos erros de medição. Para facilitar a análise detalhada das faixas de miliampères para a faixa de ampères, optou-se por representar os resultados em dois gráficos, separadamente.

Na Figura 5 é possível analisar que os três circuitos de medição apresentam um erro de medição percentual bastante elevado quando a corrente de referência é 0,05 A. Este comportamento é explicado pela vulnerabilidade dos sinais de correntes baixas a ruídos e interferências. No intervalo de corrente de 0,05 A até 0,5 A, o circuito com o sensor

de efeito *hall* apresentou menor erro de medição percentual (curva vermelha). Já o circuito com resistor *shunt* apresentou o maior erro de medição percentual nesse mesmo intervalo de corrente. A partir do valor verdadeiro de 0,25 A, o erro de medição dos três circuitos ficou abaixo de 10%.

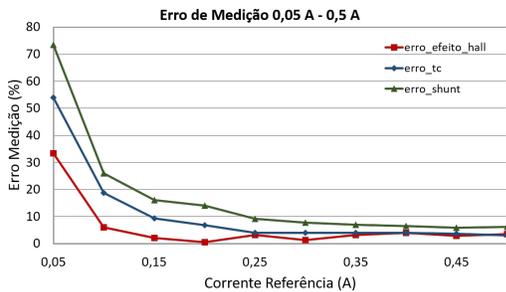


Fig. 5. Análise do erro de medição dos transdutores nos intervalos de medição de 0,05 A até 0,5 A.

Na Figura 6, os valores do erro de medição com o sensor de efeito *hall* e o TC variam no máximo 5%. O resistor *shunt* apresentou um comportamento um pouco diferente no intervalo de corrente de 4 A até 7 A, tendo um erro de medição de 18,22% neste intervalo. Este comportamento é devido às características do resistor utilizado, que permite uma potência máxima de 2 W. Assim, correntes maiores que 4,5 A apresentarão erros de medição mais imprevisíveis.

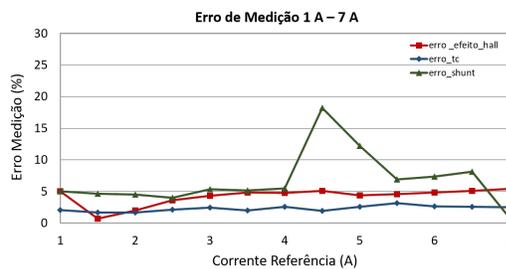


Fig. 6. Análise do erro de medição dos transdutores nos intervalos de medição de 1 A até 7 A.

VI. APLICAÇÃO DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA ESCOLHA DO TRANSDUTOR

Para obter a classificação dos transdutores e auxiliar na escolha mais adequada para cada projeto, três etapas são utilizadas em modelos de tomada de decisão multicritério (MCDM), [18]:

- Determinar os critérios relevantes;
- Definir pesos para os critérios;
- Determinar uma pontuação de classificação de cada alternativa, através de medidas numéricas.

Os transdutores, quando utilizados em circuitos de medição, devem apresentar uma precisão compatível com o tipo de medição desejada, assim como uma boa linearidade em toda faixa de utilização e uma taxa de distorção do sinal principal irrelevante para não interferir no sinal de saída.

Cada transdutor apresenta suas características, como faixa de operação, linearidade, sensibilidade, incerteza de medição, condições de funcionamento, estabilidade, repetitividade, velocidade de resposta, potência termoelétrica, exatidão, custo, entre outros. Essas características apresentam uma influência direta na aplicação. Logo, como a especificação do *smart plug* objetivava a construção de um dispositivo de baixo custo, compacto (pequeno e leve) e com uma precisão razoável, os critérios para decisão da escolha do transdutor foram: custo, tamanho, isolamento galvânica, erro de medição e linearidade. Foram selecionadas as características mais influentes no projeto.

[19], [20], afirmam que vários métodos para suscitar o peso exato do tomador de decisão podem cometer erros, porque os pesos são altamente dependentes do método utilizado e não há nenhum consenso sobre qual método produz resultados mais precisos, tendo em vista que os "verdadeiros" pesos permanecem desconhecidos. Para a obtenção de uma ordem de classificação das alternativas é preciso de que seja classificado cada critério pelo grau de importância, ponderar segundo a ordem de classificação e, finalmente, utilizar uma fórmula de ponderação. [21] propõe a ordem de classificação de pesos centroide, através do ROC, uma abordagem que produz uma estimativa dos pesos que minimiza o erro máximo de cada peso.

Para auxiliar a escolha do transdutor, foi utilizado o método multicritério de apoio à decisão. Conforme [22], pesos são atribuídos aos critérios pré-estabelecidos, procedimento este, chamado de ROC (*Rank Order Centroid*). O ROC consiste na aplicação da Equação:

$$w_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^m \frac{1}{i} \tag{9}$$

Onde m representa o número de critérios e w cada peso aplicado aos respectivos critérios, sendo $w_1 > w_2 > w_3 > w_k$, conforme [22].

A escolha da relevância dos critérios para o cálculo dos pesos foi determinada através da especificação do projeto do *smart plug* e pelas características dos transdutores que apresentaram maiores diferenças quando comparadas entre si.

Na Figura 7 é possível observar os valores dos pesos obtidos pelo procedimento ROC dos respectivos critérios em ordem de prioridade. O custo apresentou o maior peso, pois o projeto aspira o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo, além de, os preços dos transdutores analisados serem bastante diferentes quando comparados entre si.



Fig. 7. Procedimento ROC para definição de peso por critério.

Após estabelecido o peso para cada critério, foram levantados os valores de cada critério para cada tipo de transdutor, apresentando-os de forma que representassem a melhor situação quanto menor fosse o valor. Após o preenchimento dos valores (Figura 8), foi realizada a normalização dos valores de cada critério pelo valor total e em seguida realizada a operação soma produto para calcular a priorização dentre os transdutores. Aquele que obteve o menor resultado e, portanto, o definido pelo procedimento, foi o transdutor de efeito *hall*.

TRANSDUTOR	VALORES POR CRITÉRIOS					NORMALIZAÇÃO PELO VALOR TOTAL					Priorização	
	Custo (R)	Tamanho (mm)	Isolamento (Inexistência)	Erro de Medição (classificação)	Não Linearidade (%)	TRANSDUTOR	Custo	Tamanho	Isolamento	Erro de Medição		Não Linearidade
TOTAL	17	1953	1	6	19	Pesos	0,46	0,26	0,16	0,09	0,04	
Efeito <i>hall</i>	4,82	29,40	0,00	2,00	8,06	Efeito <i>hall</i>	0,29	0,02	0,00	0,33	0,43	0,18
TC	11,50	1824,00	0,00	1,00	0,66	TC	0,70	0,93	0,00	0,17	0,04	0,57
Shunt	0,19	100,00	1,00	3,00	9,86	Shunt	0,01	0,05	1,00	0,50	0,53	0,24

Fig. 8. Matriz de decisão da escolha do transdutor.

A. Discussão

Na literatura, quando o tema é a comparação das características entre os transdutores de corrente (sensor de efeito *hall*, TC, *shunt*, bobina de Rogowski, GMR, GMI), em sua maioria, os resultados expostos são qualitativos, com poucos detalhes do processo utilizado para obtenção dos resultados, além da inexistência de uma clareza da definição do grau de qualidade normalmente utilizado nos trabalhos [6], [7].

O método multicritério utilizado neste trabalho foi responsável pela obtenção de resultados quantitativos para a indicação do transdutor mais apropriado para a construção de um *smart plug*.

Já com o ensaio quantitativo foi possível obter os valores de erro de medição, não linearidade, para inserir na matriz decisão, juntamente, com os valores obtidos previamente do custo e tamanho dos sensores utilizados.

A análise comparativa dos transdutores permitiu eleger o sensor de efeito *hall* como sendo o transdutor mais adequado às necessidades do desenvolvimento do *smart plug*. Após a escolha do transdutor o protótipo foi implementado e validado, na Figura 9 é possível visualizar a placa de circuito impresso do protótipo do *smart plug*.

VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo analisou características de três transdutores de corrente: sensor de efeito *hall*, TC e resistor *shunt*. Após avaliação e comparação entre estes, foi possível constatar que o TC apresenta melhores desempenhos na perspectiva das três características abordadas (exatidão, linearidade e erro de medição).

Contudo, antes de realizar a escolha do transdutor mais adequado para a construção de um *smart plug*, foi necessário realizar o levantamento das características relevantes para o projeto eletrônico, pois, como é sabido, essas características apresentam uma influência direta na aplicação. Neste trabalho,



Fig. 9. Protótipo do *smart plug*.

utilizou-se o método multicritério baseado em custo, tamanho, isolamento, erro de medição e linearidade. Após análise da matriz de decisão, o transdutor de efeito *hall* mostra-se como o mais apropriado para o projeto específico de desenvolvimento de um *smart plug*.

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar testes comparativos com outras tecnologias de transdutores, como bobina de Rogowski, sensor de corrente GMR, sensor de corrente GMI (*Giant Magneto Impedance*).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), Edital 14/2013.

REFERÊNCIAS

- [1] A. S. Musleh, M. Debouza, and M. Farook, "Design and implementation of smart plug: An internet of things (iot) approach," in *Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [2] G. P. Rocha Filho, L. Y. Mano, A. D. B. Valejo, L. A. Villas, and J. Ueyama, "A low-cost smart home automation to enhance decision-making based on fog computing and computational intelligence," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 186–191, 2018.
- [3] E. O. Doebelin and D. N. Manik, "Measurement systems: application and design." Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2007.
- [4] E. Filipe, O. Pellegrino, A. C. Baratto, S. P. de Oliveira, and V. M. L. Mendoza, "Vocabulário internacional de metrologia-conceitos fundamentais e gerais e termos associados (vim 2012)(1a edição luso-brasileira, autorizada pelo bipm, da 3a edição internacional do vim-international vocabulary of metrology," *Rio de Janeiro*, 2012.
- [5] V. Miron-Alexe, "Comparative study regarding measurements of different ac current sensors," in *Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2016 International Symposium on*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [6] W. Koon, "Current sensing for energy metering," in *Conference Proceedings IIC-China/ESC-China*, 2002, pp. 321–324.
- [7] C. Xiao, L. Zhao, T. Asada, W. Ondaal, and J. Van Wyk, "An overview of integratable current sensor technologies," in *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 1251–1258.
- [8] D. Neves, P. Baptista, M. Simoes, C. A. Silva, and J. R. Figueira, "Designing a municipal sustainable energy strategy using multi-criteria decision analysis," *Journal of cleaner production*, vol. 176, pp. 251–260, 2018.
- [9] S. Greco, J. Figueira, and M. Ehrgott, *Multiple criteria decision analysis*. Springer, 2016.
- [10] B. Zhou, X. Guo, and M. A. G. Wang, "Hall sensor system design and modeling for current-measurement in power meters," in *Microelectronics (ICM), 2016 28th International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 49–52.

- [11] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, “Fundamentos de física, vol. 3,” *Rio de Janeiro: LTC*, 2009.
- [12] C. K. J. e. S. D. U. A. E. Fitzgerald, “Máquinas elétricas introdução à eletrônica de potência.” Bookman, 2006.
- [13] A. D. Helfrick and W. D. Cooper, “Instrumentação eletrônica moderna e técnicas de medição.[tradução: Antônio carlos inácio moreira],” *Rio de Janeiro, Copyright*, 1994.
- [14] A. Barp and C. Flesch, “Avaliação da incerteza de medição durante o projeto de cadeias de medição,” *III SEMETRO-Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. Anais em CD-ROM. Rio de Janeiro*, vol. 15, 1998.
- [15] A. Albertazzi and A. d. Sousa, “Fundamentos de metrologia científica e industrial,” *Editora Manole*, 2008.
- [16] C. Flesch, “Medição de grandezas mecânicas. ia parte: Metrologia,” *Depto. Eng. Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina*, 1999.
- [17] A. A. Gonçalves Jr., “Metrologia. apostila do curso de mestrado em metrologia científica e industrial,” 2000.
- [18] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 186.
- [19] F. H. Barron and B. E. Barrett, “The efficacy of smarter—simple multi-attribute rating technique extended to ranking,” *Acta Psychologica*, vol. 93, no. 1-3, pp. 23–36, 1996.
- [20] —, “Decision quality using ranked attribute weights,” *Management science*, vol. 42, no. 11, pp. 1515–1523, 1996.
- [21] F. H. Barron, “Selecting a best multiattribute alternative with partial information about attribute weights,” *Acta psychologica*, vol. 80, no. 1-3, pp. 91–103, 1992.
- [22] A. d. Almeida, “O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão,” *Recife: Editora Universitária da UFPE*, 2011.



Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro é doutoranda do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Atualmente é pesquisadora do Grupo de Redes e Telecomunicações (GPRT). Suas áreas de interesse atuais: redes de computadores, telecomunicação, processamento de sinal, eficiência energética, sistemas embarcados e IoT.



Djamel Fawzi Hadj Sadok é professor titular do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Possui doutorado em Ciência da Computação pela *University of Kent at Canterbury* (U.KENT). Pesquisa em temas: sistemas de comunicações, redes de acesso, segurança, Cloud Computing, classificação de tráfego.



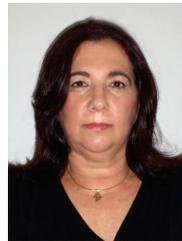
Marcio Evaristo da Cruz Brito é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Possui doutorado em Engenharia Elétrica pela UFPE. Atua nas áreas: manutenção preditiva, disponibilidade, sistema scada, determinação de vida útil, restaurador dinâmico de tensão e redução de perdas.



Álvaro de Araújo Cavalcanti é doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Atua nas áreas: energia elétrica, manutenção, gestão da qualidade e planejamento estratégico.



Patrícia Takako Endo é professora adjunta da Universidade de Pernambuco (UPE) e atualmente é pesquisadora de pós-doutorado na *Dublin City University* (DCU). Possui doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e suas áreas de interesse são: *cloud computing*, gerenciamento de recursos e *fog computing*.



Judith Kelner é professora titular do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Possui doutorado em Ciência da Computação pela *University of Kent* e suas áreas de interesse são: visão computacional, realidade aumentada, rastreamento, reconstrução 3D, redes de computadores e internet das coisas.