

Protótipo Trifásico para Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Utilizando A Plataforma Arduino**Three-phase Prototype for Monitoring Electric Power Consumption Using the Arduino Platform**

DOI:10.34115/basrv4n5-015

Recebimento dos originais: 04/08/2020

Aceitação para publicação: 25/09/2020

Erik Thauan Mendes Santos

Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba-MG-Brasil

E-mail: erikthauan97@hotmail.com

Júlia Oliveira Fernandes

Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba-MG-Brasil

E-mail: julia.fernandes@ufvjm.edu.com

João Vitor Gomes de Araújo

Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba-MG-Brasil

E-mail: joao.araujo@ufvjm.edu.br

Jáder Fernando Dias Breda

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba-MG-Brasil

E-mail: jader.breda@ufvjm.edu.br

RESUMO

A partir da década de 1990, o elevado consumo de energia elétrica se tornou um ponto indispensável para o desenvolvimento econômico, o que vem resultando em grandes impactos ambientais devido a construção de novos meios de obtenção da energia elétrica. Diante disto, a procura pelo consumo consciente é de suma importância para que haja harmonia entre o processo de desenvolvimento e o meio ambiente. Ou seja, o acompanhamento do consumo de energia e do valor gasto em tempo real passa a ser um fator crucial. Assim, o presente trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo trifásico de monitoramento de consumo de energia elétrica, em tempo real, que permite que o consumidor consiga ter uma estimativa de seus gastos de instantaneamente, utilizando sensores não-invasivos em conjunto com a plataforma Arduino. O protótipo fornece os valores obtidos em um display LCD, informando as medidas de tensão e corrente nas três fases do sistema, o tempo total de monitoramento, a energia consumida e, por fim, o custo aproximado a ser pago pelo consumidor. Os resultados obtidos foram

satisfatórios, já que os valores medidos se encontram de acordo com os sinais de entrada e os valores calculados se apresentam próximos aos calculados teoricamente.

Palavras-chave: Conscientização, Eficiência energética, Monitoramento, Sistemas trifásicos, Plataforma Arduino.

ABSTRACT

Since the 1990s, the high consumption of electrical energy has become an indispensable point for economic development, which has resulted in major environmental impacts due to the construction of new options of obtaining electrical energy. Given this, the search for conscious consumption is of paramount importance for there to be harmony between the development process and the environment. In other words, monitoring energy consumption and the amount spent in real time becomes a crucial factor. Thus, the present work consists of the development of a three-phase prototype for monitoring electricity consumption in real time, which allows the consumer to be able to have an estimate of their spending instantly, using non-invasive sensors in conjunction with the Arduino platform. The prototype provides the values obtained on an LCD display, informing the voltage and current measurements in the three phases of the system, the total monitoring time, the energy consumed and, finally, the approximate cost to be paid by the consumer. The results obtained were satisfactory, since the measured values are in accordance with the input signals and the calculated values are close to those calculated theoretically.

Keywords: Awareness, Energy efficiency, Monitoring, Three-phase systems, Arduino Platform.

1 INTRODUÇÃO

A importância da eletricidade surgiu por volta do século XIX, no momento em que cientistas começaram a estudá-la, se tornando a principal fonte de força, calor e luz. Contudo, com o enorme crescimento do consumo de energia elétrica ao longo dos anos, a procura também aumentou exponencialmente e com isso problemas ambientais e econômicos acompanharam esse avanço (LECCHI, 2015).

Até 1870, o uso da energia elétrica foi bastante restrito ao telefone e telégrafos. Os primeiros medidores de energia surgiram para serem aplicados na operação de lâmpadas em série, referenciados à unidade de medida *Lâmpada-hora*. A medida que o consumo de energia elétrica aumentava, a necessidade de um controle sobre o gasto também, então, em 1882, Thomas Edison criou o primeiro medidor que contrapunha o tempo de duração de energia, um medidor *Ampère-hora*. A partir da década de 1970, ocorreram diversos avanços na medição de energia elétrica, sendo os medidores eletromecânicos, com unidade *Watt-hora*, desenvolvidos (NICOLAU, 2013).

No entanto, esses medidores eletromecânicos deixam a desejar em diversos quesitos como, por exemplo, a sua precisão, já que são fisicamente instalados na unidade consumidora e os registros são realizados de forma manual. Tais motivos foram suficientes para que fosse despertado o desejo de incorporar novas tecnologias a estes medidores (NICOLAU, 2013).

Visando tal objetivo, a utilização de dispositivos de fácil alcance e acesso foi a saída mais viável encontrada com a implantação das *Smart Grids* (redes que distribuem a energia elétrica de maneira a

englobar e proporcionar de forma inteligente as ações de todos os usuários conectados a ela (CEMIG, 2019a)) e a instalação dos *Smart Meters* (medidores inteligentes que são capazes de medir vários tipos de grandeza, enviando digitalmente leituras do medidor para seu fornecedor) (BRITO, 2016).

Além disso, o aumento exponencial no consumo da energia elétrica e o seu mau uso ocasionam impactos ambientais irreparáveis em grande escala. Diante disso, a eficiência energética se tornou o caminho a ser seguido para a contenção de tais despesas e prejuízos ambientais. A estratégia para findar esses problemas é a otimização dos recursos. Portanto, os medidores de energia elétrica fazem parte dessa solução, pois possibilitam aos consumidores o monitoramento de seu gasto mensal, afim de que haja de fato uma economia e conscientização quanto ao uso da energia elétrica.

Além de apresentar uma solução para medições de energia elétrica em tempo real, este trabalho vem mostrar que, através deste monitoramento é possível proporcionar a população uma maior conscientização e, conseqüente, redução do custo total na conta de energia no final do mês, justificando ainda mais a adoção destes sistemas contendo *Smart Metering*.

Ainda, é interessante ressaltar que outros autores já vêm desenvolvendo trabalhos nesta área. Como por exemplo, em Moghe, Lambert e Divan (2010) que foi feito o uso da tecnologia *zigBee* de comunicação sem fio, radiofrequência e o conceito de *energy harvesting* para baixas frequências. Já, em Di Leo, Landi, Paciello e Pietrosanto (2012) foi desenvolvido um sistema de medição de energia elétrica inteligente, utilizando uma unidade controladora e uma conexão sem fio em uma rede local. E, em Duarte, Zambianco, Airoidi, Ferreira e Dias (2011) foi realizado um trabalho em busca de uma boa relação custo-benefício, uma vez que a construção do protótipo foi baseada no projeto *OpenEnergyMonitor*, que tem como princípio desenvolver e divulgar conceitos e ferramentas de medição de simples implementação. Seguindo esta mesma tendência, o presente trabalho também busca em seu desenvolvimento necessitar de um baixo investimento inicial, praticidade em sua aplicação e eficiência em seus resultados obtidos.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um protótipo de monitoramento de consumo de energia em tempo real que possibilite a conscientização no consumo de energia elétrica a baixo custo, de forma a gerar informações para o usuário em tempo real, podendo auxiliar na economia ao longo do mês. Diferente dos demais modelos apresentados no texto e dispostos no mercado, o protótipo proposto neste trabalho, tem como principais características ser um modelo de monitoramento trifásico, não invasivo e que necessita de um baixo investimento financeiro para sua construção.

2 CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA

Para que seja realizado o cálculo da energia elétrica consumida ao longo de todo o monitoramento, é necessário utilizar os dados das grandezas elétricas obtidos pelos sensores de tensão e corrente que serão empregados neste trabalho.

Em (1), é calculada a potência instantânea (P) em Watts, a partir dos valores instantâneos de corrente (i) em Ampère medidos pelo sensor de corrente e os valores instantâneos de tensão (V) medidos pelo sensor de tensão.

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

A seguir, o resultado de (2) fornece a energia consumida (E) em Joule, devido a potência (P) ser dada em Watts e o tempo total de monitoramento (Δt), em segundos.

$$E = P \cdot \Delta t \quad (2)$$

Contudo, afim de converter a unidade de energia elétrica para quiloWatts-hora (kWh), é necessário considerar que 1 kWh equivale a 3.600.000 J, obtendo assim a energia elétrica na forma mais conhecida pelo consumidor e mais utilizada pelas concessionárias de energia (E_{kWh}), conforme (3).

$$E_{kWh} = E / 3600000 \quad (3)$$

Com o intuito de se obter o custo, em reais (R\$), atingido em relação ao kWh consumido ao longo de todo o tempo de monitoramento ($Custo(R\$)$), utiliza-se (4), que apresenta o produto entre a energia em kWh consumida ao longo de todo o período de monitoramento (E_{kWh}) e o valor, em R\$, de 1 kWh cobrado pela concessionária de energia (kWh).

$$Custo(R\$) = E_{kWh} \cdot kWh \quad (4)$$

Nos casos de medição de consumo de energia em sistemas monofásicos, (1) – (4) podem ser utilizadas diretamente, pois somente um sensor de corrente e um sensor de tensão serão empregados considerando uma média amostral dos valores da corrente e tensão.

Já, nos casos de medição em sistemas trifásicos (foco do presente trabalho), como são empregados três sensores de corrente e três sensores de tensão para se obter as medidas nas três fases do

sistema, a energia total consumida pelo sistema é calculada pelo somatório das energias consumidas em cada fase do sistema, sendo (4) aplicada somente ao final do processo, após este cálculo da energia total consumida pelo sistema.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção, serão apresentadas as etapas práticas do trabalho em questão, desde a criação dos programas embarcados na plataforma Arduino, passando pela elaboração de um protótipo inicial considerando apenas cargas monofásicas até a construção do protótipo final para medição do consumo de energia em sistemas trifásicos.

3.1 DESENVOLVIMENTO DOS SKETCHES UTILIZADOS

Em relação aos sketches, num primeiro momento, foi desenvolvido um código de programação voltado para o protótipo monofásico, ou seja, considerando apenas dados de tensão e corrente para uma fase do sistema.

Nos sketches, se encontram os comandos de inicialização do Arduino e das variáveis relacionadas aos valores de potência, energia e custo, além da definição dos pinos referentes aos valores de entrada e saída dos sensores de tensão e corrente.

Ainda, nos sketches foram inseridas as fórmulas e conversões necessárias para que os cálculos da energia consumida e o custo, em R\$, fossem realizados, conforme apresentado na seção 2 ((1) – (4)). Por fim, nos sketches, os comandos de impressão, para que cada grandeza fosse exibida no display LCD nos seus respectivos lugares também foram adicionados.

Cabe comentar também que, no caso do sketch para o protótipo de medição trifásico em específico, foco do presente trabalho, foram feitas simples adaptações no programa original monofásico. Basicamente, se replicou para cada uma das três fases os comandos para medição e cálculo das energias. E, posteriormente, se acrescentou um somatório de energia de cada fase do sistema para que se tivesse o valor total de energia consumida no final e, conseqüentemente, também o valor do custo a ser pago pelo consumidor pelo sistema trifásico.

Ainda, neste trabalho, o valor de 1kWh foi considerado de R\$ 0,95 (CEMIG, 2019b), mas que pode ser facilmente alterado de acordo com o padrão de cada consumidor. O motivo pelo qual atribuiu-se esse valor ao kWh, foi que se relacionou um cálculo médio de um total de energia consumida por um consumidor (no caso, residencial), em que também é levado em consideração a tarifação, os impostos (ICMS, PASEP e CONFINS) e além disso são também consideradas as bandeiras de tarifação (no, a amarela e a vermelha). Essas tarifas vêm representando os adicionais que são cobrados junto com o que é gasto em cada residência. Este método é válido, uma vez que o intuito do trabalho é oferecer ao

consumidor, uma estimativa do valor gasto e não um valor exato, apenas para que este tenha consciência de seu consumo.

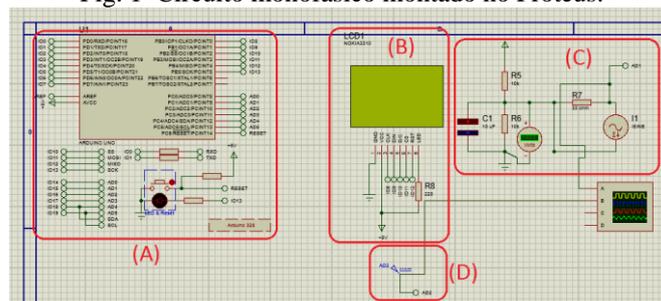
3.2 PROTÓTIPO INICIAL (MONOFÁSICO)

Anteriormente à realização da montagem do dispositivo trifásico, foi feita uma versão mais básica do protótipo, para que depois pudesse ser feito o protótipo trifásico com uma maior segurança em relação ao seu funcionamento. Logo, montou-se o protótipo monofásico, que por sua vez exercia a função de monitorar os valores de corrente e tensão em tempo real de uma carga monofásica.

Para que não houvesse o risco de danificar o dispositivo, inicialmente, utilizou-se o software Proteus (BERMÚDEZ, 2005) para realizar a criação e a simulação do circuito elétrico proposto para a medição dos valores de tensão e corrente por meio de seus respectivos sensores.

Na Fig. 1, observa-se o circuito de simulação montado, contendo um Arduino (campo (A)), que atua como um canal de ligação entre o código de programação (sketch) e o display LCD (no caso, um modelo Nokia 5110). No campo (B), tem-se o display que exibe os valores das grandezas medidas e calculadas de interesse para o trabalho. Já, no campo (C), pode-se observar um circuito elétrico polarizador que tem a função de converter o sinal de corrente que é recebido em forma alternada, para um sinal de corrente com valor positivo em corrente contínua. E, por fim, tem-se uma fonte de tensão (campo (D)), que tem o papel de simular a tensão medida pelo sensor, sendo assim também impressa no display LCD.

Fig. 1 Circuito monofásico montado no Proteus.



Após a verificação do adequado funcionamento do projeto no Proteus, desenvolveu-se a parte física do protótipo, iniciando com testes de funcionamento do display LCD juntamente com a protoboard, os jumpers e o Arduino. Após esta etapa, os sensores de tensão e corrente foram adicionados ao circuito.

Vale destacar que, o sensor de corrente utilizado é do tipo não invasivo (SCT-013-000 com corrente de entrada de até 100 A), assim apresentando uma vantagem em relação a outros modelos pois não necessita de contato elétrico com o circuito para que a corrente elétrica seja medida, isto é, não

precisa abrir o circuito para liga-lo em serie com a carga, é apenas preciso “abraçar” um dos fios ligados ao equipamento que está sendo monitorado. Já, o sensor de tensão empregado (ZMPT101B com tensão de entrada de até 250 V em corrente alternada), é um equipamento de alta precisão que detecta a existência de tensão alternada em um circuito e ainda realiza a medição do valor de tensão. Contudo, foram necessárias calibrações para que os valores específicos de cada sensor e, assim, atingir uma melhor eficiência nas medidas.

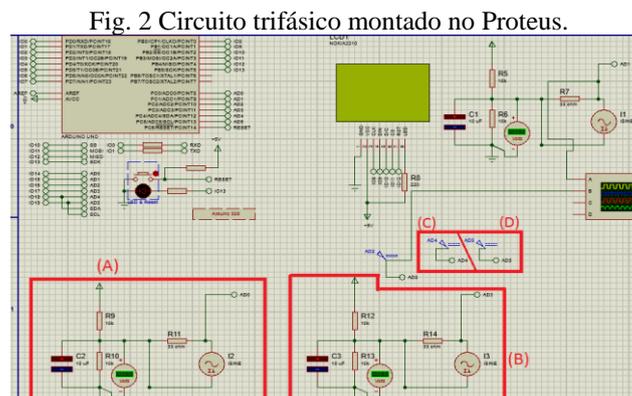
Por fim, montou-se o circuito polarizador divisor de tensão (campo (C) da Fig. 1), sabendo que o Arduino suporta em suas portas de entrada apenas valores positivos limitados a 5V (DEMETRAS, 2019).

3.3 PROTÓTIPO TRIFÁSICO

Após a montagem e verificação do correto funcionamento do protótipo monofásico, procedeu-se a montagem do protótipo trifásico.

Como no caso do protótipo monofásico, os procedimentos realizados para a montagem do protótipo trifásico não poderiam ser tão diferentes. Em primeiro lugar, como já comentando, o programa utilizado para o protótipo monofásico foi modificado, expandindo a versão de seu sketch para três fases de modo que pudesse se enquadrar no perfil trifásico, inserindo os trechos de comando do modelo monofásico correspondente para cada sensor.

Em seguida, modificou-se também o circuito montado no Proteus, acrescentando mais dois circuitos de medição de corrente e dois circuitos de medição de tensão (um para cada fase adicional do sistema em relação ao caso anterior). Como ilustrado na Fig. 2, os campos (A) e (B) são os circuitos adicionados para medir a corrente, cada um conectado ao seu respectivo pino do Arduino. Já, os campos (C) e (D) mostram os dois medidores de tensão que foram agregados ao circuito. Com estas modificações realizadas, a simulação foi feita no programa, no sentido de verificar a presença ou não de algum erro de conexão ou até mesmo de programação para o caso trifásico.



O funcionamento do circuito no simulador foi satisfatório e assim procedeu-se a montagem física do protótipo trifásico, conforme o esquema do circuito montado no próprio Proteus. Posteriormente, o código de programação foi embarcado ao Arduino e juntamente com a adição dos sensores de corrente e tensão para as novas fases do sistema, pôde-se observar o funcionamento do protótipo trifásico na prática.

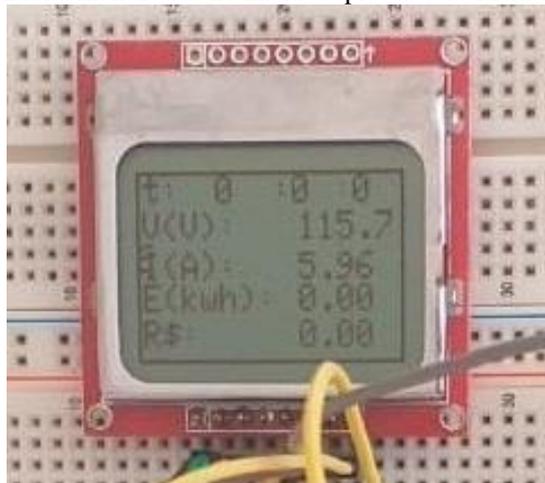
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos através da construção dos protótipos monofásico e trifásico para monitoramento de consumo de energia elétrica, bem como seus funcionamentos em conjunto com as cargas conectadas e seus desempenhos em comparação com os valores teóricos obtidos por meio de (1) – (4).

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO MONOFÁSICO

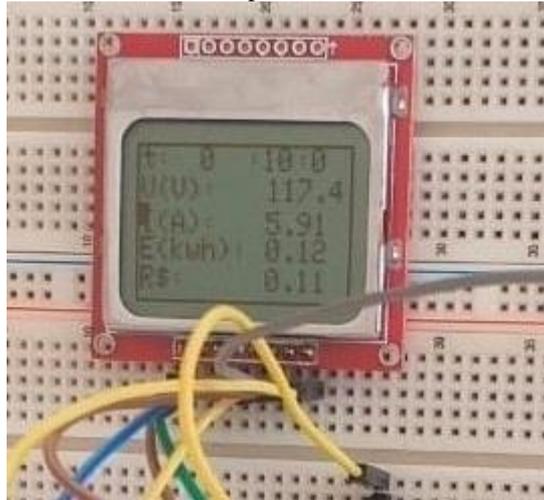
Para o caso do protótipo monofásico de medição, utilizou-se como carga teste a ter seu consumo monitorado, um ebulidor com tensão de alimentação de 220V para que pudesse ser feita a aferição da tensão com uma melhor clareza, uma vez que este tipo de carga necessita de um valor alto de corrente durante seu funcionamento. Com isso, foi feita a medida no início do processo, como pode ser visto na Fig. 3, onde só consta os valores de tensão ($V(V)$) e corrente ($I(A)$), sendo os valores de energia ($E(kWh)$) e consumo (R\$) nulos, pois o monitoramento ainda não havia sido inicializado ($t = 0h:0min:0s$).

Fig. 3 Circuito monofásico no início do processo de monitoramento.



Após 10 minutos, aferiu-se uma nova medida das grandezas impressas no display do protótipo, apresentada na Fig. 4. Nesta figura, já se pode observar que os valores do tempo de monitoramento, energia consumida e custo envolvido já deixaram de ter valores nulos, diferentemente da Figura 3.

Fig. 4 Circuito monofásico após 10 minutos de monitoramento.



Contudo, foi necessário verificar se os valores apresentados pelo protótipo monofásico na Fig. 4 para a energia consumida (0,12 kWh) e o custo envolvido (R\$ 0,11) estavam corretos teoricamente. Neste sentido, (1) – (4) foram utilizadas. Primeiramente, foi calculada a Potência (P), utilizando (1), considerando que os valores da tensão V e da corrente i obtidos na Fig. 4:

$$P = 117,4 \cdot 5,91 = 693,8340 \text{ W.} \quad (5)$$

Considerando que o valor da potência (P) não varia significativamente ao longo do período de monitoramento, pois os valores de tensão (V) e corrente (i) também não variam, em seguida, calculou-se a Energia (E) consumida, utilizando (2), em que o tempo total de monitoramento (Δt) a ser considerado é de 10 minutos conforme a Fig. 4, ou seja, 600 segundos:

$$E = 693,8340 \cdot 600 = 416300,4 \text{ J.} \quad (6)$$

Posteriormente, o valor da energia consumida em Joule foi convertido para kWh, utilizando (3):

$$E_{kWh} = 416300,4 / 3600000 = 0,1156 \text{ kWh.} \quad (7)$$

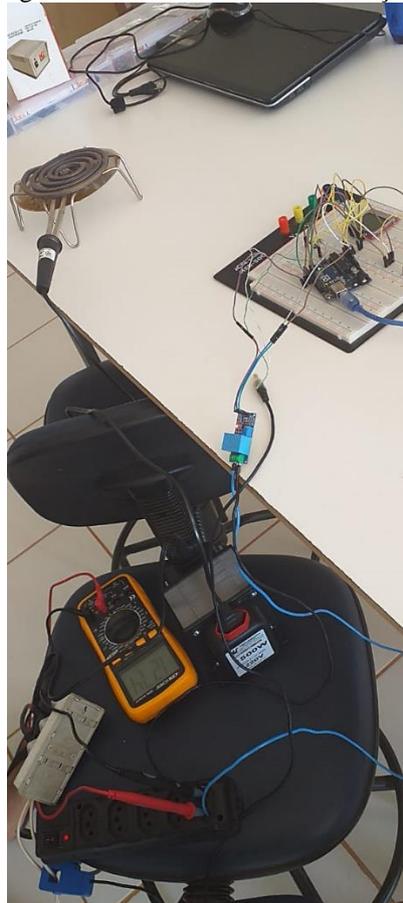
Por fim, para o cálculo do custo devido ao funcionamento do equipamento, (4) foi utilizada, considerando o valor de R\$ 0,95 para o kWh pelos motivos já explicados anteriormente:

$$\text{Custo(R\$)} = 0,115639 \cdot 0,95 = \text{R\$ } 0,1098. \quad (8)$$

Obtendo assim, uma estimativa do custo calculado após 10 minutos de utilização do ebulidor (R\$ 0,1098), bem próxima do valor apresentado no display do protótipo (R\$ 0,11), fazendo com que o resultado possa ser considerado satisfatório para o caso monofásico.

Ainda, na Fig. 5, é possível observar o circuito monofásico todo montado com o ebulidor (carga teste) conectado ao protótipo de monitoramento.

Fig. 5 Circuito monofásico de medição.



4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO TRIFÁSICO

Em consequência dos circuitos de corrente e de tensão adicionados para contemplar o modelo trifásico e a fim de comprovar o funcionamento do mesmo, verificou-se primeiramente o funcionamento do protótipo em ambiente controlado (no caso, em laboratório), seguindo os mesmos procedimentos feitos para testar o modelo monofásico. Desta forma, os três sensores de corrente foram colocados no mesmo fio de alimentação do ebulidor, e as fases e os neutros dos três sensores de tensão na mesma tomada de alimentação. Como os valores de tensão e corrente para as três fases exibidos do display foram os mesmos, constatou-se o adequado funcionamento do protótipo para o experimento em ambiente controlado em questão.

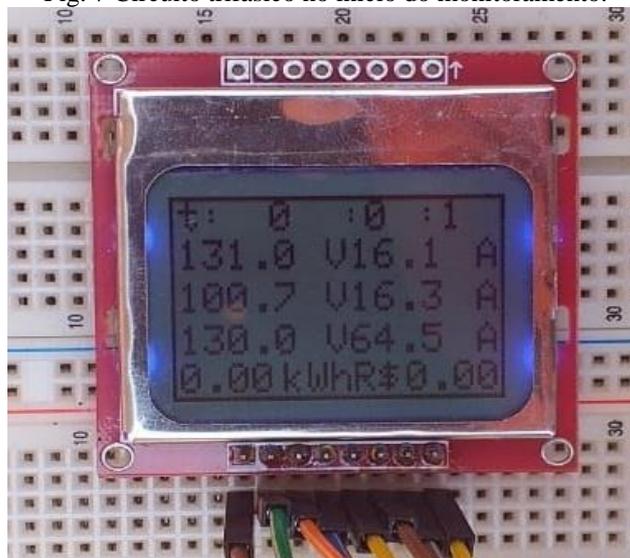
Fig. 6 Bomba hidráulica trifásica.



Com todos os sensores de tensão e corrente conectados aos cabos de alimentação da bomba instalados no quadro de distribuição da unidade, fez-se a medida de quanto seria o custo dessa bomba ligada ao longo de um determinado período de tempo.

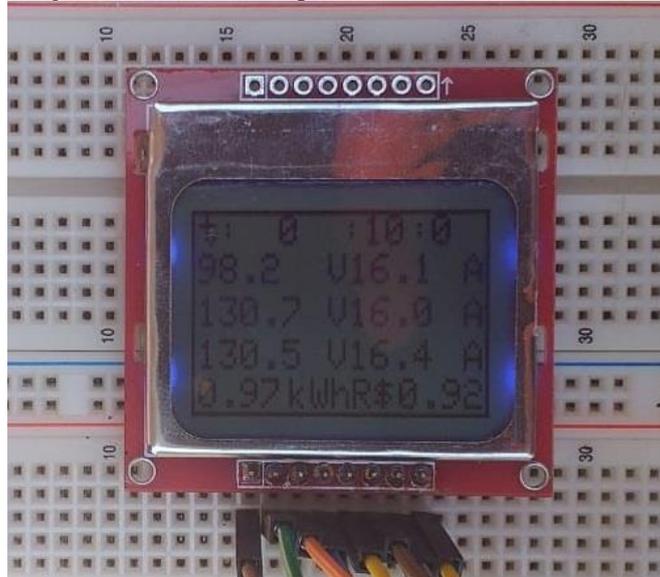
Na Fig. 7, pode-se reparar uma certa variação no valor da tensão das três fases entre valores de 100 V a 131 V. Já a corrente está entre 16 A e 17 A, essa alteração na última fase medida (64,5 A), deve-se pelo fato de estar usando um potenciômetro no lugar do resistor de carga no protótipo, que inicialmente encontrava-se em desequilíbrio em relação aos valores dos resistores de carga das demais fases, mas logo em seguida esse valor foi corrigido manualmente, calibrando este potenciômetro para que tivesse o mesmo valor dos resistores de carga das outras fases.

Fig. 7 Circuito trifásico no início do monitoramento.



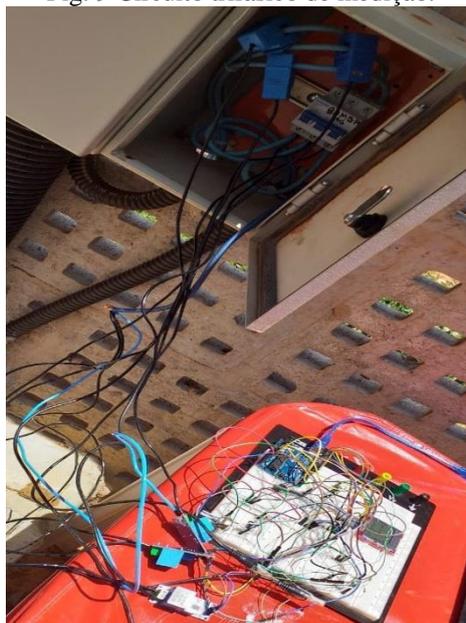
Após 10 minutos, fez-se uma nova medição, Fig. 8, em que se obtiveram os valores tensão e corrente atuais em cada uma das três fases da bomba, a quantidade de energia em kWh consumidos durante o tempo de monitoramento total e, por fim, o valor, em R\$, do custo relativo a todo este período de funcionamento do equipamento.

Fig. 8 Circuito trifásico após 10 minutos de monitoramento.



Ainda, a Fig. 9 mostra o circuito trifásico conectado ao quadro de distribuição da unidade ligado a bomba hidráulica, obtendo assim as medidas trifásicas necessárias para o monitoramento da energia consumida pelo equipamento.

Fig. 9 Circuito trifásico de medição.



Para verificar se os valores de energia consumida e custo apresentados pelo protótipo estão corretos, (1) – (4) foram novamente utilizadas, da mesma forma que para os cálculos do protótipo monofásico, só que agora a aplicação é feita para cada fase do sistema. E, as potências para as fases *a*, *b* e *c* do sistema (P_a , P_b e P_c , respectivamente), considerando os valores apresentados na Fig. 8, são dadas por:

$$\begin{aligned} P_a &= 98,2 \cdot 16,1 = 1581,02 \text{ W} \\ P_b &= 130,7 \cdot 16,0 = 2091,2 \text{ W} \\ P_c &= 130,5 \cdot 16,4 = 2140,2 \text{ W}. \end{aligned} \quad (9)$$

Em seguida, para calcular a energia consumida nas fases *a*, *b* e *c* do sistema (E_a , E_b e E_c , respectivamente), considerando que o valor das potências (P_a , P_b e P_c) não variam significativamente ao longo do período de monitoramento, pois os valores de tensão e corrente de cada fase também não variam, multiplicou-se o valor de cada potência com o tempo de 10 minutos, 600 segundos, encontrando assim os valores das energia em Joule:

$$\begin{aligned} E_a &= 1581,02 \cdot 600 = 948612 \text{ J} \\ E_b &= 2091,2 \cdot 600 = 1254720 \text{ J} \\ E_c &= 2140,2 \cdot 600 = 1284120 \text{ J}. \end{aligned} \quad (10)$$

Agora, para obter a energia consumida em cada fase em kWh ($E_{a(kWh)}$, $E_{b(kWh)}$ e $E_{c(kWh)}$), dividi-se esses valores obtidos em (10) por 3.600.000 para que haja a conversão, como informado em (3),

$$\begin{aligned} E_{a(kWh)} &= 948612 / 3600000 = 0,2635 \text{ kWh} \\ E_{b(kWh)} &= 1254720 / 3600000 = 0,3485 \text{ kWh} \\ E_{c(kWh)} &= 1284120 / 3600000 = 0,3567 \text{ kWh}. \end{aligned} \quad (11)$$

Contudo, como se trata de um sistema trifásico é necessário somar a energia consumida em cada fase para que se tenha o valor total consumido pelo sistema (E_{kWh}):

$$\begin{aligned} E_{kWh} &= 0,2635 + 0,3485 + 0,3567 \\ &= 0,9687 \text{ kWh}. \end{aligned} \quad (12)$$

Por fim, o custo ao longo do período de monitoramento ($Custo (R\$)$) é descoberto com a multiplicação do valor encontrado da energia consumida pelo sistema (E_{kWh}), pelo valor considerado do kWh:

$$Custo(R\$) = 0,9687 \cdot 0,95 = R\$ 0,9203. \quad (13)$$

Assim, o resultado mostrado no display (R\$ 0,92) está bem próximo do obtido teoricamente (R\$ 0,9203), podendo ser considerado um resultado satisfatório já que esse valor obtido se trata apenas de uma estimativa, uma vez que não foi levada em consideração uma possível variação nos valores de tensão e corrente ao longo do monitoramento.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidas duas versões de um protótipo para monitoramento de consumo de energia elétrica em tempo real utilizando sensores não-invasivos em conjunto com a plataforma Arduino. Inicialmente, um modelo monofásico do protótipo foi montado e validado para uma carga monofásica em ambiente controlado apenas para se ter uma maior segurança em relação ao funcionamento adequado do modelo, para depois se proceder a construção do modelo final trifásico.

Com o protótipo trifásico montado, para sua validação foi utilizada uma bomba hidráulica (carga trifásica), medindo o quanto essa mesma bomba iria consumir em um determinado período de tempo. Sendo que, ao considerar que não há variação nos valores de tensão e corrente nas fases do sistema ao longo deste período de monitoramento, um resultado satisfatório foi alcançado, já que o valor obtido para o custo impresso no display do protótipo se aproxima bastante do valor calculado teoricamente.

Apesar do objetivo principal ser o desenvolvimento do protótipo trifásico para monitoramento do consumo de energia, ao longo deste trabalho foram feitas sugestões para a utilização deste dispositivo para conscientização e ainda auxiliar na situação energética atual, uma vez que o consumidor ao saber em tempo real o valor pago por aquela atividade, pode evitar um gasto ainda maior em ocasiões posteriores.

Em relação a trabalhos futuros, algumas sugestões podem ser citadas, como: utilizar uma placa de circuito impresso para uma otimização do espaço interno de um futuro equipamento; desenvolver uma fonte de tensão própria para o equipamento; e, por fim, encapsular o protótipo, de modo a se tornar uma versão mais próxima aos modelos comerciais disponíveis no mercado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Engenharia de Ciência e Tecnologia (IECT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – Campus Janaúba por toda estrutura e suporte disponibilizados ao longo da realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bermúdez, A. S. (2005). Manual do Proteus em português. Disponível em: <http://www.forimnow.com.br/vip/fóruns=41935>. Acesso em: 5 de novembro de 2019.
- Brito, J. (2016). Transformadores de tensão e corrente. Universidade Estadual de Londrina, Paraná – Brasil.
- Nicolau, C. T. (2013). Medição de Energia Elétrica: Impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária distribuidora de energia elétrica. Rio de Janeiro – Brasil.
- CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. (2019a). Redes Inteligentes. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Redes_Inteligentes/Paginas/as_redes_inteligentes.aspx>. Acesso em: 21 de outubro de 2019.
- CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. (2019b). Valores de tarifa e serviços. Disponível em: https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx. Acesso em: 19 de outubro de 2019.
- Demetras, E. (2019). SCT-013 – Sensor de Corrente Alternada com Arduino. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>>. Acesso em: 19 de outubro de 2019.
- Di Leo, G., Landi, M., Paciello, V. and Pietrosanto, A. (2012). Smart metering for demand side management. Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp.1798-1803.
- Duarte, L. F. C., Zambianco, J. D., Airoidi, D., Ferreira, E. C. and Dias, J. A. S. (2011). Characterization and Breakdown of the Electricity Bill using Custom Smart Meters: A Tool for Energy-Efficiency Programs. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, vol 5, pp.116-123.
- Lecchi, T. (2015). Sistema Smart Grid de Telemetria Não Invasiva Para Monitoramento de Consumo, Detecção e Comunicação de Anomalias e Fraudes de Energia Utilizando Tecnologia Arduino. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/thiagolecchi/sistema-smart-grid-de-telemetria-no-invasiva-para-monitoramento-de-consumo-deteco-e-comunicacao-de-anomalias-e-fraudes-de-energia-utilizando-tecnologia-arduino>>. Acesso em: 29 de outubro de 2019.
- Moghe, R., Yi, Y., Lambert, F. and Divan, D. (2010). Design of a low cost self powered “Stick-on” current and temperature wireless sensor for utility assets. Energy Conversion Congress and Exposition, pp.4453-4460.