

CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA MONOFÁSICO COM SUPERVISÓRIO VIA INTERNET DAS COISAS

Fellipe Laurindo Bellé, Pablo Dutra da Silva, Marcos Antonio Salvador
Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
e-mail: fellipe.lb@aluno.ifsc.edu.br, marcos.salvador@ifsc.edu.br, pablo.silva@ifsc.edu.br
Trabalho de Conclusão de Curso – 27/06/2024

Resumo – O desenvolvimento de medidores inteligentes de energia elétrica que possibilitam acompanhamento remoto do consumo tem relevante aplicabilidade no âmbito residencial, comercial e industrial, pois pode auxiliar na definição do tipo de contratação de energia, na formulação de preço de um produto ou do custo agregado a um processo produtivo. Neste sentido, este trabalho visa contribuir para a elaboração de um medidor de energia elétrica monofásico. Como contribuição para o protótipo, é realizada a calibração e a pesquisa e implementação da estratégia para contabilização da energia elétrica mensurada pelo medidor. Os resultados de medição das principais grandezas elétricas contabilizadas são apresentados em *dashboards* e as informações de calibração do medidor são exibidas a partir de curvas de erros aleatórios e sistemáticos de toda sua faixa de medição. A partir das curvas de erros verificou-se que o medidor em questão apresenta erros entre $\pm 0,53\%$ e $\pm 5\%$ nas medições dentro da faixa de 2 a 10 A.

Palavras-chave – Medição de Energia Elétrica, Medidor de Energia Inteligente, Internet das coisas, Monitoramento à nível de máquina.

CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF A SINGLE-PHASE ELECTRIC ENERGY METER WITH SUPERVISORY VIA THE INTERNET OF THINGS

Abstract – The development of smart electricity meters that enable remote monitoring of consumption has significant applicability in residential, commercial, and industrial contexts. It can assist in determining the type of energy contract, formulating product pricing, or calculating the cost associated with a production process. In this regard, this work aims to contribute to the development of a single-phase electricity meter. As a contribution to the prototype, calibration, the research and implementation of the strategy for accounting of electrical energy measured by the meter are conducted.

The measurement results of the main electrical quantities recorded are presented in dashboards, and the meter

calibration information is displayed based on curves of random and systematic errors over all measurement range. From the error curves, it was found that the meter in question exhibits errors ranging between $\pm 0.53\%$ and $\pm 5\%$ for measurements within the 2 to 10 A range.

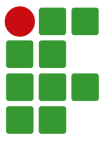
Keywords – Electricity Measurement, Smart Energy Meter, Internet of Things, Machine-Level Monitoring.

I. INTRODUÇÃO

A adesão à quarta revolução industrial, comumente denominada de Indústria 4.0, tem crescido substancialmente desde 2011 acompanhada da crescente transformação digital nos processos industriais, hospitalares e residenciais. A digitalização da vida cotidiana nos conduz a refletir sobre como o emprego dos dispositivos de monitoramento conectados à internet pode contribuir para o desenvolvimento econômico, ambiental e social [1]. No âmbito da energia elétrica, essa realidade pode ser observada no aspecto dos medidores de energia elétrica inteligentes. Esses novos modelos vêm substituindo de forma gradativa os antigos medidores eletromecânicos e possibilitam maior eficiência nos setores energéticos e nos processos produtivos [2].

Os medidores inteligentes desempenham um papel importante no sentido de viabilizar a prestação de informações detalhadas sobre o consumo de energia, aos consumidores e as empresas distribuidoras de energia, com o objetivo de aprimorar a gestão da mesma. Esses equipamentos também permitem o acompanhamento numa perspectiva relacionada a qualidade da energia elétrica, que de forma geral, leva em consideração aspectos como a continuidade do fornecimento, conformidade com parâmetros desejáveis, ausência de distorções, flutuações de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrio em sistemas trifásicos e transientes rápidos [3].

Os medidores de energia elétrica inteligentes utilizam em sua concepção, transdutores de tensão e corrente, juntamente com circuitos condicionadores de sinais, para coletar e adequar os sinais de interesse. Posteriormente, os dados analógicos são digitalizados, processados e armazenados em microcontroladores que organizam as informações a serem exibidas ou transmitidas [2].



Seguindo essa estrutura, diferentes medidores vêm sendo concebidos [4]-[7]. Em [4] foi desenvolvido um medidor de energia para monitoramento do consumo total em uma residência, capaz de calcular tensão e corrente eficazes, além da potência ativa, reativa, fator de potência e consumo instantâneo, empregando o microcontrolador MSP430 para aquisição dos dados e com o processamento efetuado através de um algoritmo implementado no software LabVIEW®. A continuidade do referido trabalho é realizada em [5] com a medição das cinco primeiras harmônicas ímpares de corrente e a identificação das assinaturas de carga permitindo a identificação da carga alimentada. O trabalho apresentado em [6] descreve as etapas de desenvolvimento de um medidor de energia, utilizando dispositivo de lógica configurável FPGA Xilinx CLG484, permitindo a medição do consumo de energia, registro dos dados, e a extração das componentes fundamentais e de sequência positiva. Em [7] foi desenvolvido outro medidor cujo sistema de condicionamento é detalhado e os sinais obtidos são processados em um kit ESP32 tendo a estimativa das harmônicas como resultado, além do cálculo das potências e consumo de energia. A visualização dos dados é apresentada por meio do aplicativo Blink e dentre as sugestões de continuidade apontadas para o trabalho tem-se a necessidade da validação do sistema desenvolvido, caracterizando incertezas, precisão e exatidão do protótipo. Neste sentido, é importante compreender que o processo de desenvolvimento de um medidor, envolve a seleção de módulos adequados, calibração do sistema, estimativas de incerteza, análises da possibilidade de erros e suas possíveis propagações, além da classificação do instrumento quanto à precisão e exatidão [8].

Contudo, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de um medidor de energia elétrica monofásico, elaborado durante o projeto de pesquisa intitulado como “Medidor de energia Wi-fi para telemetria de máquinas e equipamentos elétricos” vinculado ao edital universal 02/2019 do IFSC. O protótipo desenvolvido nos referidos projetos [9] e [10], contempla os circuitos de condicionamento de tensão e corrente, a elaboração do *firmware* para aquisição e processamento de sinais embarcado na plataforma Arduino Uno com comunicação Wi-fi integrada em um módulo ESP8266. Os dados de Potência ativa, reativa e fator de potência podem ser visualizados em dashboards específicos desenvolvidos para o projeto. Como contribuição para o protótipo, este trabalho propõe a realização de uma avaliação de desempenho do medidor e sua calibração. Isso inclui a condução de testes isolados para cada etapa da medição de potência, como o circuito de condicionamento, o código fonte embarcado e a apresentação de dados. Por fim, são investigadas abordagens para calcular o consumo de energia elétrica e efetuada a implementação da mais conveniente ao projeto. Em contraste aos trabalhos previamente discutidos, o medidor abordado neste trabalho utiliza de *dashboards* próprios para aplicação no âmbito da concepção de um sistema IOT, não necessitando da utilização de softwares comerciais. Além disso, o trabalho abrange a calibração do medidor desenvolvido

e apresenta suas curvas de erro através de um método de análise estatística de medições. Vale destacar da utilização de uma bobina de Rogowski como transdutor de corrente, que traz vantagens por não saturar, permitindo a realização de medições mais confiáveis em uma ampla faixa de corrente e largura de banda, além de possuir uma característica construtiva flexível que facilita seu manuseio [11].

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a fundamentação teórica, a seção III consiste na descrição do desenvolvimento do projeto, a seção IV apresenta os resultados obtidos e a V as conclusões e considerações finais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conhecimentos necessários para o entendimento do projeto de pesquisa desenvolvido, assim como da proposta de contribuição para o trabalho. São listados e explorados como principais conceitos necessários, o conhecimento dos circuitos de medição desenvolvidos, os cálculos realizados no código fonte do microcontrolador, a plataforma IOT de exibição, os métodos de ensaio e as estratégias para cálculo do consumo de energia elétrica.

A. Circuito de condicionamento do sinal de tensão

O circuito de condicionamento do sinal de tensão, pode ser dividido em duas partes, o divisor de tensão e uma configuração com amplificador operacional denominada subtratora, apresentado na figura 1.

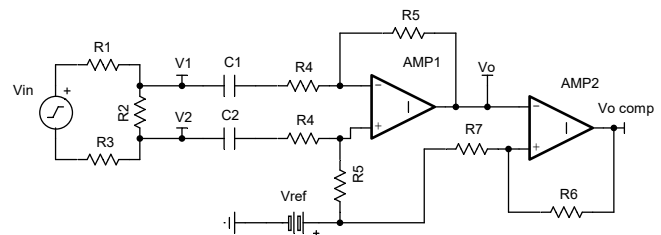


Fig. 1. Circuito de condicionamento de tensão.

Considerando que a faixa de leitura da porta ADC do microcontrolador Arduino Uno, é de 0 a 5 volts e o objetivo do circuito medidor de tensão é realizar medições de até 250 V_{RMS} , tensão essa representada pela fonte V_{in} da figura 1, tem-se a necessidade de adequar os níveis de tensão originais para sinais de menor amplitude. Uma alternativa simples e eficiente para a redução da amplitude do sinal, é a utilização de um divisor de tensão resistivo [12]. A tensão no resistor de medição R_2 é representada por:

$$V_2 - V_1 = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1)$$

Ao empregar um divisor de tensão resistivo para a medição de uma tensão diferencial, emprega-se no circuito, um amplificador

operacional na configuração subtrator. Nesse arranjo a tensão de saída do amplificador é igual a diferença das tensões V_1 e V_2 , multiplicada por um ganho [13].

Além disso, considerando que o sinal de tensão a ser condicionado possui valores de tensão instantâneos menores que zero e que a faixa de leitura da porta ADC do microcontrolador é de 0 a 5 V, a solução de uma referência de tensão maior que zero junto ao ampop pode ser empregada. Dessa forma o sinal de saída pode ser deslocado para o quadrante positivo, tendo sua amplitude negativa convertida para positiva conforme equação 2:

$$V_o = \frac{R_5}{R_4}(V_2 - V_1) + V_{ref}. \quad (2)$$

As escolhas de valores dos componentes do circuito são baseados no valor de tensão definido como tensão máxima de medição (250 V_{RMS}) e nos valores máximos e mínimos de leitura da porta ADC do microcontrolador (0 a 5 V).

Além das etapas de condicionamento do sinal de tensão há também um ampop na configuração comparador, que compara a tensão de saída do circuito de condicionamento com a tensão de referência, ou seja, toda vez que a tensão de saída do condicionador de tensão ultrapassar a tensão de referência, a tensão de saída do ampop comparador satura. Deste modo, um sinal digital é gerado com a mesma frequência do sinal senoidal, possibilitando ao microcontrolador, através de uma porta digital, computar os dados de frequência do sinal.

B. Circuito de condicionamento do sinal de corrente

O circuito condicionador do sinal de corrente é composto por quatro estágios, um filtro passa baixas passivo diferencial, um circuito pré-amplificador diferencial, um integrador e um amplificador inversor para ajuste de ganho, conforme figura 2.

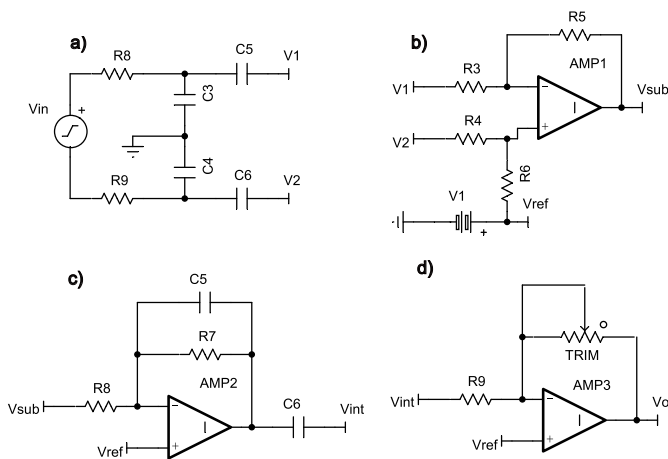


Fig. 2. Circuito de condicionamento de corrente. (a) Filtro passa baixas, (b) Pré amplificador, (c) Integrador, (d) Ajuste de sinal.

O filtro passa baixas tem a função de atenuar ruídos em altas frequências capturadas pelo sensor de medição, a bobina

de Rogowski [11], antes dos estágios de amplificação. Para o projeto, dimensiona-se um filtro passa baixas com frequência de corte em aproximadamente 1 kHz. Por meio da equação 3 é possível determinar os valores dos componentes do circuito através da frequência de corte desejada [14].

$$\omega_c = \frac{1}{R_1 C_1} \quad (3)$$

O circuito pré amplificador do condicionador do sinal de corrente possui a mesma função do amplificador operacional subtrator mencionado na seção do circuito condicionador do sinal de tensão. Porém, além de servir para a medição diferencial e deslocamento dos valores instantâneos de corrente negativos para positivos, ao contrário do sinal de tensão, o sinal de corrente tem a necessidade de ser amplificado, pois, a sua magnitude original está em uma ordem de centenas de μV . Para isso, como descrito na equação 2, o ganho do ampop diferencial é alterado pelos resistores R_4 e R_5 .

A terceira etapa do circuito é constituída por um amplificador integrador com um resistor de realimentação de alta impedância. É necessário integrar o sinal de corrente devido a utilização de uma bobina de Rogowski como transdutor, que dispõe como resposta à corrente medida, uma tensão de saída igual a sua derivada [11].

A última etapa do circuito é composta por um amplificador inversor com ampop utilizado para ajuste do ganho do sinal, através de um trimpot [13], dada por:

$$A = \frac{TRIM}{R_9}. \quad (4)$$

C. Firmware

O código fonte do microcontrolador Arduino executa a aquisição dos dados de tensão e corrente, cálculo da tensão e da corrente RMS, cálculo da frequência, cálculo do fator de potência e das demais potências, conforme ilustrado no fluxograma da figura 3. Além disso, há outro microcontrolador, o ESP8266, que exerce a função de conectividade Wifi com o servidor, onde estão armazenados os dados gráficos da *dashboard*.

O *firmware* do Arduino é iniciado pela aquisição e cálculo do somatório dos valores de corrente (I_i), tensão (V_i) e potência instantâneos. Após a aquisição de 1000 valores (quantidade de amostras definida experimentalmente e representada por "n"), de corrente, tensão e potência instantânea, calcula-se a corrente e tensão RMS. O cálculo realizado pelo *firmware* é descrito por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}}, \quad (5)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}}. \quad (6)$$

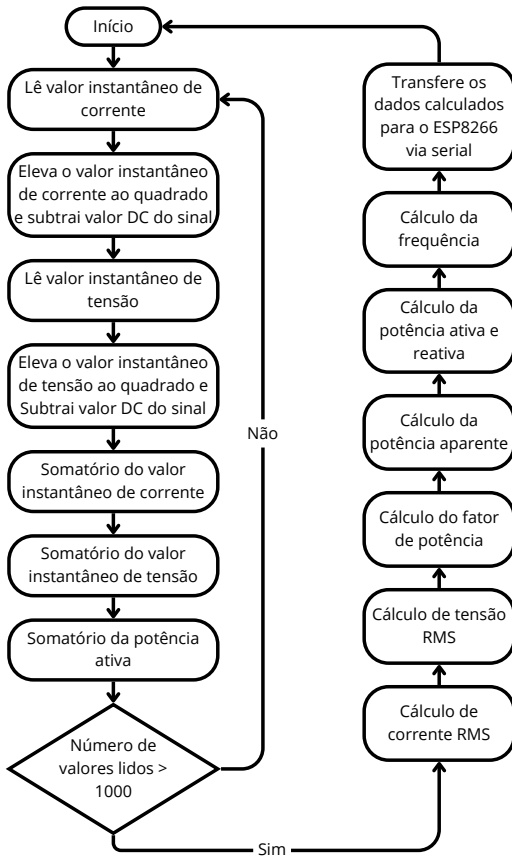


Fig. 3. Fluxograma do *firmware*.

Através do dado de potência instantânea é possível obter o fator de potência com base na estratégia abordada em [15] e [16]. Por meio das tensões e correntes calcula-se a potência ativa (P) e com base na tensão e corrente RMS, a potência aparente (S). Dessa forma, a partir da potência ativa e aparente, pode-se obter o fator de potência (FP) por meio da divisão entre elas, conforme as equações a seguir:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i, \quad (7)$$

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}, \quad (8)$$

$$FP = \frac{P}{S}. \quad (9)$$

Por fim, calcula-se a frequência do sinal através da função *Pulsein*, que determina a duração em segundos de um pulso em uma entrada digital do microcontrolador empregado. Após a realização dos cálculos necessários, os dados processados pelo Arduino UNO, são enviados para o servidor conectado a rede *Wifi* por intermédio do ESP8266.

D. Plataforma IOT de exibição

Uma *dashboard* destinada à exibição dos dados foi desenvolvida durante o projeto de pesquisa, mencionado na introdução, em que, toda a parte gráfica é criada através de um *Raspberry Pi* utilizado como servidor. O servidor disponibiliza uma rede *wireless* como meio de comunicação com o medidor e com o usuário que deseja visualizar a *dashboard*. Neste caso, seu acesso é realizado através de um endereço de IP específico em qualquer navegador.

O apêndice A, apresenta a *dashboard* criada, com os dados de tensão RMS, corrente RMS, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, frequência e energia consumida, sendo exibidos.

E. Calibração do medidor

Para melhor entendimento da etapa de calibração do medidor, alguns conceitos sobre metrologia são apresentados a seguir:

1) *Valor verdadeiro convencional*: O valor verdadeiro convencional é a medida que está sendo arbitrada como correta para a medição realizada.

2) *Tendência e correção*: A tendência (Td) está associada ao erro sistemático de medição. Por meio da diferença do valor verdadeiro convencional (VVC) e da média das medidas realizadas (\bar{I}) encontra-se uma tendência de erro do medidor, da qual é corrigida através de uma constante denominada correção (C). A tendência e a correção podem ser expressas pelas 10 e 11:

$$Td = \bar{I} - VVC, \quad (10)$$

$$C = -Td. \quad (11)$$

3) *Repetitividade*: A repetitividade do sistema de medição está ligada ao erro aleatório do medidor. Os erros aleatórios são os valores em torno do erro sistemático, dentro da qual o erro é esperado com certa probabilidade, determinando a confiabilidade com que a indicação poderá ser encontrada dentro do resultado de medição. Através da teoria da distribuição normal, calcula-se o desvio padrão de uma quantidade de amostras (n) e estima-se a incerteza padrão (u), a fim determinar a intensidade da componente aleatória do sistema de medição [17]. A equação abaixo apresenta o cálculo da incerteza padrão do sistema de medição:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}}. \quad (12)$$

Através do coeficiente de *student* (t), anexo I, que utiliza como base o desvio-padrão estimado, as incertezas associadas a um ensaio de medição com poucas amostras, podem ser compensados. Normalmente na literatura, para a escolha do coeficiente, utiliza-se uma probabilidade de 95,4% de se encontrar o valor do mensurando. Por fim, por meio dos graus de

liberdade, define-se o coeficiente de student para a determinação da repetitividade (Re) do sistema de medição. A equação 13 apresenta o cálculo de repetitividade.

$$Re = \pm t \cdot u. \quad (13)$$

4) *Resultado de medição*: O resultado de medição (RM) é uma composição do resultado prévio obtido (Rp), correção e repetitividade. Ou seja, em um resultado de medição há a soma da correção do erro sistemático com a indicação, juntamente do erro esperado determinado pela repetitividade. A equação 14 e a figura 4 representam de outra forma o resultado de medição:

$$RM = Rp + C \pm Re. \quad (14)$$

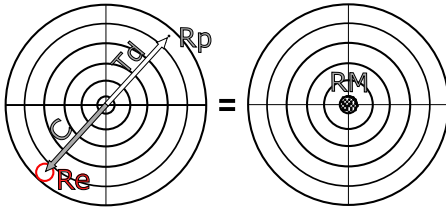


Fig. 4. Representação do resultado de medição. Adaptado de [17]

5) *Curva de erros*: As ideias tratadas anteriormente sobre repetitividade, tendência e resultado de medição, são obtidas apenas para uma condição de medição específica de um medidor, onde repetidas medições são realizadas, para por exemplo, uma mesma tensão de 220 V. Tal condição não significa que ao realizar outra medição em 127 V, os resultados de repetitividade e tendência seriam os mesmos. Sendo assim é cabível determinar a tendência e repetitividade para os demais pontos dentro da faixa de medição. Tais informações podem ser melhor representadas graficamente, formando então uma curva de erros do sistema de medição, conforme a figura 5.

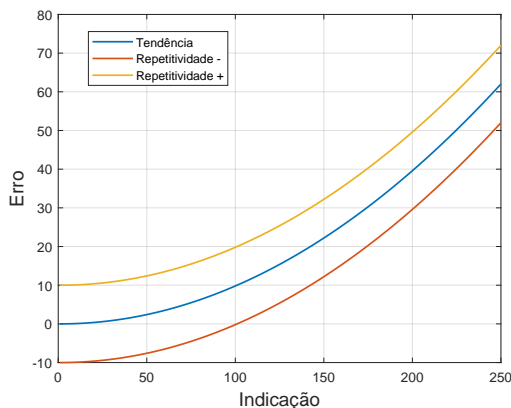


Fig. 5. Curva de erros. Adaptado de [17]

Na curva de erros, três linhas são traçadas, sendo elas, a linha central representando a tendência, a linha superior representando a tendência somada a repetitividade e a linha inferior representando a tendência subtraída da repetitividade. Todas as linhas traçadas são representadas por valores absolutos da unidade que está sendo analisada. Por exemplo, se a grandeza analisada fosse tensão, a unidade da curva de erros estaria sendo apresentada em Volts.

6) *Calibração indireta*: Em determinadas grandezas, não há medidas materializadas, o que torna a utilização do método de calibração direta inviável. Dessa forma, o método a ser executado é o da calibração indireta, que utiliza um dispositivo de medição auxiliar. Nesse método, emprega-se o uso de dois dispositivos de medição, o que se deseja calibrar e o equipamento de referência [17].

F. Contabilização da energia consumida

O consumo de energia elétrica é contabilizado através da medição da quantidade de potência elétrica (kW) consumida em um intervalo de tempo, expresso em quilowatt-hora (kWh), descrito pela equação 15.

$$E = P \cdot \Delta t. \quad (15)$$

Neste sentido, a seguir são apresentadas algumas estratégias que vêm sendo abordadas para implementar a variável de tempo em medidores de energia elétrica.

Em [6], são citados diversos trabalhos que utilizam uma estratégia muito similar entre eles para a medição da energia consumida. Tais trabalhos utilizam chips como o ADE7752 que são específicos para essa aplicação. Nessa abordagem o chip disponibiliza ao microcontrolador uma determinada quantidade de pulsos, que correspondem a energia consumida pelo equipamento, por exemplo, em [18] 3000 pulsos gerados pelo chip equivalem a 1 kWh.

Já em [5] o autor determina que o intervalo entre cada medida é realizado dentro de um segundo e considera que a potência é constante dentro desse intervalo. Dessa forma, o valor de consumo é dado em Watt-segundo.

Outra forma de computar essa medida, é abordada em [19], na qual o autor utiliza uma função específica do Arduino (*millis()*) para a aquisição de tempo. A função utilizada retorna um valor em milissegundos que corresponde ao tempo desde que o microcontrolador foi iniciado.

Em outras aplicações com Arduino, desenvolvidas em [20] e [21], os autores utilizam um medidor de energia comercial, que possui uma estratégia muito similar a realizada em [18], que também determina a energia consumida através dos pulsos gerados por um medidor de energia. Além disso, utilizam em sua concepção um periférico *Real Time Clock* (RTC), que informa ao microcontrolador dados como data e hora atual, para determinar os custos financeiros em determinado período de tempo.

III. METODOLOGIA

Essa seção apresenta as implementações realizadas os métodos de ensaio utilizados no trabalho para realizar a validação das partes que compõem o medidor de energia e sua calibração. A figura 6 apresenta em um fluxograma as partes do protótipo.

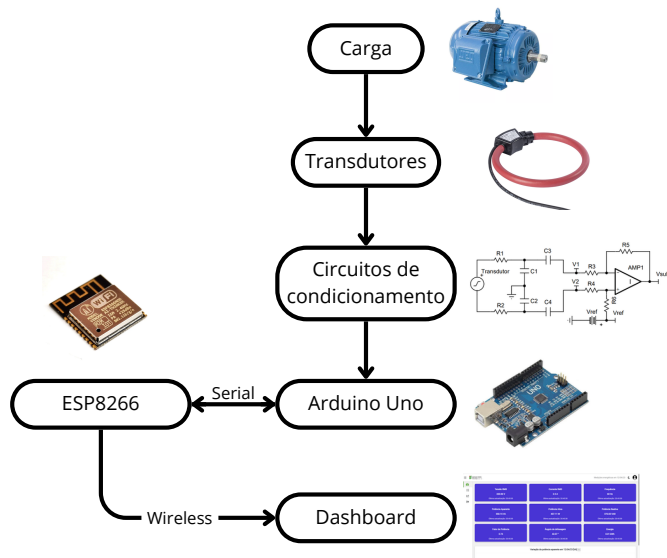


Fig. 6. Fluxograma geral do projeto.

A. Avaliação com o dashboard

Para a avaliação do medidor por completo, realiza-se o método de calibração indireta [17], utilizando como comparação o alicate wattímetro digital Minipa ET-4091. Conseqüente, efetua-se o levantamento dos dados de medição do medidor desenvolvido e do medidor comercial. Dessa forma, os dados são comparados, determinando que, o valor verdadeiro convencional consiste nos dados obtidos do medidor comercial. Ao fim dos ensaios, são obtidas 50 amostras para cada indicação, que são utilizadas para formar a curva de erros para cada grandeza medida.

O ensaio de corrente, tensão, fator de potência e energia são executados de forma individual e seus procedimentos são descritos conforme segue:

1) *Ensaio de corrente:* O ensaio de corrente utiliza apenas cargas resistivas de aproximadamente 400 W ligadas em paralelo, formando um banco de resistências que possa abranger toda a faixa de leitura de corrente do medidor até 10 A. Através da fonte de alimentação de tensão variável (FCAMHQ 250-44-50-n154501) pode-se explorar bem os valores de corrente a serem lidos. Por meio da variação da tensão aplicada no banco de resistência, os valores de corrente determinados para o ensaio são acrescidos de 0,5 em 0,5 A até 10 A.

2) *Ensaio de tensão:* O ensaio de tensão emprega uma ideia muito similar a utilizada nos testes do circuito de condicionamento de tensão, buscando explorar as tensões consideradas pelo PRODIST, adequadas, precárias e críticas, sem a utilização de qualquer tipo de carga.

3) *Ensaio do fator de potência:* Para o ensaio do fator de potência montam-se três bancos de cargas, indutiva, capacitiva e resistiva. O banco de cargas resistivas possuindo duas resistências de aproximadamente 400 W, o banco de cargas indutivas com quatro indutores com potência de aproximadamente 350 VAR e um banco de três cargas capacitivas de potência de aproximadamente 1670 VAR. As cargas são ligadas em paralelo e combinadas para realizar medições abrangendo pelo menos dez indicações diferentes dentro da faixa de -90° a 90° .

4) *Ensaio da medição de energia:* O ensaio da medição de energia utiliza o mesmo equipamento de referência dos demais ensaios anteriormente discutidos. São realizados dois ensaios, um com apenas cargas resistivas e outro com cargas indutivas e resistivas. Para isso, utilizam-se duas cargas resistivas de aproximadamente 400 W ligadas em paralelo para o ensaio com fator de potência unitário e posteriormente, duas cargas resistivas de 400 W e duas cargas indutivas de 350 VAR ligadas em paralelo a uma tensão de 220 V. Ambos os medidores iniciam a medição de energia ao mesmo tempo e o ensaio é realizado durante duas horas e a cada 0,1 hora são anotados os valores de energia apresentados pelos dois medidores.

B. Implementação da medição de energia

Para a medição de energia, o trabalho propõe analisar a estratégia discutida em [19], onde utiliza-se uma função específica do Arduino para a aquisição de tempo. A função retorna o número de milissegundos passados desde que a placa Arduino começou a executar o programa atual. Dessa forma, o código pretende medir a diferença de tempo entre uma aquisição de tempo e a outra dentro do *loop*, ou seja, após realizar os cálculos relacionados à potência, o microcontrolador informa através da função *millis* quanto tempo o código está sendo executado e armazena este valor em uma variável, ao repetir o *loop*, realiza-se o cálculo da diferença do tempo que foi armazenado na variável e o tempo atual, tendo como resultado, o tempo que o código levou para ser executado. Através da aquisição do tempo, calcula-se o produto entre potência ativa e tempo, resultando no valor de energia consumida durante o tempo em que o código levou para ser executado uma vez. Conforme o código trabalha, o valor de energia instantânea é acumulado em uma variável, que representa o valor de energia consumido total desde que se iniciou a medição. A figura 7 apresenta através de um fluxograma o código descrito.

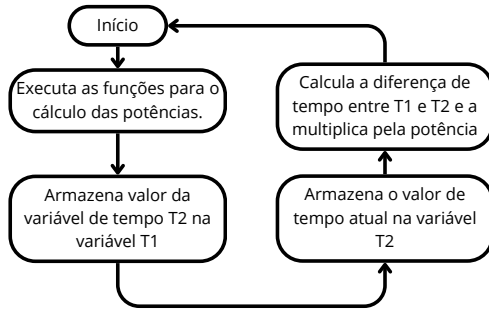
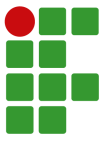


Fig. 7. Representação do código para aquisição de tempo.

C. Firmware

A fim de otimizar o código de programação do microcontrolador Arduino, optou-se por realizar outra abordagem, diferente da citada na seção de fundamentação teórica, para a sua construção, mantendo a estratégia descrita pelas equações 5, 6, 7, 8 e 9. Na nova abordagem, o *firmware* para a medição de corrente e tensão utiliza um vetor que armazena sequencialmente 230 valores de corrente e tensão, que através de testes correspondeu a aproximadamente três ciclos completos de uma senoide de 60Hz ou 4200 amostras por segundo. Por fim, com os valores armazenados nos vetores, calculam-se os dados de tensão e corrente RMS. A figura 8 representa através de um fluxograma o *firmware* em sua nova abordagem.

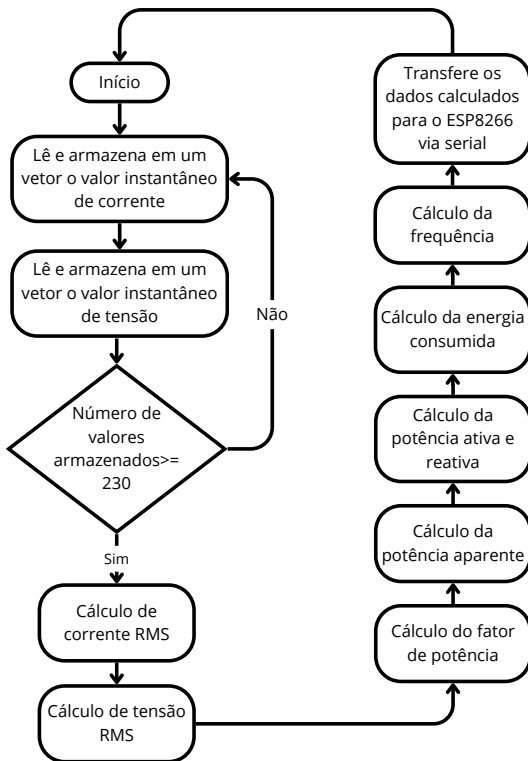


Fig. 8. Fluxograma do *firmware* alterado.

Além disso, no bloco de cálculo do fator de potência é realizado a correção do ângulo de defasagem presente nos circuitos de condicionamento. Nesse bloco, o microcontrolador identifica por meio do cruzamento por zero das formas de onda de corrente e tensão, se a tensão está adiantada ou atrasada em relação a corrente na carga. Após isso, calcula o fator de potência e então corrige o ângulo de defasagem determinado pela medição no osciloscópio. O fluxograma da rotina de programação é apresentado pela figura 9.

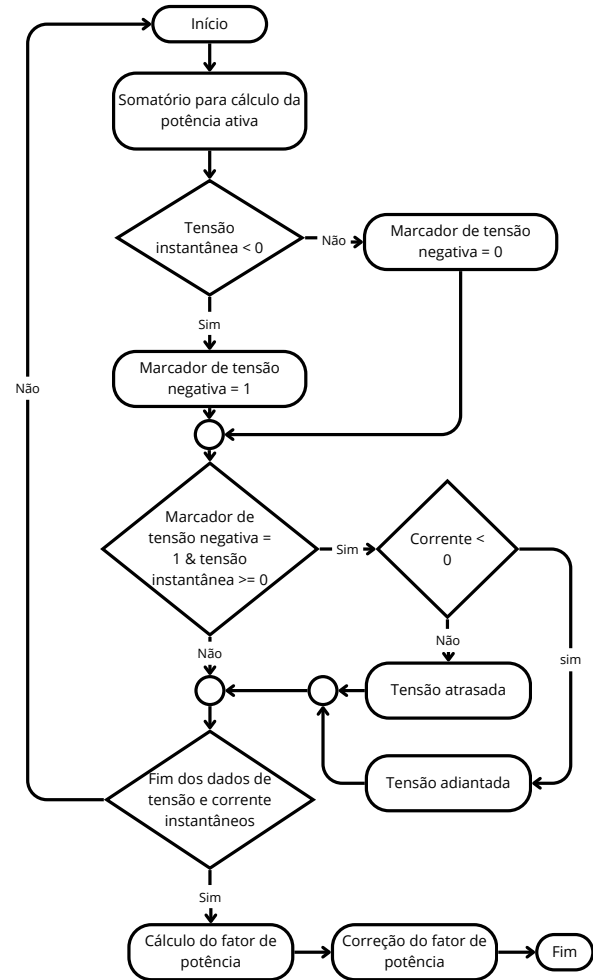
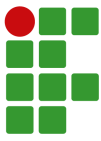


Fig. 9. Fluxograma da correção do fator de potência.

D. Testes nos circuitos de condicionamento

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos circuitos de condicionamento de sinais, realiza-se a comparação dos resultados práticos com os resultados de simulação para os sinais de tensão e corrente.

Para o sinal de tensão, define-se dez amostras de tensão de entrada para o ensaio do circuito. As amplitudes foram baseadas nas tensões nominais do protótipo do medidor e nos valores considerados pelo PRODIST, adequados, precários e críticos, que variam entre 127 V e 220 V de acordo com a figura 10 [22].



Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)/(117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fig. 10. Padrão de qualidade de fornecimento de energia [22].

Como ferramenta para avaliar o circuito de condicionamento do sinal de tensão, utiliza-se um equipamento da empresa supplier (FCAMHQ 250-44-50-n154501) como fonte de alimentação para o medidor. A fonte tem a capacidade de fornecer tensões senoidais com baixa distorção harmônica, e também possibilita a variação da tensão e da frequência em uma ampla faixa, permitindo alimentar cargas com formas de onda senoidais em diversas condições de alimentação.

A estratégia de ensaio do sinal de corrente é resumida em aplicar um sinal de entrada conhecido ao medidor e comparar seus resultados. A fim de definir uma faixa de sinais de entrada, como simulação da amplitude da bobina de Rogowski, busca-se explorar toda a faixa de medição possível para o medidor, variando o sinal de entrada de 10 em 10 uVp, até 500 uVp e de 50 em 50 uVp até 950 uVp onde o ampop condicionador satura.

Para o sinal de entrada, utiliza-se um gerador de sinais de dois canais a fim obter uma entrada de tensão diferencial. Além disso como o gerador não é capaz de fornecer sinais com tensão abaixo de 1mV, há a necessidade de utilizar um divisor resistivo para diminuir sua amplitude. O circuito para entrada do sinal é apresentado na figura 11.

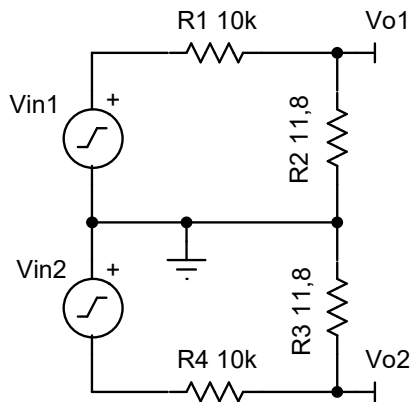


Fig. 11. Divisor resistivo para ensaio.

Após a verificação do circuito condicionador através de um sinal conhecido, realiza-se testes com a bobina de Rogowski, que por sua vez possui uma sensibilidade de 50 mV/kA. Os testes com a bobina são realizados variando a corrente de carga de 0,1 em 0,1 A até 1 A e de 0,5 A em 0,5 A até 10 A.

Para a medição dos sinais, utilizam-se dois equipamentos, um osciloscópio Tektronix TBS1102B e um multímetro digital de precisão Tektronix DMM 4050 6-1/2. Para a medição da tensão média do sinal de saída dos circuitos condicionadores, emprega-

se o uso do multímetro e para a medição dos sinais RMS de entrada, saída e defasagem, utiliza-se o osciloscópio com o canal em acoplamento CA. As tensões RMS e média, são medidas separadamente a fim de facilitar a análise dos sinais.

IV. RESULTADOS

Essa seção tem por objetivo apresentar os resultados dos testes e ensaios realizados com o medidor. Nas partes dos circuitos de condicionamento, medição de energia e cargas não lineares, são apresentados os resultados dos erros através de uma média simples, apenas para comparação. Já para as medições apresentadas no *dashboard*, as curvas de erros são exibidas e discutidas.

A. Circuitos de condicionamento

Após a realização das medições observou-se que o circuito de condicionamento de tensão, apresentou um erro máximo no sinal RMS entre protótipo e simulação de 1,46% e na medição da tensão média do sinal, um erro máximo de 1,86%. A figura 12 apresenta os resultados de tensão de entrada por tensão de saída do circuito condicionador.

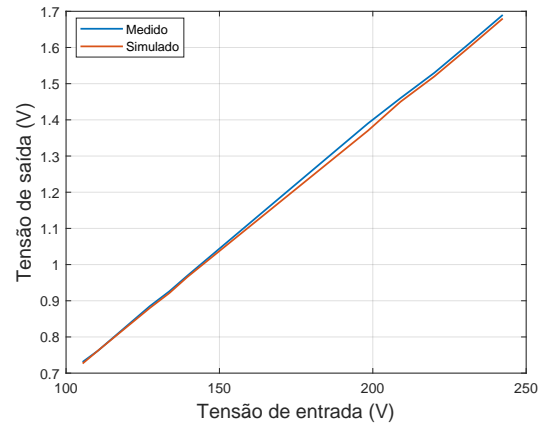
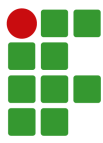


Fig. 12. Resultado de tensão de entrada em função da tensão de saída.

Os resultados dos ensaios do circuito de condicionamento de corrente, através do gerador de funções, apresentaram um erro máximo entre o resultado da tensão RMS medido com o simulado de 2,67% e na medição da tensão média, um erro máximo de 2,6%.

Através dos ensaios, a faixa de corrente a ser medida, foi definida com base no valor RMS máximo permitido pelo circuito condicionador (sinal saturado), que passa a saturar em 1870 mV. Para obter uma margem de medição, foi definido o sinal RMS máximo igual a 1500 mV, tendo em vista que a corrente máxima de medição é de 10 A.

Os testes realizados com a bobina de Rogowski apresentam diferentes erros dependendo da indicação da corrente medida. A figura 13 (a), apresenta os resultados dos testes em toda a faixa de medição do medidor. Já observando na figura 13 (b), uma ampliação da figura 13 (a), pode-se notar um



desvio entre os resultados simulados e medidos, que ocorrem principalmente pela relação sinal-ruído para baixos valores de corrente, indicando um erro máximo de 11,33% na faixa de medição entre 0,1 a 1 A. A figura 13 (c), na faixa de 1,5 a 6 A, os resultados simulados e medidos não possuem desvios significativos. Porém, avançando na faixa de 6,5 a 10 A, apresentado na figura 13 (d), observa-se um aumento brusco no erro da medição a partir de aproximadamente 1300 mV, que é causado devido a transição na escala de medição do osciloscópio utilizado para a medição dos sinais, indicando um erro máximo de 2,67%.

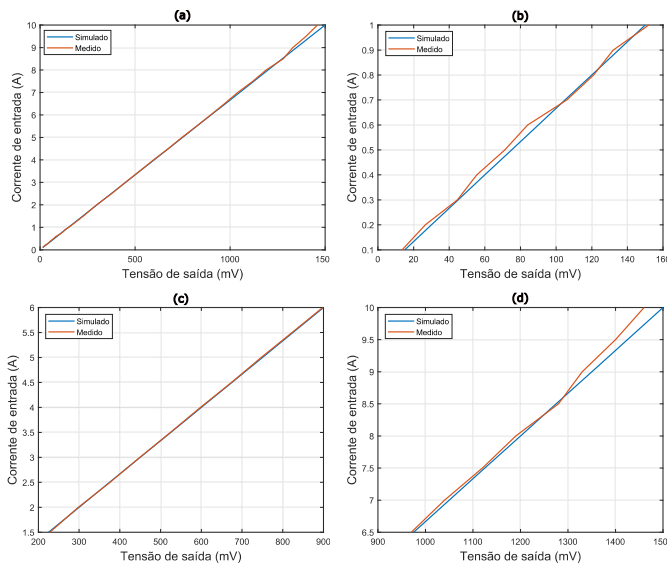


Fig. 13. Resultado da corrente de entrada em função da tensão de saída. (a) Faixa de 0 a 10 A. (b) Faixa de 0,1 a 1 A. (c) Faixa de 1,5 a 6 A. (d) Faixa de 6,5 a 10 A.

B. Medição de energia

Dois ensaios de medição de energia são realizados, um com apenas cargas resistivas e outro com cargas resistivas e indutivas.

Utilizando duas cargas resistivas que somam 800 W, de acordo com a equação 15, o resultado do consumo de energia aproximado, após duas horas, deve ser aproximadamente 1,6 kWh.

Contudo, como resultado dos testes, após as duas horas os dois medidores, o protótipo e o comercial, apresentaram respectivamente um consumo total de energia de 1,56 e 1,556 kWh. A figura 14 apresenta a curva de aumento do consumo de energia durante os testes.

No segundo ensaio, utilizando duas cargas resistivas somando 800 W e duas cargas indutivas somando 750 VAR, de acordo com a equação 15, o consumo total após duas horas deve totalizar também aproximadamente 1,6 kWh, no entanto ao fim das duas horas os medidores, comercial e protótipo, apresentaram respectivamente como resultado 1,67 kWh e 1,65 kWh. Levando em consideração que a carga utilizada não é puramente indutiva, um valor ligeiramente maior comparado ao ensaio realizado

apenas com cargas resistivas é justificado. A figura 15 apresenta a curva de aumento do consumo de energia durante os testes.

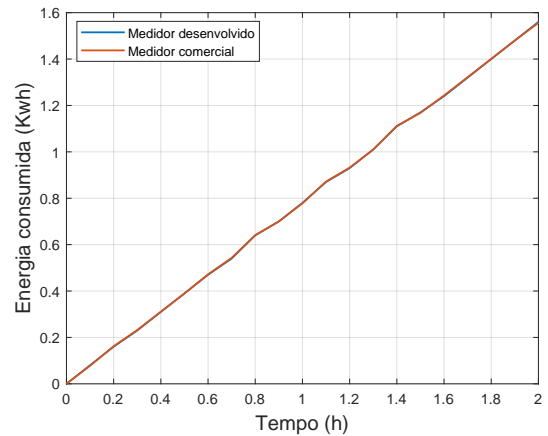


Fig. 14. Resultado do ensaio da medição de energia com carga resistiva.

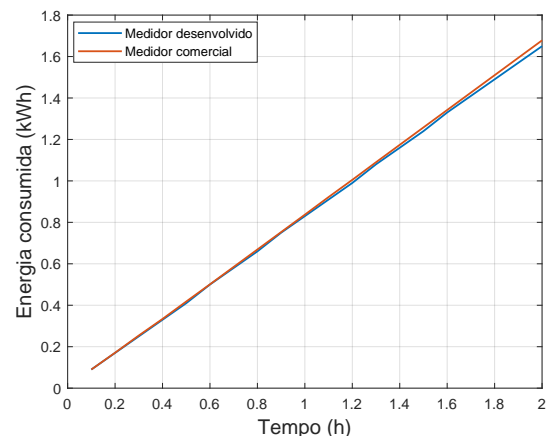


Fig. 15. Resultado do ensaio da medição de energia com carga indutiva acoplada.

C. Curvas de erros

Em geral, todas as curvas de erros apresentadas posteriormente, utilizam a metodologia abordada em [17]. Dessa forma, para cada uma das grandezas envolvidas, tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, potência aparente e potência reativa, foram registrados 50 amostras de medição em pelo menos dez indicações diferentes. Através das amostras adquiridas, calcula-se a tendência, e repetitividade para cada uma das indicações.

Assumindo que o valor verdadeiro convencional (VVC) é o valor lido pelo medidor de energia Minipa ET-4091, realiza-se o cálculo da tendência das indicações. Para isso, utilizando a média das 50 amostras registradas, o resultado da tendência será a subtração da média pelo VVC, conforme a equação 10.

O cálculo de incerteza padrão é realizado para determinar a intensidade do erro aleatório de medição, seguindo a equação

12. Consequente, através do coeficiente de *student*, apresentado no anexo I, utilizando uma probabilidade de 95,45% e graus de liberdade igual a 50, o cálculo de repetitividade é feito através da equação 13. Abrangendo todos os resultados de tendência e repetitividade das indicações, as curvas de erros são formadas. Dessa forma, através das curvas de erros, é possível obter o resultado de medição para cada indicação do medidor, utilizando a equação 14.

Na curva de erros de corrente, apresentada pela figura 16, pode-se notar que a primeira indicação de 0,5 A possui um erro aleatório máximo de $\pm 28,26\%$ e a tendência de medição se mantém em 0 A. Nessa indicação, o medidor aponta uma medição não confiável. Já mais próximo do final da escala, na indicação de 9 A, o erro aleatório é reduzido para $\pm 0,53\%$ de erro máximo, enquanto que, a tendência de medição, aumenta para -0,3 A. Apesar de aumentar o valor de tendência, por ser uma parcela do erro previsível, nessa indicação, o medidor mostra uma medição com uma confiabilidade superior comparado as indicações menores. Esse comportamento pode estar relacionado principalmente pela amplitude do sinal de saída do circuito de condicionamento ser baixo nas indicações menores, apresentando problemas de relação entre sinal-ruído e quantização. Contudo, comparando o resultado com o medidor comercial utilizado como referência, que contempla uma precisão de $\pm 1\%$ em toda a faixa de medição de corrente, para tornar-se um medidor com uma confiabilidade similar, o medidor desenvolvido deve passar por melhorias em relação a diferença de confiabilidade em diferentes indicações de corrente.

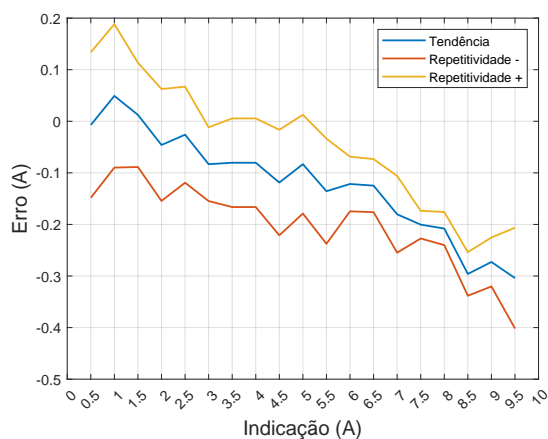


Fig. 16. Curva de erros na medição de corrente.

A curva de erros da tensão, apresentada na figura 17, exibe na sua primeira indicação de 106 V, um erro aleatório máximo de $\pm 0,6\%$ com uma tendência de medição próxima de 0 V. Ao final da escala, na indicação de 242 V o medidor apresenta um erro aleatório máximo de $\pm 0,87\%$ e com a tendência de medição de 0,63 V. No caso da tensão, os erros aleatórios e

previsíveis são quase que constantes durante toda a escala de medição. Dessa forma, comparando o medidor comercial com o desenvolvido, pode-se dizer que para a medição de tensão, o medidor está próximo da precisão indicada pelo comercial, que apresenta $\pm 0,5\%$ de erro em toda faixa de medição.

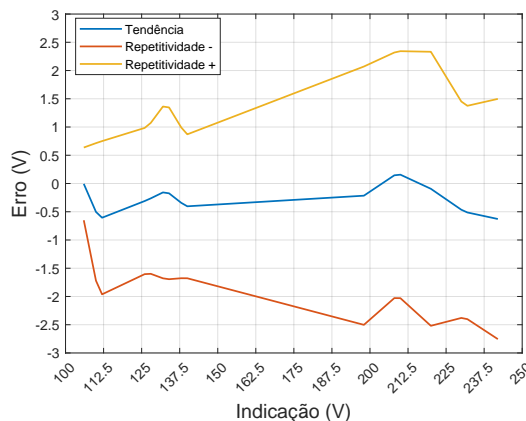


Fig. 17. Curva de erros na medição de tensão.

Até através do gráfico de erros do fator de potência, apresentado pela figura 18, visualiza-se que nas indicações de -0,6 e 0,9 o gráfico apresenta erros sistemáticos e aleatórios menores, de no máximo $\pm 1,8\%$, enquanto que, conforme as indicações se aproximam de 0, o erro passa a aumentar e indica um erro máximo de $\pm 4,9\%$. O medidor utilizado como referência, leva em consideração a taxa de distorção harmônica do sinal para a medição de fator de potência e dessa forma, não há como realizar uma comparação confiável.

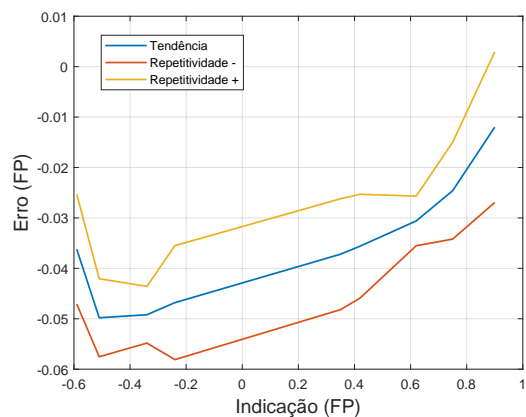
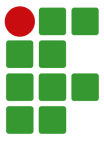


Fig. 18. Curva de erros na medição de fator de potência.

As curvas de erros da potência ativa apresentada pela figura 19, potência aparente, figura 20 e potência reativa, figura 21 possuem um comportamento semelhante. A indicação de 130 W, apresentado pela curva de erros da potência ativa, aponta



um erro aleatório máximo de $\pm 12,68\%$ e tendência de 5,73 W, enquanto que na última indicação, de 2000 W, um erro aleatório de $\pm 0,87\%$ e uma tendência de -67,15 W. Analisando a outra curva, a indicação de 130 VA, apresentado pela curva de erros da potência aparente, mostra um erro aleatório máximo de $\pm 14,5\%$ e uma tendência de 7,5 VA, já na última indicação, de 1975 VA, o erro aleatório passa a ser de $\pm 1,2\%$ e a tendência de -32,36 VA. Por último na indicação de 128 VAR, apresentado pela curva de erros da potência reativa, verifica-se um erro aleatório máximo de $\pm 12,8\%$ e uma tendência de -1,82 VAR, enquanto que na última indicação, de 1820 VAR, o erro aleatório máximo passa a ser de $\pm 1,5\%$ e a tendência de -29,29 VAR. Contudo, as curvas de erros das potências medidas, apresentam uma repetitividade maior em indicações menores e uma tendência maior em indicações maiores. Ao compará-las com a curva de erros da corrente, há uma similaridade entre elas, ou seja, os comportamentos das medições das potências estão sendo diretamente influenciados pelos erros na medição de corrente.

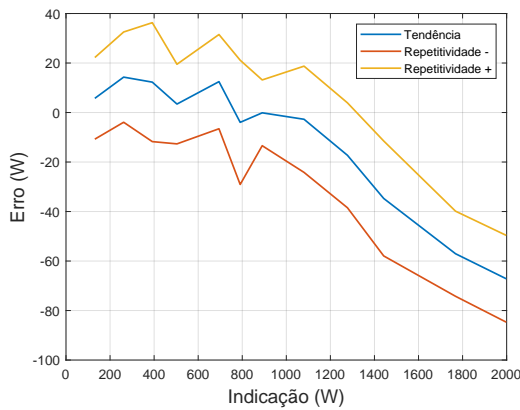


Fig. 19. Curva de erros da potência ativa.

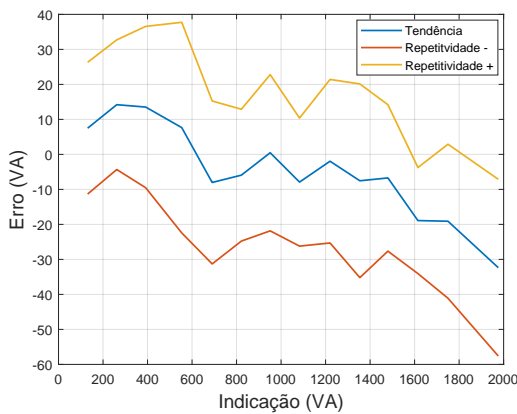


Fig. 20. Curva de erros da potência aparente.

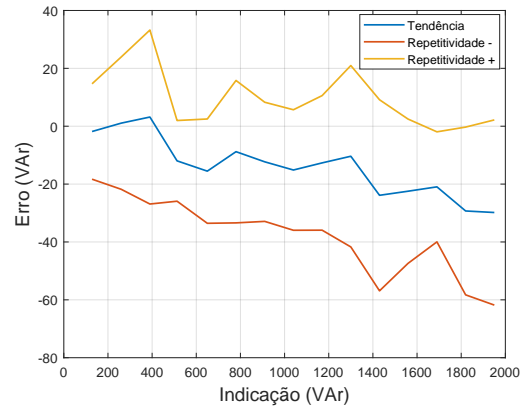


Fig. 21. Curva de erros da potência reativa.

As tabelas com as amostras registradas para cada grandeza podem ser visualizadas nos apêndices B, C, D, E, F e G. Apenas uma indicação de cada grandeza é apresentada para não sobrecarregar o trabalho.

D. Carga não linear

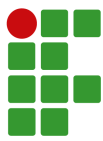
Outro ensaio utilizando uma carga não linear, foi realizado para verificar principalmente a medição de fator de potência nessas condições. No referido ensaio, um circuito "dimmer" foi utilizado para acionar uma carga resistiva de 400W. Durante o ensaio, a tensão na carga foi alterada e nessa condição registrou-se os valores de fator de potência, tensão de entrada e corrente da carga. Na tabela I apresenta os resultados de medição e o erro máximo de todas as amostras registradas para cada grandeza.

TABELA I

Resultado da medição com carga não linear

	Protótipo	Medidor Comercial	Erro máximo	
Tensão	221.1	222.7	-1.59	V
Corrente	1.28	1.27	0.01	A
Fator de potência	0.85	0.72	0.13	FP

Analisando os resultados da tabela I e comparando com as curvas de erros, nota-se uma significativa proximidade nos valores de tensão e corrente medidos com o medidor comercial e protótipo, validando as medidas de tensão e corrente RMS. No entanto, percebe-se uma expressiva diferença no âmbito do registro do fator de potência. Tal erro, como já discutido em [15], está relacionado a estratégia abordada para o cálculo de fator de potência, sinais não senoidais influenciam negativamente nos resultados de medição, devido a distorção harmônica. Para analisar a representatividade do registro com o protótipo, os dados de registro da forma de onda da corrente na carga foram considerados, viabilizando a obtenção de uma taxa de distorção harmônica de aproximadamente 58% para o respectivo ensaio. Substituindo o valor de THD na equação 16 e considerando o ângulo de defasagem igual ao resultado do fator de potência apresentado na tabela I, obtem-se o valor corrigido de fator de potência de 0,739, se aproximando do valor previsto em sua



curva de erro. Dessa forma, pode-se concluir que a inclusão do THD no cálculo de fator de potência pode contribuir para uma medição mais assertiva.

$$FP = \frac{\cos \phi}{\sqrt{THD^2 + 1}} \quad (16)$$

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a contribuição para o desenvolvimento de um medidor de energia elétrica oriundo de um projeto de pesquisa do campus, capaz de realizar medições de tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, aparente, reativa e consumo de energia.

Como contribuição, realizou-se o ensaio dos circuitos condicionadores de sinais para avaliar o seu comportamento. A partir disso, foi possível observar que os resultados mensurados dos circuitos de condicionamentos, na prática, estão em conformidade com os resultados de simulação. Também pode-se perceber que, sinais de menor amplitude apresentaram maior suscetibilidade a ruídos.

Além disso, o ensaio do medidor por completo foi realizado, avaliando os resultados apresentados em um *dashboard* e comparando-os com um medidor de energia comercial como referência. Os resultados são apresentados através das curvas de erros de cada grandeza medida pelo protótipo. Observou-se que os erros na medição de tensão se aproximam dos erros de um medidor comercial. Já a medição de corrente, deve passar por melhorias nas medições de baixa amplitude. Em trabalhos futuros, uma análise do medidor pode ser feita utilizando bobinas de Rogowski com sensibilidades diferentes, determinando uma faixa de medição a ser utilizada com cada uma delas, por exemplo, o medidor pode possuir 3 bobinas, uma que faça medições de 0 a 3 A, uma de 3 a 6 A e outra de 6 a 10 A.

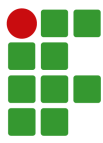
O trabalho discute também diversas maneiras de computar a energia elétrica consumida através de microcontroladores e implementa a estratégia mais viável para o projeto. Com base nisso, realizou-se o ensaio da medição de energia com cargas resistivas e em situações onde há cargas indutivas. Após os ensaios, o medidor apresentou resultados consistentes, acompanhando as indicações do medidor comercial utilizado como referência.

Outra avaliação utilizando cargas não lineares foi realizada. Através desse ensaio foi possível verificar que em sinais não senoidais o medidor não computa de forma assertiva a medição do fator de potência por não embarcar o cálculo das taxas de distorções harmônicas presentes neste tipo de acionamento. No entanto, pôde-se perceber que o fator de potência medido no respectivo ensaio, corresponde adequadamente ao $\cos \phi$ utilizado para obtenção do fator de potência quando considerado a THD, abrindo espaço para continuidade do projeto no âmbito da implementação de uma estratégia para medição de THD a partir do protótipo.

Através dos resultados observados, algumas estratégias podem ser utilizadas para mitigar os erros apresentados. A implementação de escalas de medição pode ser uma solução para diminuição dos erros aleatórios de medição ligados a ruídos nos circuitos de condicionamento. Outro método que também pode ser utilizado é a correção dos erros sistemáticos com equações que os representam através do código de programação.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ghobakhloo, “Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, p. 119869, 2020, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869.
- [2] T. R. d. S. NOGUEIRA, *Uma análise de protocolo para medidores digitais de energia elétrica BT*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- [3] S. M. Deckmann, J. A. Pomilio, “Avaliação da qualidade da energia elétrica”, Apresentação para curso de extensão de pós graduação, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- [4] R. M. Bacurau, *Medidor de energia inteligente para discriminação de consumo por aparelho através de assinatura de cargas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- [5] R. Bacurau, E. Ferreira, L. C. Duarte, J. S. Dias., “Techniques for Efficient Implementation of Firmware in Microcontroller’s Based Energy Consumption Breakdown Smart Meters”, *VIVECHAN International Journal of Research*, vol. 5, pp. 1–7, 2014.
- [6] L. De Oro Arenas, G. de Azevedo e Melo, C. A. Canesin, “A Methodology for Power Quantities Calculation Applied to an FPGA-Based Smart-Energy Meter”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–11, 2021, doi:10.1109/TIM.2020.3034978.
- [7] A. P. Coelho, “Projeto de um sistema para medição de consumo e análise da qualidade da energia elétrica para sistemas monofásicos”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, 2020.
- [8] L. A. Aguirre, *Fundamentos de instrumentação, capítulos 3 e 4*, Pearson Education do Brasil, 2013.
- [9] P. D. da Silva, L. J. da Rocha, Y. M. Scheuer, “Medidor de energia inteligente: Aplicação em um gradador de potência”, Apresentação em evento científico, Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul do Catarinense, 2020.
- [10] P. D. da Silva, L. J. da Rocha, Y. M. Scheuer, “Circuito medidor de corrente elétrica RMS para aplicação em medidores de energia elétrica”, Apresentação em evento

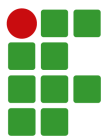


- científico, Seminário de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação (SEPEI), 2019.
- [11] M. Rigoni, *Desenvolvimento e aplicações de sensores de campo magnético por indução*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [12] J. P. Coelho, “Técnicas de condicionamento de sinal”, Apresentação de aula, Instituto Politécnico de Bragança, 2006.
- [13] M. Wendling, “Amplificadores operacionais”, Apresentação em aula, Universidade Estadual Paulista, 2010.
- [14] F. L. R. Mussoi, “Resposta em frequência, filtros passivos”, Apresentação em aula, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2004.
- [15] P. P. Machado, T. P. Abud, M. Z. Fortes, B. S. M. C. Borba, “Power factor metering system using Arduino”, in *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pp. 1–6, 2017, doi:10.1109/PEPQA.2017.7981633.
- [16] M. J. Mella, *Medidor de energia elétrica por eventos*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.
- [17] A. Albertazzi, A. R. de Souza, *Fundamentos da metrologia científica e industrial*, Manole, 2008.
- [18] J. Jiang, L. Yu, “Design of a New Three-Phase Multi-rate Watt-Hour Meter Based on AT89S52”, in *2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design*, vol. 1, pp. 416–419, 2009, doi:10.1109/ISCI D.2009.112.
- [19] C. McNally, *Arduino based wireless power meter*, Dissertação de Mestrado, Cornell University, 2010.
- [20] H. K. Patel, T. Mody, A. Goyal, “Arduino Based Smart Energy Meter using GSM”, in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, pp. 1–6, 2019, doi:10.1109/IoT-SIU.2019.8777490.
- [21] S. Chaudhari, P. Rathod, A. Shaikh, D. Vora, J. Ahir, “Smart energy meter using Arduino and GSM”, in *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, pp. 598–601, 2017, doi:10.1109/ICEI.2017.8300772.
- [22] PRODIST, “Qualidade do fornecimento de energia elétrica”, Resolução normativa, 2021.



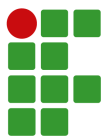
APÊNDICE A - PLATAFORMA DE EXIBIÇÃO DAS INDICAÇÕES DO MEDIDOR





APÊNDICE B - PLANILHA DE CÁLCULOS DA POTÊNCIA ATIVA

	VVC	Tendência	Correção	Erro aleatório	Erro aleatório ao quadrado	Graus de liberdade	Incerteza padrão	Coefficiente de student	Repetitividade
1405,67	1442	-34,7158	34,7158	-1,6142	2,6056	49	11,32152602	2,051	23,22044986
1393,93				-13,3542	178,3347				
1397,41				-9,8742	97,4998				
1411,05				3,7658	14,1812				
1390,75				-16,5342	273,3798				
1411,29				4,0058	16,0464				
1431,26				23,9758	574,8390				
1414,85				7,5658	57,2413				
1401,85				-5,4342	29,5305				
1392,99				-14,2942	204,3242				
1394,64				-12,6442	159,8758				
1394,76				-12,5242	156,8556				
1391,42				-15,8642	251,6728				
1407,06				-0,2242	0,0503				
1410,1				2,8158	7,9287				
1408,98				1,6958	2,8757				
1407,83				0,5458	0,2979				
1410,69				3,4058	11,5995				
1410,93				3,6458	13,2919				
1427,74				20,4558	418,4398				
1429,44				22,1558	490,8795				
1411,05				3,7658	14,1812				
1416,5				9,2158	84,9310				
1431,02				23,7358	563,3882				
1410,74				3,4558	11,9426				
1413,65				6,3658	40,5234				
1410,66				3,3758	11,3960				
1394,17				-13,1142	171,9822				
1395,7				-11,5842	134,1937				
1405,63				-1,6542	2,7364				
1396,98				-10,3042	106,1765				
1406,39				-0,8942	0,7996				
1393,93				-13,3542	178,3347				
1430,65				23,3658	545,9606				
1393,93				-13,3542	178,3347				
1412,22				4,9358	24,3621				
1394,88				-12,4042	153,8642				
1410,45				3,1658	10,0223				
1412,73				5,4458	29,6567				
1419,83				12,5458	157,3971				
1408,06				0,7758	0,6019				
1411,41				4,1258	17,0222				
1388,69				-18,5942	345,7443				
1394,17				-13,1142	171,9822				
1394,05				-13,2342	175,1440				
1406,03				-1,2542	1,5730				
1413,65				6,3658	40,5234				
1413,77				6,4858	42,0656				
1412,7				5,4158	29,3309				
1415,93				8,6458	74,7499				



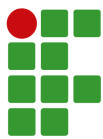
APÊNDICE C - PLANILHA DE CÁLCULOS DA POTÊNCIA REATIVA

	VVC	Tendência	Correção	Erro aleatório	Erro aleatório ao quadrado	Graus de liberdade	Incerteza padrão	Coefficiente de student	Repetitividade
1307,56	1300	-10,3754	10,3754	17,9354	321,6786	49	15,2805145	2,051	31,34033523
1297,62				7,9954	63,9264				
1303,3				13,6754	187,0166				
1305,81				16,1854	261,9672				
1308,96				19,3354	373,8577				
1309,1				19,4754	379,2912				
1305,71				16,0854	258,7401				
1310,35				20,7254	429,5422				
1305,46				15,8354	250,7599				
1291,36				1,7354	3,0116				
1286,28				-3,3446	11,1863				
1283,67				-5,9546	35,4573				
1269,74				-19,8846	395,3973				
1268,02				-21,6046	466,7587				
1268,5				-21,1246	446,2487				
1288,91				-0,7146	0,5107				
1291,77				2,1454	4,6027				
1288,93				-0,6946	0,4825				
1296,63				7,0054	49,0756				
1307,2				17,5754	308,8947				
1310,6				20,9754	439,9674				
1309,98				20,3554	414,3423				
1308,97				19,3454	374,2445				
1307,47				17,8454	318,4583				
1303,44				13,8154	190,8653				
1304,19				14,5654	212,1509				
1295,14				5,5154	30,4196				
1287,89				-1,7346	3,0088				
1289,55				-0,0746	0,0056				
1286,82				-2,8046	7,8658				
1281,04				-8,5846	73,6954				
1287,58				-2,0446	4,1804				
1277,55				-12,0746	145,7960				
1267,54				-22,0846	487,7296				
1267,78				-21,8446	477,1865				
1268,5				-21,1246	446,2487				
1275,96				-13,6646	186,7213				
1285,4				-4,2246	17,8472				
1289,17				-0,4546	0,2067				
1297,5				7,8754	62,0219				
1306,71				17,0854	291,9109				
1298,67				9,0454	81,8193				
1284,49				-5,1346	26,3641				
1288,07				-1,5546	2,4168				
1268,63				-20,9946	440,7732				
1265,72				-23,9046	571,4299				
1266,33				-23,2946	542,6384				
1267,05				-22,5746	509,6126				
1267,42				-22,2046	493,0443				
1271,19				-18,4346	339,8345				



APÊNDICE D - PLANILHA DE CÁLCULOS DA POTÊNCIA APARENTE

	VVC	Tendência	Correção	Erro aleatório	Erro aleatório ao quadrado	Graus de liberdade	Incerteza padrão	Coefficiente de student	Repetitividade
1959,8	1976	-32,3628	32,3628	16,1628	261,2361	49	12,30708889	2,051	25,24183931
1931,59				-12,0472	145,1350				
1960,13				16,4928	272,0125				
1960,63				16,9928	288,7553				
1938,15				-5,4872	30,1094				
1920,34				-23,2972	542,7595				
1934,71				-8,9272	79,6949				
1937				-6,6372	44,0524				
1937,17				-6,4672	41,8247				
1932,52				-11,1172	123,5921				
1954,24				10,6028	112,4194				
1958,47				14,8328	220,0120				
1930,12				-13,5172	182,7147				
1955,31				11,6728	136,2543				
1959,3				15,6628	245,3233				
1959,63				15,9928	255,7697				
1955,81				12,1728	148,1771				
1958,14				14,5028	210,3312				
1959,8				16,1628	261,2361				
1940,41				-3,2272	10,4148				
1960,29				16,6528	277,3157				
1932,52				-11,1172	123,5921				
1936,51				-7,1272	50,7970				
1932,41				-11,2272	126,0500				
1936,35				-7,2872	53,1033				
1938,48				-5,1572	26,5967				
1925,52				-18,1172	328,2329				
1940,25				-3,3872	11,4731				
1953,32				9,6828	93,7566				
1936,02				-7,6172	58,0217				
1959,8				16,1628	261,2361				
1936,02				-7,6172	58,0217				
1934,54				-9,0972	82,7590				
1937,33				-6,3072	39,7808				
1958,97				15,3328	235,0948				
1962,12				18,4828	341,6139				
1944,97				1,3328	1,7764				
1955,65				12,0128	144,3074				
1960,29				16,6528	277,3157				
1955,9				12,2628	150,3763				
1936,35				-7,2872	53,1033				
1936,18				-7,4572	55,6098				
1926,06				-17,5772	308,9580				
1936,51				-7,1272	50,7970				
1936,68				-6,9572	48,4026				
1935,2				-8,4372	71,1863				
1939,63				-4,0072	16,0577				
1929,89				-13,7472	188,9855				
1928,97				-14,6672	215,1268				
1935,86				-7,7772	60,4848				



APÊNDICE F - PLANILHA DE CÁLCULOS DA TENSÃO

	VVC	Tendência	Correção	Erro aleatório	Erro aleatório ao quadrado	Graus de liberdade	Incerteza padrão	Coefficiente de student	Repetitividade
230,48	231	-0,5012	0,5012	-0,0188	0,0004	49	0,90922178	2,051	1,86481387
229,48				-1,0188	1,0380				
229,48				-1,0188	1,0380				
231,26				0,7612	0,5794				
230,62				0,1212	0,0147				
230,16				-0,3388	0,1148				
230,94				0,4412	0,1947				
230,48				-0,0188	0,0004				
230,64				0,1412	0,0199				
230,86				0,3612	0,1305				
229,62				-0,8788	0,7723				
229,44				-1,0588	1,1211				
230,72				0,2212	0,0489				
232,42				1,9212	3,6910				
231,12				0,6212	0,3859				
231,72				1,2212	1,4913				
231,06				0,5612	0,3149				
229,88				-0,6188	0,3829				
231				0,5012	0,2512				
229,98				-0,5188	0,2692				
230,14				-0,3588	0,1287				
230,88				0,3812	0,1453				
229,4				-1,0988	1,2074				
229,26				-1,2388	1,5346				
229,42				-1,0788	1,1638				
232,52				2,0212	4,0852				
231,58				1,0812	1,1690				
230,64				0,1412	0,0199				
230,72				0,2212	0,0489				
231,14				0,6412	0,4111				
230,16				-0,3388	0,1148				
230,08				-0,4188	0,1754				
229				-1,4988	2,2464				
230,42				-0,0788	0,0062				
229,5				-0,9988	0,9976				
231,96				1,4612	2,1351				
231,98				1,4812	2,1940				
230,6				0,1012	0,0102				
229,64				-0,8588	0,7375				
229,52				-0,9788	0,9580				
230,96				0,4612	0,2127				
230,36				-0,1388	0,0193				
229,54				-0,9588	0,9193				
230,42				-0,0788	0,0062				
229,4				-1,0988	1,2074				
228,94				-1,5588	2,4299				
230,32				-0,1788	0,0320				
231,54				1,0412	1,0841				
231,68				1,1812	1,3952				
231,86				1,3612	1,8529				



APÊNDICE G - PLANILHA DE CÁLCULOS DO FATOR DE POTÊNCIA

	VVC	Tendência	Correção	Erro aleatório	Erro aleatório ao quadrado	Graus de liberdade	Incerteza padrão	Coefficiente de student	Repetitividade
0,72	0,75	-0,0246	0,0246	-0,0054	0,0000	49	0,024678339	2,051	0,050615273
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,89				0,1646	0,0271				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,71				-0,0154	0,0002				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,73				0,0046	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,72				-0,0054	0,0000				
0,71				-0,0154	0,0002				
0,75				0,0246	0,0006				
0,71				-0,0154	0,0002				
0,71				-0,0154	0,0002				



ANEXO I - DISTRIBUIÇÃO "t" DE STUDENT

NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (Inverso do nível de confiança)				
gl	0,20 (20%)	0,10 (10%)	0,05 (5%)	0,01 (1%)
1	3,0777	6,3137	12,7062	63,6559
2	1,8856	2,9200	4,3027	9,9250
3	1,6377	2,3534	3,1824	5,8408
4	1,5332	2,1318	2,7765	4,6041
5	1,4759	2,0150	2,5706	4,0321
6	1,4398	1,9432	2,4469	3,7074
7	1,4149	1,8946	2,3646	3,4995
8	1,3968	1,8595	2,3060	3,3554
9	1,3830	1,8331	2,2622	3,2498
10	1,3722	1,8125	2,2281	3,1693
11	1,3634	1,7952	2,2010	3,1058
12	1,3562	1,7823	2,1788	3,0545
13	1,3502	1,7709	2,1604	3,0123
14	1,3450	1,7613	2,1448	2,9768
15	1,3406	1,7531	2,1315	2,9467
16	1,3368	1,7459	2,1199	2,9208
17	1,3334	1,7396	2,1098	2,8982
18	1,3304	1,7341	2,1009	2,8784
19	1,3277	1,7291	2,0930	2,8609
20	1,3253	1,7247	2,0860	2,8453
21	1,3232	1,7207	2,0796	2,8314
22	1,3212	1,7171	2,0739	2,8188
23	1,3195	1,7139	2,0687	2,8073
24	1,3178	1,7109	2,0639	2,7970
25	1,3163	1,7081	2,0595	2,7874
26	1,3150	1,7056	2,0555	2,7787
27	1,3137	1,7033	2,0518	2,7707
28	1,3125	1,7011	2,0484	2,7633
29	1,3114	1,6991	2,0452	2,7564
30	1,3104	1,6973	2,0423	2,7500
35	1,3062	1,6896	2,0301	2,7238
40	1,3031	1,6839	2,0211	2,7045
45	1,3007	1,6794	2,0141	2,6896
50	1,2987	1,6759	2,0086	2,6778
60	1,2958	1,6706	2,0003	2,6603
70	1,2938	1,6669	1,9944	2,6479
80	1,2922	1,6641	1,9901	2,6387
90	1,2910	1,6620	1,9867	2,6316
100	1,2901	1,6602	1,9840	2,6259
1000	1,2824	1,6464	1,9623	2,5807
z	1,282	1,645	1,960	2,576