

Proposta de medidor inteligente para consumo e qualidade de energia

Giuliano G. Motter* Maria Bernadete de M. França**

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Londrina (mottergiuliano@gmail.com)*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, PR (e-mail: mbmorais@uel.br)*

Abstract: The Brazilian electrical energy system exists as we know it for years. Modernizations in this field have been carried out at a slow pace. The integration of electrical networks with new technologies such as the Internet of Things or cloud computing presents several opportunities for improvement and has occurring more recently, mainly in developed countries. In these cases, the electric grid sector has been adapting to the new reality of an agile and transparent service provision and also preparing for the increasing participation of distributed generation and an increase in the number of electric vehicles. In this paper, an evaluation is made about the benefits of integrating new technologies in the electricity grid, more specifically in energy consumption meters. The article presents the ongoing development of a smart meter prototype equipped with high-range two-way radio communication and the acquisition capability of more than 30 parameters of energy quality and consumption, which enables in-depth analyzes of the electrical network. With the developed prototype it is possible to measure electricity in the four quadrants, remote shutdown / restart of consumer units, in addition to the identification of thefts or violations of the facilities..

Resumo: O sistema de energia elétrica Brasileiro existe da forma como o conhecemos há anos. Modernizações neste setor tem sido feitas em um ritmo lento. A integração das redes elétricas com novas tecnologias tal como internet das coisas ou computação em nuvem apresenta diversas oportunidades de melhoria e vem ocorrendo recentemente de maneira gradual principalmente em países desenvolvidos. Nesses casos o setor elétrico vem se adequando com a nova realidade de uma prestação de serviços ágil e transparente e também se preparando para a crescente participação da geração distribuída e aumento no número de veículos elétricos. Neste trabalho é feita uma avaliação dos benefícios da integração de novas tecnologias na rede elétrica, mais especificamente nos medidores de consumo energético. O trabalho apresenta o processo de desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente com comunicação de rádio frequência bidirecional de alto alcance e aquisição de mais de 30 parâmetros de qualidade e consumo de energia, o qual possibilitará profundas análises da rede elétrica. Com o protótipo desenvolvido será possível fazer medidas de energia elétrica nos quatro quadrantes, o desligamento/religamento remoto de unidades consumidoras, além da identificação de furtos ou violações das instalações.

Keywords: Smart Meters; Smart Grids; Power Quality; Internet of Things; Advanced Metering Infrastructure;

Palavras-chaves: Medidores Inteligentes; Redes Elétricas Inteligentes; Qualidade de Energia; Internet das Coisas; Infraestrutura de Medição Avançada;

1. INTRODUÇÃO

Podemos descrever uma rede elétrica como um sistema composto por diversas entidades. Analisando desde a geração da energia até os consumidores, existem várias partes interessadas, tais como empresas proprietárias de usinas, concessionárias de energia, grupos de pesquisa e desenvolvimento, prestadores de serviços, empreiteiras e consumidores. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado e bastante conhecido que descreve uma rede elétrica tradicional, na forma como a conhecemos hoje. Nesse caso, o funcionamento da rede se dá de maneira claramente unidirecional, no sentido da geração, até o consumo.

A forma como a rede elétrica está representada na Figura 1 é como acontece na grande maioria das instalações de rede elétricas no Brasil atualmente. Neste caso, a maioria dos serviços ou interações entre consumidor e prestador de serviços (até mesmo as mais simples) não é automatizada e implica no deslocamento de equipes para resolução de problemas ou conferência presencial, fora outras situações nas quais a adesão de novas tecnologias geraria muitos ganhos. Pode-se dizer que embora muitos avanços tecnológicos já tenham ocorrido na forma como a energia é gerada e levada até o consumidor final, as mudanças da área parecem não acompanhar algumas tendências de outros setores na adesão de novas tecnologias tais como

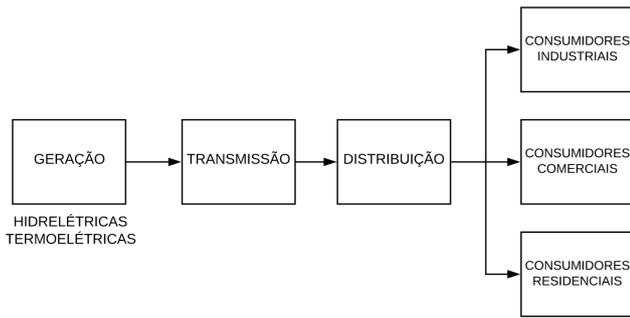


Figura 1. Esquema simples da rede elétrica tradicional.

internet das coisas, computação em nuvem ou aprendizado de máquina. Isso acontece principalmente pela velocidade com a qual essas novas tecnologias surgem, mas também devido a resistência à mudança por parte das grandes empresas do setor elétrico, devido ao alto custo envolvido na adesão de novas tecnologias em um sistema tão grande e complexo quanto a rede elétrica. Essa situação passa a impressão de que este é um setor estagnado e que há décadas não passa por nenhuma mudança na forma como opera.

Uma rede elétrica inteligente (do inglês, *Smart Grid*, ou SG) pode ser considerada como o próximo estágio no ciclo evolutivo das redes elétricas. A Figura 2 apresenta um esquema simplificado de uma rede elétrica inteligente. Nesse caso, temos um fluxo de potência descentralizado e começa-se a integrar tecnologias de comunicação a todos os elementos que compõe a rede elétrica. No caso da Figura 2, as linhas contínuas representam conexões de tecnologias de comunicação, enquanto que as linhas tracejadas representam o tráfego de energia elétrica. Uma definição mais precisa diz que uma rede inteligente deve gerar e transmitir energia enquanto monitora de maneira segura o maior número possível de processos e ativos envolvidos, tendo como principal objetivo fornecer energia de alta qualidade para os consumidores finais Colak (2016). O que a Figura 2 não evidencia, porém, são as diversas tecnologias envolvidas que tornam possível essa nova arquitetura de rede e que a caracterizam de fato como uma rede “SMART”, conforme evidenciado na Figura em questão. Essas novas tecnologias de comunicação e medição de grandezas podem e vem sendo adotadas recorrentemente em todo o ciclo de vida da energia elétrica (desde a geração até o consumo) para automatizar ou tornar mais eficientes diversos processos Kalalas and Thrybom (2016).

Em uma rede elétrica inteligente existem diversos tipos de dispositivos de monitoramento e atuadores com funções tais quais: instrumentar ativos para monitoramento, acompanhamento de geração, consumo e perdas, monitoramento para manutenção preventiva, proteção elétrica, faturamento da energia, religamento automático de trechos da rede, entre outros. O trabalho de Moghe and Iyer (2014), por exemplo, apresenta o desenvolvimento de um sensor de tensão de baixo custo para baixa e média tensão, com aplicação de monitoramento de cabos, condutores, bancos de capacitores e transformadores. Embora o sensor desenvolvido neste caso seja de custo relativamente baixo, apresentou erro muito elevado nas medidas.

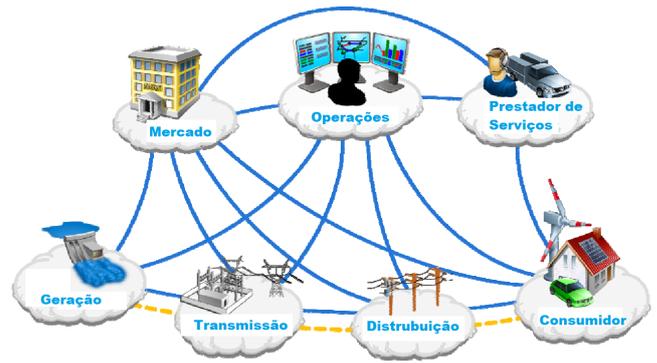


Figura 2. Esquema simples da rede elétrica inteligente.

Outro componente que vem se tornando comum no contexto da SG são as “Molas Elétricas” do inglês *Electric Spring*, ou ES). Uma ES é um circuito utilizado para fornecer tensão e potência constante para uma carga que esteja sendo alimentada por uma fonte de energia renovável/inconstante. O trabalho de Solanki and Joshi (2016) mostra que uma ES também pode ser usada para reduzir problemas de qualidade da energia elétrica tais como baixas tensões, desbalanceamento entre fases e redução de harmônicas.

Em Faria and Lima (2018) uma unidade multi-sensor é proposta para supervisionar vários parâmetros importantes relacionados com a performance operacional de transformadores em sistemas de distribuição. O sistema conta com sensor de temperatura, sensor ultrassônico para recepção de ruídos na faixa de 40 kHz (gerados por faíscas elétricas) e microfone para avaliação do ruídos audíveis. O dispositivo também conta com comunicação sem fio *Bluetooth Low Energy*.

Além dos benefícios diretos, esse tipo de dispositivo inteligente pode ser utilizado pelas prestadoras de serviço para tornar a sua operação mais eficiente, agregando valor e aumentando lucros indiretamente. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de dispositivo inteligente para o setor da distribuição da energia elétrica, próximos ao consumidor final, mais especificamente, um Medidor Inteligente de Energia (do inglês: *Smart Meter*, ou SM).

As concessionárias de energia são os prestadores de serviço que estão em contato direto com os consumidores finais, portanto é muito importante para essas empresas agregar valor ao seus serviços para agradar e fidelizar os clientes. Isso pode ser alcançado aumentando a transparência do serviço prestado ou modernizando o serviço e canais de comunicação com o cliente. O uso de SMS está intimamente relacionado a esses passos que mais cedo ou mais tarde terão que ser dados pelas concessionárias. A crescente exigência dos clientes quanto à qualidade dos serviços de energia está relacionada ao constante aumento no consumo energético ao redor do mundo. Hoje em dia existem diversos parâmetros utilizados para mensurar a qualidade da energia elétrica. Para a grande maioria dos consumidores, porém, são mantidos registros apenas dos períodos de interrupção no serviço e fator de potência da instalação. De acordo com Peng and Ziheng (2015), a tendência é o aumento no número de consumidores sensíveis à qualidade da energia fornecida. Instalações tais como

indústrias, centrais de bancos de dados ou *clusters* podem sofrer grandes prejuízos com a interrupção do serviço ou danificação de equipamentos elétricos. Hospitais também podem ser classificados no grupo de consumidores sensíveis à qualidade da energia, devido à presença de equipamentos que podem operar indevidamente caso existam imperfeições na sua alimentação elétrica, colocando vidas em risco.

A baixa qualidade da energia pode levar à uma operação de baixa eficiência do sistema elétrico e pode acarretar em perdas como a má-operação dos controles remotos por parte das operadoras das redes, o super aquecimento de cabos (causado devido a circulação de correntes harmônicas na linha de neutro), o aumento das perdas Foucault nos transformadores, a operação indevida de dispositivos de proteção ou erros nas medições de consumo energético Kazibwe (1990).

Este trabalho visa avaliar de maneira quantitativa e também qualitativa os ganhos que podem ser obtidos a partir da implementação de novas tecnologias nos medidores de energia elétrica, e o valor que pode ser extraído da sua aplicação em cenários residenciais e industriais Brasileiros. As novas tecnologias em questão se tratam de conceitos de Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things*, ou IoT) e novos métodos de medição dos parâmetros da rede.

2. MEDIDORES INTELIGENTES

Em conjunto com tecnologias de telecomunicações, os Medidores Inteligentes são os principais agentes que possibilitam a implantação de uma SG. Desde em torno de 2009, época na qual iniciou-se a busca por uma rede elétrica mais inteligente, os SM já tiveram muita evolução. No início se tratavam apenas de medidores eletrônicos, porém ainda sem tecnologias de comunicação. Após isso, passaram para medidores eletrônicos com leituras automatizadas e atualmente fala-se de uma comunicação bidirecional e maior quantidade de processamento local de dados Martirano and Manganeli (2015).

O conceito de medidores inteligentes ainda é pouco explorado, quer dizer, não se consideram as suas diversas aplicações e todo o seu potencial de gerar maior segurança, economia e integração da rede elétrica. Atualmente os medidores inteligentes ainda são encarados como uma simples automatização do processo de faturamento da energia elétrica. Poucos medidores abordam questões como a comunicação bidirecional ou parâmetros mais aprofundados de qualidade da energia.

No trabalho Labib and Billah (2017) foi desenvolvido um medidor de energia monofásico com gerenciamento de carga. O sistema conta com comunicação celular e embora tenha como principal funcionalidade a cobrança da conta de energia, também apresenta medição de fator de potência e a detecção de furto. O controle de carga é feito através de relés, cortando ou religando a energia do consumidor.

O trabalho Stusek and Pokorny (2017) apresenta o desenvolvimento de um medidor de energia elétrica trifásico simples com transformador de corrente e conexão à internet, além de um sistema gráfico para interface com o usuário. O dispositivo tem a desvantagem de medir apenas a corrente e considera o valor de tensão constante para cálculo da energia consumida, além de utilizar um conversor analó-

gico digital que introduz certo nível de ruído nas leituras. Além disso, não conta com comunicação bidirecional.

O medidor inteligente desenvolvido em Arote and Mulay (2016) toma valores de tensão e corrente e a partir disso fornece dados de potência ativa, reativa, fator de potência e consumo para uma carga trifásica. Além disso, o medidor conta com um módulo GSM, que permite o envio de mensagens SMS para o usuário a respeito da energia consumida e fatura de energia. Porém essa comunicação não é bidirecional, o que anula possibilidades de corte/religamento remoto da energia, além de atualizações de parâmetros *Over the Air*.

O trabalho Dai and Wang (2018) apresenta o desenvolvimento de um medidor de energia harmônica e discute sobre os ganhos da sua aplicação em uma SG. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios quanto a quantidade de parâmetros medidos e precisão das medidas, porém o protótipo não dispõe de funcionalidades importantes tal como comunicação bidirecional, desligamento/religamento da unidade consumidora ou detecção de furtos e adulteração.

Em Morello and Capua (2017) é prototipado um medidor eletrônico de consumo e qualidade da energia elétrica além de ser apresentada uma discussão a respeito do papel de sistemas de medição avançada em SGs. O medidor desenvolvido conta com comunicação bidirecional, processamento e tomada de decisões locais, medição de uma grande gama de parâmetros e com boa precisão (erro máximo de 3%) mas não possibilita ligação e religação remota, devido a característica de medição não invasiva.

O medidor comercial OpenWay Centron, da empresa Itron apresenta uma solução interessante. Conta com comunicação de rádio frequência bidirecional na faixa de frequência de 2,4 GHz, medição de energia nos 2 sentidos, potências ativa e reativa e também tempo de uso. A memória do dispositivo tem capacidade de armazenar dados de até 1 ano de medidas. É possível a configuração de 8 diferentes intervalo de leituras e a ligação e religação automática remota. Porém, este medidor apresenta uma indiferença quanto à qualidade da energia, não medindo nenhum indicador.

A empresa ELSTER tem o medidor inteligente comercial A3 Alpha, que conta com comunicação bidirecional Sub-Giga Hertz, medição de energia e tempo de uso. Este medidor não apresenta aquisição de nenhum indicador de qualidade de energia.

A empresa Landis+Gyr é um dos líderes mundiais no setor de medidores inteligentes. O modelo E450 já apresenta uma solução bastante madura. Este dispositivo realiza medições de consumo, demanda ativa e reativa em diferentes postos horários (horários do dia cujas tarifas tem valores diferentes). Os medidores apresentam memória de massa com capacidade de armazenamento de até 45 dias de leituras. O intervalo das leituras pode ser configurado para 5, 15, 30 ou 60 minutos. Apresenta um relé de carga para ligamento/desligamento, LEDs frontais para calibração e comunicação bidirecional de rádio frequência, com topologia *Mesh*. Esse medidor, porém, não realiza medições de distorção total de harmônicas (do inglês *Total Harmonic Distortion*, ou THD) da rede elétrica, que são parâmetros

importantes conforme busca-se maior transparência na rede elétrica moderna.

As empresas fabricantes dos medidores comerciais analisados acima normalmente apresentam, além dos SMs em si, outros serviços e produtos para o gerenciamento das redes de comunicação formada pelos medidores inteligentes, possibilitando a implementação completa de toda uma infraestrutura de medição.

3. DESCRIÇÃO DO MEDIDOR PROPOSTO

A partir da problemática apresentada e de todas as oportunidades de melhoria identificadas, propõe-se um medidor inteligente de forma a atender da melhor maneira possível os requisitos, ou seja, um sistema que traduza a rede elétrica com alta transparência, através da medição de uma ampla variedade de parâmetros de consumo e qualidade da energia com precisão e exatidão. O medidor deve contar com um sistema de comunicação moderno bidirecional, de forma que possibilite realizar não somente medições, mas também a atuações remotas sobre a carga e também a possibilidade de integração com sistemas de controle e/ou portal de acesso do usuário. O medidor deve realizar medições de parâmetros básicos da rede elétrica (como corrente, tensão e frequência por fase) com intervalo de integração máximo de 1 segundo, enquanto que o intervalo para aquisição de parâmetros secundários (como THD+N ou taxas de potências harmônicas) pode ser configurada para ser feita de forma mais esporádica (uma vez a cada 5 segundos, por exemplo).

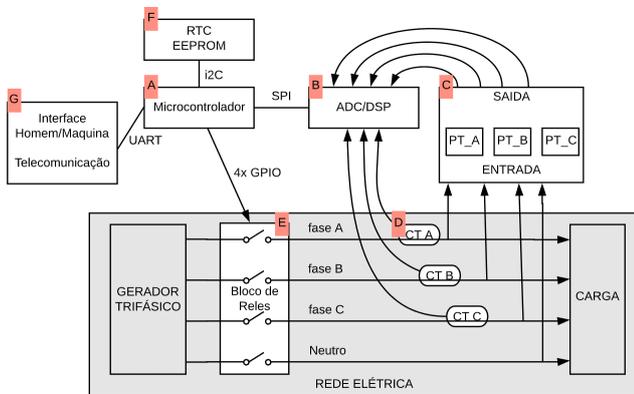


Figura 3. Diagrama de blocos do protótipo.

A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos simplificado representando o medidor proposto e uma rede elétrica trifásica. Nessa Figura é possível observar que o medidor é composto por 7 elementos principais, sendo eles:

- Bloco A: Microcontrolador;
- Bloco B: Circuito integrado de aquisição de dados;
- Bloco C: Circuito de aquisição de tensão;
- Bloco D: Circuitos de aquisição de corrente;
- Bloco E: Relés para conexão/desconexão;
- Bloco F: Circuitos integrados auxiliares;
- Bloco G: Interface e comunicação;

A seguir será dada uma descrição mais aprofundada dos principais elementos que compõe o medidor inteligente proposto, apresentando e justificando os métodos escolhidos

para cada elemento do sistema, bem como os desenvolvimentos que já foram feitos até então.

3.1 Microcontrolador e Aquisição de Dados

Levando em consideração que o circuito será aplicado em um sistema elétrico trifásico à 4 fios (do inglês *3-phase 4-wire*, ou 3P4W) e deverá realizar medidas de tensão e de corrente, deve ser considerada a necessidade de 3 sensores de tensão (um para cada fase), 4 sensores de corrente (um para cada fase e um para o fio de neutro) além de um circuito de condicionamento para cada um dos sensores e então a rede elétrica estará completamente instrumentada, sendo que é inaceitável que esses circuitos de condicionamento insiram ruídos ou atrasos nos sinais originais. Essas condições tornam inviáveis o uso de abordagens mais simples, apenas com amplificadores operacionais, já que seriam necessários 7 circuitos independentes de condicionamento de sinais.

Além disso, deve-se considerar que é um requisito que o medidor forneça dados de qualidade de energia. Esses necessitam de análise dos sinais elétricos nos domínios do tempo e frequência e portanto exigem uma taxa de amostragem mais elevada e a implementação de um cálculo de transformada de Fourier. Caso fosse utilizado um sistema de instrumentação mais simplista, o microcontrolador seria responsável por realizar tanto a digitalização do sinal quanto os cálculos de transformada de Fourier. Isso oneraria demais a capacidade de processamento do microcontrolador, aumentaria consideravelmente a complexidade do *firmware* e também tornaria proibitivo o uso de um controlador de custo e/ou consumo energético reduzido. Essencialmente, para contornar essa situação, se faz necessária a utilização um processador digital de sinais (do inglês *Digital Signal Processing*, ou DSP).

Propõe-se, portanto a utilização de um circuito integrado (CI) dedicado à aquisição de dados da rede elétrica. Atualmente os principais fabricantes de semicondutores apresentam produtos que se propõe a atender exatamente estes requisitos e após uma branda revisão das possibilidades, o CI ATM90E36A, da fabricante Atmel, foi o escolhido. Este CI, da categoria dos *Analog Front End* (AFE), dispõe de 7 canais de ADC de 24 bits e frequência de amostragem de 8 kHz. Os dados digitalizados podem ser consumidos tanto de maneira pura pelo microcontrolador da aplicação via *Direct Memory Access* (DMA), quanto utilizados após terem sido pré-processados pelo DSP interno do CI, através de um protocolo *Serial Peripheral Interface*, ou SPI. Neste caso é possível aproveitar o processamento e inteligência embarcados no CI para obter informações além das básicas corrente e tensão. Pode-se destacar, por exemplo, potências e fator de potência por fase e totais, taxas harmônicas de corrente e tensão da 2ª até a 32ª ordem por fase e totais, distorção total das harmônicas, inversão de fases (adulteração), entre outros.

Em conjunto com a definição do CI de medição dedicado, foi optado pelo uso do microcontrolador STM32F407VG, devido a facilidade de acesso e familiaridade com o mesmo, além deste controlador cumprir com todos os pré requisitos quanto a quantidade de pinos, quantidade de protocolos de comunicação disponíveis, frequência de *clock* e memórias FLASH e RAM.

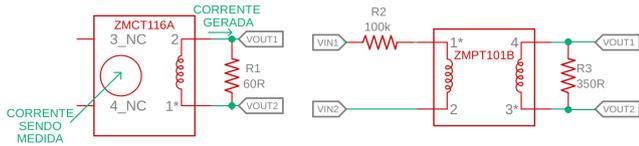


Figura 4. Esquemático dos circuitos de sensoriamento da corrente e de tensão.

É possível ver como estes elementos fazem parte da composição final do protótipo através da Figura 3, onde o microcontrolador e DPS estão representados com as etiquetas “A” e “B” respectivamente.

3.2 Sensores e Instrumentação

O uso do CI ATM90E36A atende os requisitos de projeto, porém o mesmo deve ser utilizado em conjunto com sensores de tensão e corrente os quais também apresentam requisitos de segurança e desempenho que devem ser levados em consideração. Atualmente, as principais opções para sensoriamento de corrente alternada são os transformadores de corrente (do inglês *Current Transformer*, ou CT), ou as bobinas de Rogowsky. Existe uma diferença de montagem entre os dois, enquanto o CT tem um núcleo ferro-magnético, a montagem da bobina consiste apenas do enrolamento de um fio “n” vezes. Outra diferença é o sinal de saída, que no CT é dada em uma corrente proporcional à corrente de entrada, enquanto que na bobina é uma tensão. Embora o CT seja um método de medição invasivo (temos que abrir o circuito para instalar o sensor) esta desvantagem pode ser relevada, tendo em mente que o medidor proposto neste trabalho parte da premissa da possibilidade de efetuar o ligamento e desligamento das cargas de maneira remota e portanto essa funcionalidade por si só implica na alteração da instalação elétrica local. Portanto cada fase da rede elétrica será, instrumentada com um CT ZMCT116A. Este CT apresenta uma relação de espiras de 2500:1, correntes nominais de entrada de 5 A e de saída de 2 mA, faixa linear de corrente de entrada de 0 a 70 A e será utilizado em conjunto com um simples circuito de condicionamento, utilizado para adequar o sinal de saída do CT aos níveis elétricos de operação do ATM90E36A, conforme apresentado na Figura 4.

Os dois métodos mais comuns para realizar a medição de tensão da rede elétrica são através do uso de amplificadores operacionais isolados, ou de transformadores de potencial (do inglês *Power Transformer*, ou PT), as vezes referenciado como sensor de tensão alternada. O transformador ZMPT101B foi o escolhido devido a sua popularidade, ou seja, facilidade de uso e de acesso. Este PT tem uma relação de espiras 1000:1000 e apresenta corrente de enrolamento primário e secundário máxima de 2 mA. Foi feito o uso de um sensor deste por fase, em conjunto com alguns resistores de forma a adequar os níveis máximos de corrente permitidos nos enrolamentos. O circuito de aplicação está representado na Figura 4. Na Figura 5, é possível observar como o circuito de sensoriamento de tensão atua, transformando um sistema trifásico com tensão de fase de 127 Vrms em um sistema trifásico proporcional, porém isolado eletricamente e com tensão de fase de 700 mVrms.

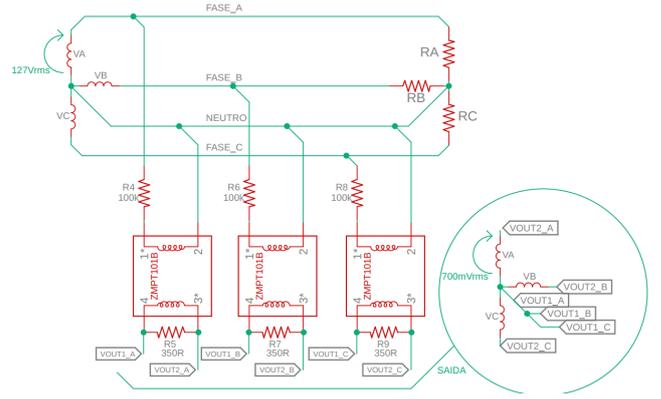


Figura 5. Diagrama do circuito de sensoriamento de tensão conectado à rede trifásica

Os valores de resistência e potência dos resistores apresentados na Figura 4 foram projetados a partir das equações características do transformador de corrente (Equação 1) e de tensão (Equação 2) e levando em conta os valores máximos de tensão diferencial nas entradas do CI de medição, os valores típicos de saída dos sensores e os valores de tensão da rede elétrica e de corrente máxima de projeto. Em um primeiro momento o valor máximo de corrente permitido por fase é de 10 A, porém este valor pode ser aumentado tranquilamente em um momento posterior do projeto. .

$$R1 = \frac{v_{outCT}(t) * N}{I_{in}(t)} = \frac{240mVrms * 2500}{10} = 60\Omega \quad (1)$$

$$R2 = \frac{V_{inMAXrede}}{I_{inMAXPT}} = \frac{127Vrms * \sqrt{2} * 10\%}{2mA} = 100k\Omega \quad (2)$$

$$P_{R1} = I_{out}^2 * R1 = 2^2mA * 180\Omega = 0,72mW$$

$$P_{R2} = \frac{V_{inMAXrede}^2}{R2} = \frac{200Vp^2}{100k} = 0,4W$$

$$R3 = \frac{V_{outMAXPT}}{I_{outMAXPT}} = \frac{700mVrms}{2mA} = 350\Omega$$

$$P_{R3} = I_{outMAXPT}^2 * R3 = 2mA^2 * 350 = 0,720mW$$

Pode ser observado na Figura 3 como os sensores de tensão e corrente são instalados em relação aos demais elementos do protótipo. Nesse caso, os sensores são representados pelas etiquetas “C” e “D”.

3.3 Tecnologia de Telecomunicação e Interface

No contexto de redes elétricas inteligentes, a tecnologia de telecomunicação de um medidor inteligente é um dos principais tópicos que podem tornar a implementação da rede como um todo viável ou não. No atual cenário de internet das coisas, com a grande oferta de tecnologias, protocolos e infraestruturas de comunicação distintas, alguns aspectos devem ser levados em consideração para escolher a melhor opção.

Primeiro, deve-se analisar as características e condições de operação de um medidor inteligente e isso não é algo

trivial, já que medidores de energia podem ser utilizados em uma ampla variedade de situações. O local de uso pode ser desde grandes cidades com alta densidade populacional até unidades consumidoras isoladas em uma área rural, por exemplo. As situações de aplicação vão desde instalações residenciais com baixa potência instalada, até indústrias com grande carga. Além disso, deve-se levar em conta aspectos como a quantidade de dados que será transmitida, o intervalo entre transmissões, latência máxima permitida entre envio e recepção dos dados, custos de implantação, arquitetura da rede e segurança.

Os medidores trafegam uma quantidade pequena de dados. Transmissões não devem passar de 50bytes de *payload* nos maiores casos, onde o pacote contenha dados de qualidade de energia. A latência não é um fator determinante, já que a comunicação não será utilizada para envio de dados sensíveis ou que exijam alta velocidade de resposta. De acordo com o item 8.1.1 da norma PRODIST (2008), para que a qualidade do produto seja assegurada, deve-se ter capacidade de realizar medidas subsequentes com intervalos mínimos de 3 minutos, portanto planeja-se que o protótipo possa ter o intervalo de transmissões de dados reconfiguráveis, com opções de uma transmissão a cada 3, 5, 10 ou 15 minutos.

Quanto à topologia da rede de comunicação, foi feito um estudo a respeito das possibilidades, desde topologias mais comuns, tal como a estrela, onde diversos dispositivos se comunicam com um dispositivo central, até topologias mais complexas como a rede *mesh*, onde existe uma horizontalidade hierárquica maior entre os dispositivos, ou seja, qualquer dispositivo consegue se comunicar com qualquer outro que esteja na mesma rede e dentro do seu alcance.

A revisão bibliográfica feita demonstrou que a maioria dos medidores inteligentes atualmente utilizam comunicação celular ou PLC (do inglês *Power Line Communication*) para realizar a transmissão dos dados. Já a rede GSM de comunicação (do inglês *Global System for Mobile Communications*) tem uma ótima cobertura e confiabilidade, e é amplamente utilizada há anos, porém como a aplicação em questão tem um tráfego pequeno de dados quando comparado a capacidade da rede GSM, é possível escolher uma tecnologia mais eficiente do que esta, com características mais adequadas de tráfego de dados, cobertura, latência e arquitetura.

Nos últimos anos tem surgido algumas tecnologias com a proposta de se tornarem “a rede GSM para os dispositivos de internet das coisas”. Redes LPWAN (do inglês *Low Power Wide Area Network*) tais como o Sigfox ou o LoraWan surgiram nesse intuito, onde se deseja um alto alcance, baixo consumo energético e taxa de dados reduzida. Essas duas tecnologias foram as principais candidatas durante o processo de definição da telecomunicação ideal para o medidor inteligente. O LoraWan se destacou devido à arquitetura de rede ser mais flexível, onde existe a possibilidade de enviar uma quantidade maior de mensagens durante o dia, tanto de *up-link* (no sentido dispositivo - servidor) quanto de *down-link* (no sentido servidor - dispositivo), enquanto que no Sigfox é possível apenas um máximo de 140 mensagens de *up-link* e 4 de *down-link* por dia. A rede LoraWAN opera na banda ISM

de 915 MHz e depende da expansão da rede de Estações rádio bases (ERBs) do prestador de serviços para aumento da cobertura da rede. Existe um custo atrelado ao uso desta tecnologia e é difícil fazer uma estimativa realista de valores pois são muito dependentes do volume de uso, porém os ganhos proporcionados pelo seu uso faz valer a pena a implementação. No trabalho *Voices of Experience - Leveraging AMI Networks and Data* (VOE (2019)) algumas empresas americanas do setor elétrico (tais como Holy Cross Energy, do Colorado, Ameren Illinois ou Sacramento Municipal Utility District), foram questionadas se a implantação de tecnologias de comunicação bidirecional valeram a pena, e a resposta dada por todas as empresas foi unânime. Eles dizem que embora exista a necessidade de reformular alguns processos internos, estrutura organizacional, desenvolver novas habilidades e integrar as novidades com sistemas e costumes antigos, o retorno veio, e portanto concluem que vale sim a pena o esforço para este tipo de mudança.

A rede LoraWAN também apresenta aspectos interessantes de segurança dos dados. O uso de autenticação e criptografia são, na verdade, elementos mandatórios durante o uso desta tecnologia. A criptografia está presente na operação em conjunto de duas chaves únicas de segurança com 128 bits, uma compartilhada apenas entre o dispositivo e o servidor da rede Lora e outra ponta a ponta, na camada de aplicação. Estas camadas nativas do protocolo, em conjunto com técnicas de embaralhamento de dados e checagem de integridade de dados no nível de aplicação, sugerem que um *link* seguro é formado entre dispositivo e servidor de dados.

Além da tecnologia de telecomunicação, o medidor contará com uma interface homem máquina através de uma porta de comunicação no padrão RS232, que poderá ser utilizada para conectar o medidor a um computador, fornecendo um terminal de acesso para configurações e leituras de parâmetros básicos, auxiliando nos processos de desenvolvimento, instalação e calibração do protótipo. Na Figura 3 as interfaces de comunicação aparecem destacadas com a etiqueta “G”.

3.4 Acionamentos e Elementos Extras

Finalmente, o protótipo conta com relés para possibilitar o ligamento e desligamento remoto de unidades consumidoras e também circuitos auxiliares de relógio e memória não volátil. O relógio de tempo real (do inglês *Real Time Clock*, ou RTC) terá o papel de manter a hora local mesmo em uma situação de falta de energia. Essa informação deve ser enviada no mesmo pacote que os dados da rede elétrica, possibilitando uma posterior análise sobre as condições da instalação elétrica no dados instantes de tempo. O RTC escolhido foi o PCF8563TD (da fabricante NXP), um relógio de tempo real e calendário otimizado para aplicações de baixo consumo energético.

Já o chip de memória escolhido é uma EEPROM (do inglês Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory) de 256kB (24FC256, da fabricante Microchip). Esta é uma memória não volátil, ou seja, mesmo que seja desenergizada em algum momento os dados serão retidos. A memória será utilizada para armazenamento dos dados aferidos pelo medidor, caso haja a impossibilidade de envio

destes dados à central, seja por uma desconexão ou outras falhas. Uma vez definido os dados que poderão ser de fato armazenados, será possível avaliar quanto tempo que o medidor poderá ficar sem comunicação, sem que haja a perda de dados.

4. RESULTADOS

4.1 Hardware

Com os sensores de corrente (CT) e de tensão (PT) em mãos, foram montados os circuitos presentes na Figura 4 para realização de testes de caracterização em bancada com os 2 sensores, afim de comparar os sinais de saída em relação aos sinais de entrada, verificando a presença de atenuações, atrasos, ruídos ou qualquer imperfeição que pudesse impossibilitar o uso dos mesmos. Em uma bancada, foi montada uma fonte regulável de tensão alternada (VARIAC) como fonte de entrada, um reostato como carga, osciloscópio com ponteira diferencial e multímetro como medidas de referência. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados dos testes de caracterização do sensor de tensão e de corrente, respectivamente. Nestas Figuras pode-se observar que não existe qualquer imperfeição relevante entre os sinais de entrada e saída. As diferenças de fase entre os sinais nunca passa de 0,7 graus e o único efeito observado é de fato a atenuação desejada.

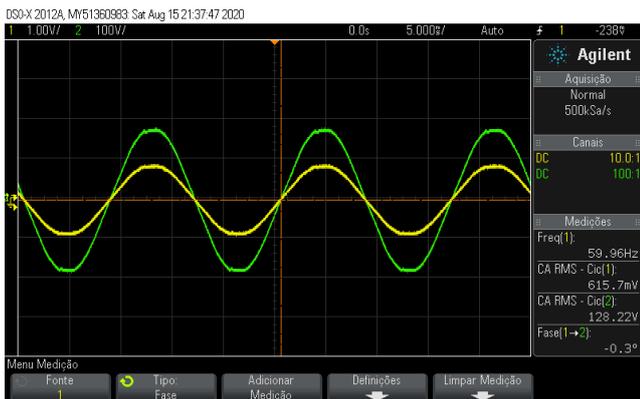


Figura 6. Sinais de entrada e de saída no circuito do transformador de Tensão.

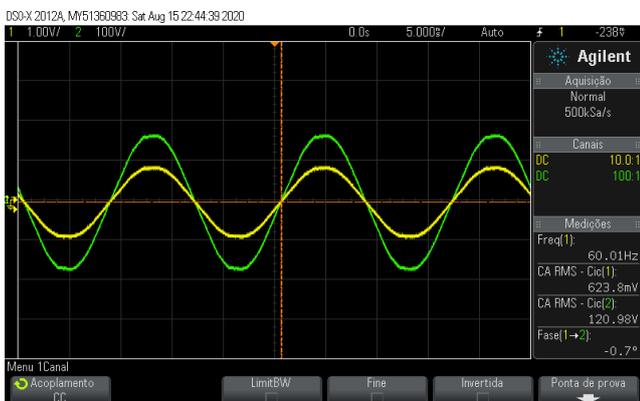


Figura 7. Sinais de entrada e de saída no circuito do transformador de Corrente.

Em um próximo momento, foi feita a montagem da placa com os sensores de tensão ZMPT101B conforme exposto

na Figura 5 e foi tomada uma medição dos seus sinais de saída. Os resultados são apresentados nas Figuras 8 e 9. É possível notar que ao unir todos os pinos de neutro dos sinais de saída, conseguimos de fato montar um sistema trifásico similar ao de entrada, porém isolado eletricamente e atenuado, com tensões eficazes em torno de 640 mV ao invés de 127 V, exatamente o comportamento desejado.

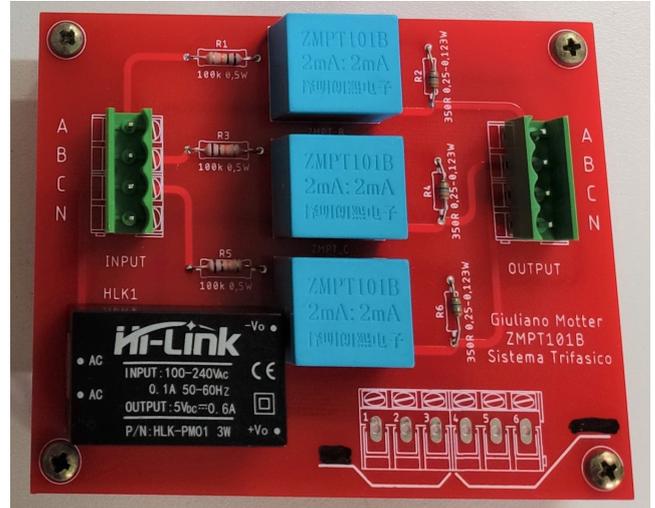


Figura 8. Placa de circuito impresso projetada e montada com os sensores de tensão.

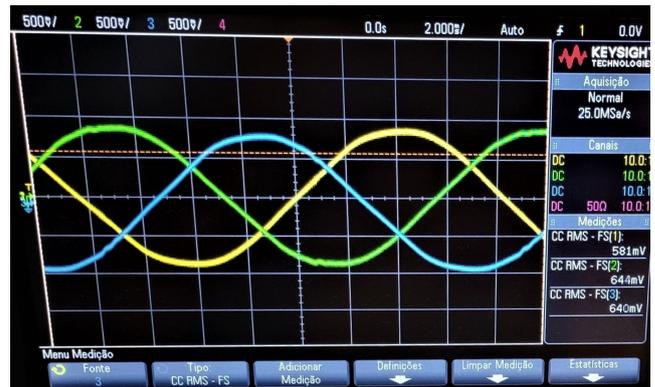


Figura 9. Sinais de saída na placa dos sensores de tensão.

Também foram montadas placas de circuito impresso para os sensores de corrente, conforme o circuito apresentado na Figura 4. Estas placas podem ser observadas na Figura 10. Foram montadas uma placa para cada fase, além de uma placa para o condutor de neutro.

Em seguida, foi desenvolvida uma placa para o ATM90E36A seguindo à risca o esquemático sugerido pelo fabricante. A Figura 11 apresenta esta placa.

Todas as placas foram montadas manualmente. Após terem seu funcionamento testado e validado individualmente, todas as placas foram integradas em uma bancada de teste com todos os elementos, de acordo com o apresentado do diagrama de blocos da Figura 3.

4.2 Firmware

O *firmware* está sendo desenvolvido em linguagem C, utilizando o compilador GCC e ambiente de desenvolvimento



Figura 10. Placa de circuito impresso projetada e montada para os sensores de corrente.

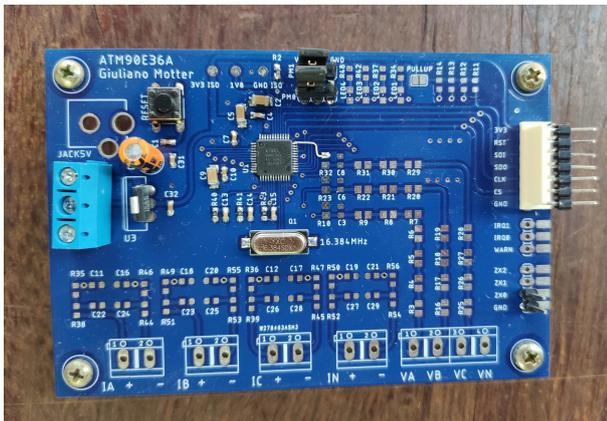


Figura 11. Placa de circuito impresso projetada e montada, utilizada para testes do circuito integrado ATM90E36A.

integrado (do inglês *Integrated Development Environment*, ou IDE) STM32CubeIDE da empresa ST Microelectronics. Esta IDE é relativamente nova, porém conta com todas as principais funcionalidades que uma IDE derivada do Eclipse também apresenta. Também vale dizer que esta IDE tem uma ferramenta de geração de código para configuração dos periféricos integrada e quando utilizada com um microcontrolador do mesmo fabricante (que é o caso) fornece alta produtividade, portabilidade e suporte durante a etapa de desenvolvimento.

A arquitetura de código implementada utiliza um sistema operacional de tempo real (do inglês *Real Time Operating System*, ou RTOS), o FreeRTOS, que é atualmente um dos RTOS mais comuns para sistemas embarcados, devido a sua ampla flexibilidade, poder de processamento e gratuidade. O sistema conta com 3 *Tasks*, uma específica para o ATM90E36A, uma para a RS232 e outra que controla os LEDs do kit de desenvolvimento do microcontrolador, chamadas *TaskATM*, *TaskUART* e *TaskLEDS* respectivamente.

A *TaskUART* fica a todo instante aberta para a recepção de comandos pela interface RS232. Existe uma gama de comandos possíveis pré definidos que podem ser utilizados para mudar o modo de operação do medidor e/ou solicitar leitura de parâmetros específicos. Ao receber um comando, a *TaskATM* dá um eco no terminal e envia um evento à *TaskATM*, que processará o evento, executará a ação específica e ao mudar de modo de operação, enviará um evento à *TaskLEDS*, para alterar o padrão de brilho dos LEDs da placa.

Os modos de operação da *TaskATM* são: Suspensão, Configuração, Calibração e Operação. Dentro de cada modo, existe uma máquina de estados específica, que executa as ações condizentes. Quando em Modo Suspensão, o medidor não executa nenhuma ação e fica esperando algum comando da *TaskUART*. Em Modo Configuração são feitas escritas nos registradores de configuração inicial, tal como níveis de ganho, limites de início de acumulação da energia, eventos que podem gerar interrupção, etc. O Modo de Calibração apenas deverá ser executado quando o medidor estiver instalado na rede elétrica. É nesse momento onde o medidor fará uma série de leituras de corrente e tensão da rede para se auto-calibrar. Finalmente, o Modo Operação, que é quando o microcontrolador executará leituras dos parâmetros da rede e enviará eventos de volta para a *TaskUART*, a qual imprime os valores já formatados no terminal do usuário.

Assim como a *TaskATM* envia os dados de consumo e qualidade de energia para a *TaskUART*, envia também para uma *task* que será implementada nos próximos passos de desenvolvimento, a *TaskLORA*, que terá o papel de montar um pacote de envio LORA contendo os dados de energia e de número de série do medidor específico.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma proposta de um medidor inteligente para consumo e qualidade de energia, dentro do contexto das redes elétricas inteligentes e do cenário elétrico brasileiro. O dispositivo proposto é capaz de fornecer uma variedade de informações e atuações da/na rede elétrica no local onde for instalado, possibilitando aos operadores das redes uma visão geral granular do sistema elétrico.

A partir da branda revisão bibliográfica realizada e também de informações extraídas de documentos e entrevistas de empresas e profissionais do setor elétrico, é possível concluir que todos os aspectos técnicos e funcionalidades contempladas pelo medidor aqui proposto, são de fato de grande relevância e traduzem a tendência do mercado de medidores inteligentes, onde cada vez mais serão agregadas funcionalidades mais complexas, além do simples papel de medir o consumo energético.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo incentivo financeiro durante o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

Arote, S. and Mulay, G. (2016). Design and implementation of smart three phase energy meter. *IEEE Int.*

- Conf. on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 44–49.
- Colak, I. (2016). Introduction to smart grid. *3rd International Smart Grid Workshop and Certificate Program*, 35–47.
- Dai, Y. and Wang, Q. (2018). Research on the application of the harmonic smart electricity meter in the smart grid. *37th Chinese Control Conference*.
- Faria, J.R.C. and Lima, D.M.C. (2018). A smart multi-sensor for the diagnosis of distribution transformers. *IEEE Sensors*.
- Kalalas, C. and Thrybom, L. (2016). Cellular communications for smart grid neighborhood area networks: A survey. *IEEE Access*, vol. 4, no. 1, 1469–1493.
- Kazibwe, W. (1990). Power quality: A review. *IEEE Computer Applications in Power*.
- Labib, L. and Billah, M. (2017). Design and implementation of low-cost universal smart energy meter with demand side load management. *Generation Transmission & Distribution IET*, 3938–3945.
- Martirano, L. and Manganelli, M. (2015). Design and classification of smart metering systems for the energy diagnosis of buildings. *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*.
- Moghe, R. and Iyer, A. (2014). A low-cost wireless voltage sensor for monitoring mv/hv utility assets. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, 2002–2009.
- Morello, R. and Capua, C.D. (2017). A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: The role of advanced sensing and iot in the electric grid of the future. *IEEE Sensors vol. 17, no. 23*, 7828–7837.
- Peng, L. and Ziheng, Y.X.Y. (2015). The h control method of gridtied photovoltaic generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1670–1677.
- PRODIST (2008). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist - agência nacional de energia elétrica.
- Solanki, M.D. and Joshi, S.K. (2016). Recapitulation of electric spring: A smart grid device for real time demand side management and mitigating power quality issues. *National Power Systems Conference (NPSC)*, 1–6.
- Stusek, M. and Pokorny, J. (2017). A non-invasive electricity measurement within the smart grid landscape: Arduino-based visualization platform for iot. *9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 6–8.
- VOE (2019). Voice of experience (voe)| leveraging ami networks and data - office of electricity us department of energy (doe).