

Projeto de Medidor de Qualidade de Energia de Baixo Custo

Miccaela B. Santiago, André A. Mariano

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

miccaelasantiago@ufpr.br

Resumo—Com o aumento da distorção harmônica na rede elétrica em virtude do aumento de cargas não lineares e da expansão dos sistemas de potência é necessário realizar o monitoramento da qualidade de energia da rede elétrica. Tendo isso em vista, o presente trabalho apresenta a implementação de um protótipo de medidor de qualidade de energia simples e de baixo custo para aplicação em baixa tensão. A implementação desse sistema foi feita em duas partes complementares, sendo a primeira delas o hardware responsável por validar a inicialização e o funcionamento dos componentes e, conseqüentemente, a alimentação, as conexões e montagem. A segunda parte da validação foi realizada por emulação em um software de simulação tendo como objetivo de validar a conversão de dados em dados decimais reais e, conseqüentemente, o funcionamento do código proposto. Sendo o CS5463 a unidade de medição de energia usado nesse protótipo, ele é uma excelente escolha para realizar medidas de grandezas de potência, é versátil e acessível, além de possuir várias funções. Por fim, validou-se o uso do CS5463 no projeto para observar a qualidade de energia através da validação do cálculo da distorção harmônicas total.

I. INTRODUÇÃO

Os constantes processos de modernização, industrialização e mudança nos hábitos consumidores tem causado grandes mudanças no sistema elétrico. Hoje em dia, portanto, entende-se por qualidade de energia uma energia que é entregue de forma ininterrupta pela concessionária e segue um padrão de critérios estabelecidos por ela.

Um desses critérios é a ausência de perturbações na rede, de forma que os sinais de corrente e tensão mantenham a forma de uma onda senoidal. Existem diversos tipos de perturbações que podem afetar a qualidade de energia da rede, sendo um deles as distorções na forma de onda. As distorções das formas de onda dos sinais são definidas como desvios da forma senoidal da tensão na frequência fundamental do sistema [1]. Essas deformidades têm aumentado significativamente em razão do número crescente de cargas não lineares em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais. Acontece

que essas cargas, em sua maioria, são as grandes responsáveis por distorcer a forma de onda, através da inserção de harmônicos no sinal. Essa perturbação é chamada de distorção harmônica e pode trazer diversos tipos de distúrbios. Alguns exemplos de fontes geradoras de harmônicos são conversores chaveados, retificadores, inversores, compensadores estáticos e entre outros [2].

A presença de harmônicos na rede impacta na qualidade da medição realizada pelos medidores da concessionária, o que significa dizer que os harmônicos são danosos para própria concessionária e os estabelecimentos que pagam pelo seu excedente reativo, porque, no Brasil, as normas de medição de energia para medidores eletrônicos cobrem somente o caso ideal senoidal [2]. Ademais, o mal desempenho dos equipamentos causa perdas no faturamento de indústrias que dependem da qualidade do seu funcionamento. Além disso, grande parte dos equipamentos que são responsáveis pela inserção de harmônicos na rede, também são muito sensíveis a elas [3]. Dessa forma, não apenas a pessoa responsável por essa distorção é prejudicada, mas também todos conectados à mesma rede [4].

Assim, muitas empresas monitoram a qualidade de sua energia com objetivo de evitar perdas de faturamento. No entanto, pouco se sabe sobre o comportamento das harmônicas em baixa tensão [5]. Torna-se interessante, então, monitorar a qualidade da energia nestes sistemas. Porém, muitas empresas pequenas e consumidores não monitoram a qualidade da sua energia por conta do custo.

Esse trabalho apresenta a descrição de um protótipo de um medidor de qualidade de energia elétrica, responsável por medir a distorção harmônica total na rede e tem como foco a área comercial e residencial de baixa tensão. O protótipo tem como base o Circuito Integrado (CI) CS5463 da Cirrus Logic.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é feita a descrição do medidor proposto explorando aspectos do componente CS5463 e do protótipo, na seção 3 é detalhado alguns aspectos da implementação do *hardware* e da emulação e seus resultados e na seção 4, finalmente, as conclusões são apresentadas.

II. DESCRIÇÃO DO MEDIDOR PROPOSTO

Um harmônico é um componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental [3]. Assim, a “Distorção Harmônica Total” é um procedimento quantitativo para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. É possível obter a Distorção Harmônica Total (THD) a partir da raiz da razão do somatório da potência de todas as harmônicas pela potência da fundamental do sinal [6], como na equação

$$THD[x(t)] = \sqrt{\frac{P_{har}}{P_{sig}}}, \quad (1)$$

sendo a P_{har} potência ativa harmônica e P_{sig} a potência ativa fundamental do sinal.

A. O Protótipo

O protótipo desenvolvido nesse trabalho é um medidor que busca indicar a qualidade de energia com o objetivo de medir os dados da distorção harmônica total na rede. O protótipo usa o chip CS5463, que realiza cálculos de potência para obter os dados da THD, indiretamente. Para isso é preciso acessar os registradores do CS5463 através da comunicação *Serial Peripheral Communication* (SPI) entre o Arduino e o *chip*. O objetivo do protótipo é validar o sistema mostrando que o circuito é funcional. Esse sistema tem como objetivo recolher os dados do sinal e condicioná-lo para o CS5463 que por sua vez envia os dados via SPI pelo Arduino, com devida isolamento, que retorna os dados processados para o computador. Validar esse sistema é o objetivo desse protótipo.

O protótipo foi dividido em parte de *hardware* e na parte de simulação. O *hardware*, com o sistema demonstrado no diagrama da figura 2, é o CS5463 soldado em uma *breakout board* em virtude de seu encapsulamento, e conectado ao Arduino através da protoboard pelos pinos de alimentação e comunicação. A parte em *hardware* tem o objetivo de realizar a comunicação do *chip* com o Arduino e verificar se o *chip* opera nas condições descritas no tópico 5 do *datasheet* [7]. É apresentado uma foto do protótipo na figura 1 e as conexões são demonstradas na figura 2.

A princípio, o objetivo era implementar e validar tudo no *hardware*, porém, optou-se por realizar uma emulação em um software de simulação. Como demonstrado na figura 3, os dados do SDI são interpretados pelo usuário e ele insere um valor de retorno no *SPI debugger* que por sua vez envia os dados para o Arduino para realizar a conversão dos dados. Assim, o conjunto usuário e *SPI debugger* atuam como o CS5463 no circuito. Essa emulação tem como objetivo validar o processo de obter dados dos registradores do CS5463 e confirmar a conversão dos bits recebidos em um valor decimal real para poder realizar a operação da THD.

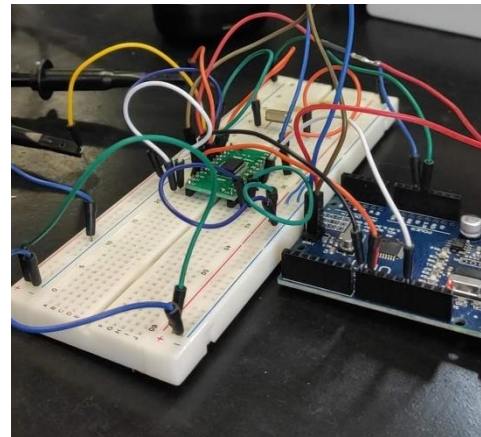


Fig. 1. Montagem do CS5463 na protoboard.

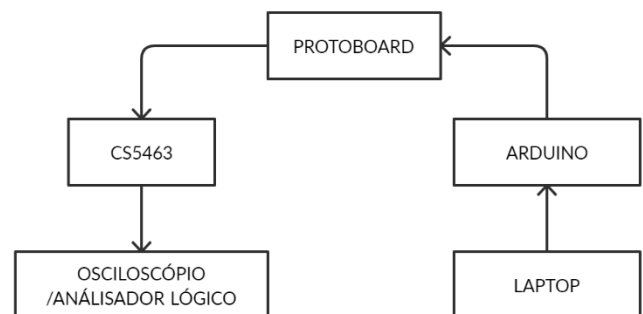


Fig. 2. Diagrama de blocos das conexões realizadas no hardware.

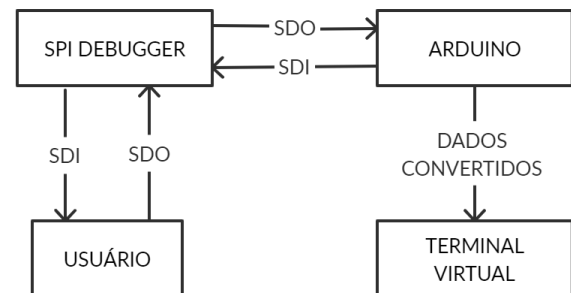


Fig. 3. Diagrama de blocos da emulação.

B. O CS5463

O CS5463 é a unidade de medição escolhida para realizar as operações de potência nesse protótipo. Ele é um dispositivo integrado que realiza medição de potência combinando dois conversores analógico-digital, mecanismo de cálculo de potência, conversos de energia para frequência e uma interface serial SPI. É projetado para medir com precisão a tensão e corrente instantânea e RMS, potência instantânea, potência aparente, potência ativa e potência reativa. Além disso, possui um sensor de temperatura interno, detecção de queda de tensão, compensação por deslocamento de fase, tensão de

referência interna, filtros digitais e um processador de cálculo.

Além de realizar todas essas funções, esse medidor tem algumas vantagens de uso como o seu baixo custo e comunicação via SPI que facilita o acesso aos dados nos registradores do CI. Apesar disso, o CS5463 não calcula diretamente a THD sendo necessário então calculá-la no microcontrolador. Uma dessas formas de obter a THD está apresentada na equação 1.

O CS5463 é equipado com 2 canais de entradas completamente diferenciais $\pm VIN$ e $\pm IIN$, sendo eles canais de entrada de tensão e de corrente respectivamente. O *datasheet* limita o valor de entrada máxima de tensão dos dois canais diferenciais para 169 mVRMS. A partir desses canais, o CS5463 é capaz de realizar medições instantâneas de tensão e corrente através de seu conversor A/D.

Além dessa condição de operação, também é necessário manter um clock interno MCLK - *Master clock Frequency* - de 4,096 MHz e manter a frequência de comunicação SPI em 1MHz. Pode ser usado uma fonte externa de oscilação ou o próprio oscilador do CI utilizando um cristal de 4,096 MHz. Tendo em vista que se o *chip* funciona com as operações descritas nos tópicos 5 no *datasheet*, seu oscilador também funcionará, então, é possível prever se o CS5463 está funcionando verificando a saída de clock do CPUCLK. É correto que se o *chip* funciona então deverá haver uma saída de clock no pino CPUCLK. Isso é possível porque o *datasheet* prevê que esse pino tem a mesma frequência do MCLK.

Todos os registradores do CS5463 são configurados de forma a possuírem 3 bytes de dados e um byte de comando, mas são configurados de formas diferentes. De acordo com a Cirrus Logic, para obter os valores decimais reais dos registradores é necessário fazer a conversão dos bytes recebidos. Uma dessas formas de configuração considerando os registradores de potência ativa harmônica e potência ativa fundamental é aplicar a equação

$$VALOR_{dec} = \frac{1}{(2^{23}-1)} \times \text{hextodec}(VALOR_{hex}) - MSB \quad (2)$$

aos dados recebidos. Essa equação é usada para obter os valores corretos dos registradores. Sendo a função *hextodec* a função que transforma hexadecimal em decimal.

Como um CI está sendo utilizado, interfaces de condicionamento de corrente e tensão precisam ser usadas para não danificar o *chip*. Além disso, também é necessário o uso de isolamento entre o CS5463 e o microcontrolador. Um exemplo de circuito condicionador do sinal recebido é disponibilizado pelo *datasheet* da fabricante [7].

III. ASPECTOS DA IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Para realizar as conexões descritas na figura 2, foi necessário soldar o CS5463 em uma *breakout board* para 24 pinos em razão do encapsulamento do CI. Foi usado a

protoboard para alimentar o *chip* através do Arduino e para conectar os pinos de comunicação serial ao mesmo. Esses pinos de comunicação são SDI (*Serial Data In*), SDO (*Serial Data Out*), SCLK (*Serial Clock Input*), CS (*Chip Select*) e os pinos RESET e MODE. É possível observar na figura disponibilizada pelo *datasheet* dos pinos do CS5463 [7] que SDI e SDO são pinos de entrada e saída, respectivamente, de dados em relação ao *chip* usados na comunicação com o microcontrolador junto com os pinos SCLK e CS. Os pinos SDI e SDO são respectivamente os pinos MOSI e MISO e são eles que permitem acessar os registradores através da interface digital do Arduino.

Assim, foi realizado o monitoramento do pino CPUCLK (CPU Clock Output) e XIN (Crystal In) - pino da entrada do cristal - e verificou-se que ambos têm a mesma frequência de sinal quando o circuito é alimentado. Dessa forma, é possível saber que o CI funciona e não apresenta defeitos na sua inicialização.

Na tabela 1, a primeira linha da coluna SDI representa o comando um comando de escrita do registrador de configuração. As outras linhas simbolizam diferentes retornos de dados pelo SDO para cada dupla de comando de leitura 0x3C - leitura do registrador de potência ativa harmônica - e 0x3E - leitura do registrador de potência ativa fundamental. Os comandos de 0xFF do CI são comando de SYNC1 e são usados para receber os dados dos registradores via SDO.

Na emulação foi criado um esquemático para simular o envio de dados do Arduino para o *chip* e vice-versa emulando o comportamento da implementação física. O Arduino recebe os dados do CS5463 e realiza as contas através da equação 1 e retorna esses dados para a emulação através da simulação do Virtual Terminal disponibilizado pelo software de simulação. O SPI *debugger* adicionado na simulação atua como o *slave* no lugar do CS5463, possibilitando assim retornar dados através de seu terminal como se fossem do *chip*.

TABELA 1. DADOS DO SDI E SDO

SDI	SDO
0x40 0x00 0x00 0x01	0x00 0x00 0x00 0x00
0x3C 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x7D 0x70 0xA2
0x3E 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x7D 0x70 0xA2
0x3C 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x3F 0xFF 0xFF
0x3E 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x46 0xEA 0x07
0x3C 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0xF3 0xD3 0x5D
0x3E 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0xCF 0x4D 0x7A
0x3C 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0xB8 0x00 0x08
0x3E 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x80 0x00 0x08
0x3C 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x08 0x00 0x00
0x3E 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x7F 0xFF 0xFF

TABELA 2. DADOS ESCOLHIDOS DE POTÊNCIA ATIVA HARMÔNICA E FUNDAMENTAL EM HEXADECIMAL E DECIMAL

P_{Hhex}	P_{Fhex}	P_{Hdec}	P_{Fdec}	THD
0x7D70A2	0x7D70A2	0,980000	0,980000	100%
0x3FFFFFF	0x46EA07	0,500000	0,554017	95%
0xF3D35D	0xCF4D7A	-0,095112	-0,038049	50%
0xB80008	0x800008	-0,562499	-0,999999	75%
0x080000	0x7FFFFFF	0,062500	1,000000	25%

É importante observar que esses dados de potência ativa harmônica e fundamental foram escolhidos com o objetivo de validar o processo de conversão indicado pelo *datasheet*. Pois, de acordo com ele, os registradores P_H e P_F possuem uma faixa de operação que varia em valor decimal de $-1 \geq P_H$, $P_F \leq 1$. A tabela 2 representa os resultados da conversão necessária para transformar os dados em hexadecimal em decimal utilizando a equação 2. As duas colunas P_{Hhex} e P_{Fhex} representam os valores enviados para o Arduino. E as duas colunas P_{Hdec} e P_{Fdec} representam os valores que o Arduino retorna após a conversão.

Para calcular a THD após receber esses dados de potência convertido como na tabela 2, é necessário aplicar a equação 1 no código. Assim, é possível obter a distorção através desses dados escolhidos. Esses dados foram obtidos através da simulação e se encontram na última coluna da tabela 2. Demonstrando assim, que o método de conversão nas faixas de operação indicadas dos registradores funciona como esperado. Esses dados são emulados, como já explicado, mas ele prova que o código funciona e o método de conversão também, visto que é possível provar esses dados através das equações 1 e 2.

Se o procedimento de alimentação e comunicação funcionam como indicado pelos testes em *hardware*, e se o método de conversão e recebimento de dados além do código desenvolvido para isso também funcionam, então é possível afirmar que esse procedimento também será funcional utilizando a rede elétrica e trocando o Arduino por um ESP. Porém, como descrito anteriormente, para realizar isso também é necessário desenvolver um circuito de condicionamento e isolamento. Também ao longo dos estudos o CS5463 se mostrou um *chip* excelente para realizar medidas de potência, sendo muito versátil com várias grandezas disponíveis para acessar e além de ser acessível.

IV. CONCLUSÃO

Os efeitos das distorções harmônicas causadas pelo aumento do número de cargas não lineares vêm aumentando de tal forma que não se pode ser ignorado seus efeitos. Devido a isso, a proposta desse trabalho foi mostrar um protótipo de medidor de qualidade de energia

que visa estabelecer a distorção harmônica da rede em baixa tensão. Tem objetivos de ser um sistema simples e de baixo custo e que possa servir como base para projetos futuros mais complexos.

De acordo com a proposta, foi possível validar na parte de *hardware*, que o CI funciona e não apresenta defeitos na sua inicialização. Apesar de os dados serem emulados, validou-se, que o método de conversão dos dados em valores decimais reais nas faixas de operação indicadas dos registradores funciona como esperado e, conseqüentemente, que o código proposto funciona. Também, percebe-se que o método utilizado na emulação permite ler ou escrever qualquer registrador do CS5463 desde que sejam feitas as devidas alterações.

Mesmo que o sistema proposto não realize medições na rede elétrica, os resultados apresentados permitem concluir que ele será funcional quando conectado à rede elétrica. Para tanto, será necessário a adição de circuitos de condicionamento e isolamento. Pode-se também prever a troca do Arduino por um ESP, possibilitando a comunicação sem fio do medidor resultante sem gastos extras.

Apesar de não ter sido utilizado todas as funcionalidades do *chip* CS5463, percebe-se que é um *chip* robusto e versátil e a grande quantidade de ajustes que podem ser realizadas através dos seus registradores permite o desenvolvimento de equipamentos com alto grau de sofisticação.

REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, Danton Diego. Análise de distúrbios elétricos em sistemas de potência. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2010).
- [2] Suhett, Marcos Riva. Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos. Rio De Janeiro, Março de 2008.
- [3] Rodrigues, Augusto Marconcin. Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa. Curitiba: UFPR (2009).
- [4] Andrade Jr, G. V., et al. Contribuições da distorção harmônica de tensão entre concessionária e consumidor. Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB (2006).
- [5] Hafner, Angelo, Carlos R. Erig Lima, and Heitor Silverio Lopes. Implementação de um medidor de qualidade de energia usando computação reconfigurável por hardware. VII SBAI-Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (2005).
- [6] Blagouchine, Iaroslav V., and Eric Moreau. "Analytic method for the computation of the total harmonic distortion by the Cauchy method of residues." IEEE Transactions on communications 59.9 (2011): 2478-2491.
- [7] Cirrus Logic. Datasheet: CS5463, Single Phase, Bi-directional Power/Energy IC. Electronic Publication, 2011. Disponível em: https://www.versasense.com/files/datasheets/CS5463_F3.pdf. Acesso em: 26 de ago. de 2020.