

## **Desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia elétrica com sistema de monitoramento remoto**

### **Development of a power quality analyzer with remote monitoring system**

DOI:10.34117/bjdv9n2-129

Recebimento dos originais: 23/01/2023

Aceitação para publicação: 22/02/2023

#### **Michele de Oliveira Campos**

Graduanda em Engenharia de Controle e Automação

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Cornélio Procópio

Endereço: Av. Alberto Carazzai, 1640, Centro, Cornélio Procópio - PR,

CEP: 86300-000

E-mail: michelecampos@alunos.utfpr.edu.br

#### **Ailton de Oliveira Louzada**

Mestrando em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Cornélio Procópio

Endereço: Av. Alberto Carazzai, 1640, Centro, Cornélio Procópio - PR,

CEP: 86300-000

E-mail: ailtonlouzada@alunos.utfpr.edu.br

#### **Wesley Angelino de Souza**

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Cornélio Procópio

Endereço: Av. Alberto Carazzai, 1640, Centro, Cornélio Procópio - PR,

CEP: 86300-000

E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br

### **RESUMO**

A expansão e modernização dos sistemas elétricos, junto com o crescente uso de cargas eletrônicas não lineares e fenômenos eletromagnéticos, começaram a provocar distúrbios nas redes e cargas elétricas, acarretando em problemas técnicos e prejuízos financeiros. Para resolver tal problema, é necessário o uso de sistemas quantificadores da qualidade de energia elétrica (QEE). Neste cenário, o monitoramento da energia elétrica se torna um processo importante à geração, transmissão e distribuição, permitindo a obtenção de informações acerca de anomalias relacionadas com a energia elétrica. Considerando este cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de QEE, responsável pela obtenção dos dados, processamento, envio dos dados e pelo sistema de supervisão. Desta forma, foi utilizado o microcontrolador ESP32 para receber as grandezas elétricas, calcular os indicadores de QEE e enviá-los para o sistema supervisor Home Assistant, que armazena tais indicadores em uma base de dados e apresenta graficamente o monitoramento da tensão, corrente e indicadores de QEE. Os resultados apresentam o funcionamento do sistema, possibilitando a observação dos índices de QEE, auxiliando no suporte a compreensão dos níveis de tolerância destes índices em conformidade com as normas vigentes.

**Palavras-chave:** monitoramento de energia, qualidade de energia elétrica, sistemas microcontrolados.

## ABSTRACT

Electromagnetic phenomena are causing disturbances in the power grids and electrical loads because of the technological evolution, expansion, modernization of electrical systems, and the increasing use of non-linear electronic loads. It leads to technical issues and financial losses. Systems capable of quantifying electric power quality (PQ) indicators are required to solve such a problem. In this scenario, power monitoring becomes an essential process in the electrical generation, transmission, and distribution, allowing the acquisition of information about anomalies related to electric power and assisting in decision-making systems. Regarding this scenario, this work presents the development of a PQ monitoring system responsible for gathering, processing, and sending data to the supervision system. In this way, the microcontroller ESP32 is used to receive the electric signals, calculate the PQ indicators and send them to the Home Assistant, which stores such indicators in a database and presents the monitoring of the voltage, current, and PQ indicators graphically. The results show the system's operation, allowing the observation of the PQ indexes and helping to understand the conformity levels of these indexes under the actual PQ standards.

**Keywords:** power energy monitoring, power quality, microcontroller systems.

## 1 INTRODUÇÃO

O interesse em monitorar a qualidade de energia elétrica (QEE) que trafega pelos sistemas de transmissão e distribuição ou em uma instalação elétrica industrial tem aumentado nas últimas décadas. Isto ocorre porque os distúrbios causados por consumidores ou cargas de grande porte começaram a interferir na energia suprida aos demais consumidores, comprometendo cargas sensíveis, tais como os sistemas de comunicação, de informática, processos automatizados, entre outros (SANKARAN, 2017).

Junto a isto, presencia-se nas últimas décadas o estabelecimento de diversos indicadores capazes de avaliar, em tempo real e em pós análise, a QEE para qualquer tipo de instalação ou condição de fornecimento (SOUZA et al., 2015). O que se busca neste caso é extrair indicadores que expressem a QEE em um determinado ponto de análise, principalmente quando as condições locais de tensão e corrente estão muito afastadas das ideais de fornecimento e consumo de energia elétrica (SHIN et al., 2005). Obtidos tais índices, torna-se possível monitorar localmente ou a distância a energia elétrica, qualificando e quantificando os distúrbios causados por um ou mais consumidores ou pelas empresas que possuem concessões para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (SANKARAN, 2017).

Normas nacionais e internacionais apresentam uma série de definições e recomendações que podem e devem ser utilizadas para a avaliação da QEE, tais como as normas IEEE 1459 e ANEEL PRODIST, módulo 8 (ANEEL, 2020; EMANUEL, 2010). Para isto, utiliza-se de técnicas digitais de processamento, as quais tornam possível a monitoração em tempo real das grandezas de interesse. Tomando como referência as condições de operação do sistema ideal (forma de onda senoidal, equilibrada, frequência constante, amplitude constante, alto fator de potência), bem como as normas que regem o mesmo, é necessário definir e monitorar indicadores de qualidade de energia, os quais devem quantificar o afastamento dessas condições que o sistema real experimenta (DECKMANN; MELO, 1998).

Considerando tal aspecto, é crescente o número de trabalhos sobre a definição de indicadores de QEE relacionados com a conformidade das tensões e correntes, bem como técnicas de processamento dos mesmos e também sobre o desenvolvimento de instrumentos capazes de avaliá-los (GARCIA et al., 2017; SOUZA, 2016). Assim, no que diz respeito à monitoração de indicadores de QEE no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), tal objetivo pode ser atingido através da utilização de medidores de QEE ou “qualímetros”, que são equipamentos de medição, capazes de extrair informações quantitativas relacionadas às taxas de distorção, fatores de desequilíbrio, flutuação de tensão, variações momentâneas de tensão, entre outros (SOUZA, 2016).

Outro aspecto essencial é a importância de um sistema supervisorio para a observação e análise das grandezas e indicadores de interesse (DINIZ; CARVALHO JUNIOR; SOUZA, 2019). De forma geral, um sistema supervisorio é uma interface de integração com o usuário que inclui um conjunto de ferramentas e métodos para a observação, monitoramento, controle e tomada de decisão de processos, podendo ser de interesse industrial, comercial e residencial (HASHEMPOUR et al., 2018). As principais atividades abordadas pelos sistemas de supervisão são monitoramento e detecção de falhas, diagnóstico e tomada de decisão para acomodação de falhas e reconfiguração do sistema (ROSLAN et al., 2019).

Neste contexto, considerando os aspectos de medição de indicadores de QEE e integração a um sistema supervisorio, este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de dados para análise de QEE. Desta forma, as próximas seções apresentam a metodologia, desenvolvimento e resultados de um protótipo de medidor de QEE, também denominado “qualímetro”.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os indicadores de QEE implementados neste artigo são baseados na norma brasileira PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) módulo 8. Nesta seção, também serão apresentados o sistema de aquisição, processamento, comunicação e visualização dos dados do protótipo do medidor de QEE.

### 2.1 INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

No cenário nacional, para regular os padrões de QEE, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresenta o PRODIST, que foi estabelecido pela Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021, entrou em vigor em 1º de janeiro de 2022 e revogou as resoluções sobre procedimentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2020). O PRODIST é composto por 11 módulos, tendo o módulo 8 correspondente à qualidade de fornecimento de energia elétrica. Desta forma, o módulo 8 apresenta referências, indicadores e limites de QEE, transformando-a em objetivo mensurável e tratando os fenômenos de energia elétrica abrangidos em regime transitório e permanente. No contexto deste artigo, tendo como análise uma rede elétrica com alimentação a 220/127 volts e tendo como objetivo a afirmação da implementação de um medidor de QEE, serão considerados os indicadores a seguir.

#### 2.1.1 Tensão de Regime Permanente

A conformidade de tensão em regime permanente refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no PAC, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos (ANEEL, 2021), conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão nominal - regime permanente (220/127 V).

Tensão de atendimento	Faixa de tolerância, considerando o valor de leitura ( $T_L$ )
Faixa adequada	$(202 \leq T_L \leq 231) / (117 \leq T_L \leq 133)$
Precária	$(191 \leq T_L < 202$ ou $231 < T_L \leq 233)$ / $(110 \leq T_L < 117$ ou $133 < T_L \leq 135)$
Crítica	$(T_L < 191$ ou $T_L > 233) / (T_L < 110$ ou $T_L > 135)$

Fonte: ANEEL (2021), adaptado pelos autores.

### 2.1.2 Fator de Potência

Em sistemas elétricos de corrente alternada, o fator de potência é um indicador de eficiência com que um equipamento elétrico ou um conjunto de cargas observadas no PAC utiliza de forma útil a energia fornecida. Quanto mais próximo de um, mais eficiente é o equipamento ou conjunto de cargas. Equipamentos ou conjunto de cargas com baixo fator de potência (quanto pior, tende ao valor zero), significa que a potência não está sendo utilizada de forma eficiente e, portanto, ocorrem perdas elétricas. O fator de potência ( $fp$ ) é calculado a partir dos valores registrados das potências ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ), conforme a Equação (1) e com os limites conforme a Tabela 2.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad 1)$$

Tabela 2 – Limite de fator de potência para unidades com tensão inferior a 230 kV.

Limite	Faixa de tolerância, considerando o fator de potência ( $fp$ )
Aceitável	$0,92 \leq fp \leq 1,00$ (indutivo ou capacitivo)
Fora do limite	$fp < 0,92$ (indutivo ou capacitivo)

Fonte: ANEEL (2021), adaptado pelos autores.

### 2.1.3 Distorções Harmônicas

Distorções harmônicas correspondem a fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à frequência fundamental da rede de 60 Hz. Entre os indicadores voltados às harmônicas no PRODIST módulo 8, foram considerados três: *i*) distorção harmônica total ( $DTT_{95\%}$ ), *ii*) distorção harmônica total da tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três ( $DTT_i_{95\%}$ ), e *iii*) a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de três ( $DTT_3_{95\%}$ ). Ambos são analisados na ocasião de violação em 5% do limite harmônico das 1008 leituras válidas, obtidas consecutivamente em um intervalo de 10 minutos dos indicadores  $DTT\%$ ,  $DTT_i\%$  e  $DTT_3\%$ , respectivamente, conforme apresentados nas Equações (2), (3) e (4). Os limites destes três indicadores são apresentados na Tabela 3.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad 2)$$

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad [\%] \quad 3)$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad [\%] \quad 4)$$

Sendo:

- $h$  : todas as harmônicas de 2 até  $h_{max}$  na Equação (2), harmônicas ímpares não múltiplas de 3 na Equação (3) e harmônicas ímpares múltiplas de 3 na Equação (4);
- $h_{max}$  : ordem harmônica máxima conforme a classe do equipamento;
- $h_i$  : máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3;
- $h_3$  : máxima ordem harmônica ímpar, múltipla de 3;
- $V_h$  : tensão harmônica de ordem  $h$ ;
- $V_1$  : tensão fundamental medida.

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais (% da tensão fundamental < 2,3 kV).

Indicador	Tolerância
$DTT_{95\%}$	10%
$DTT_i_{95\%}$	7,5%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%

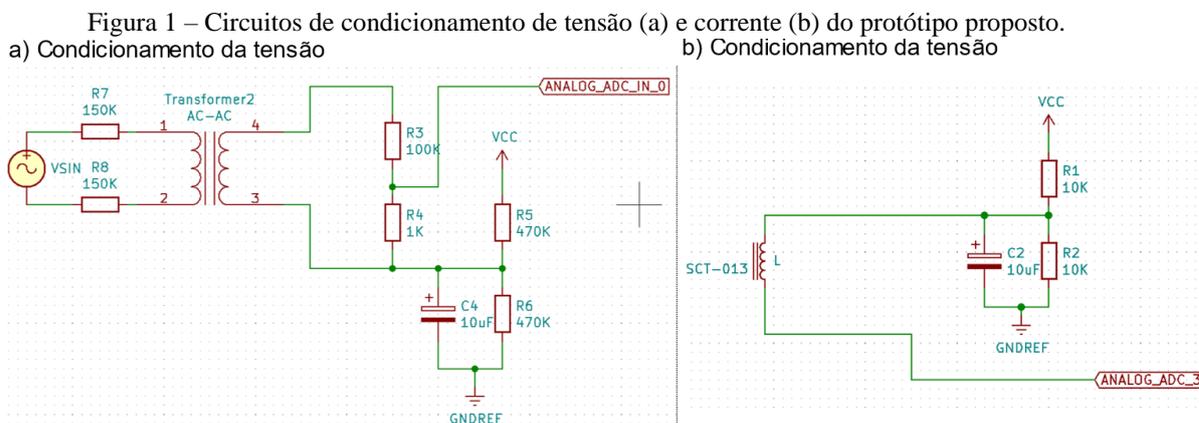
Fonte: ANEEL (2021), adaptado pelos autores.

Considerando estes indicadores, tem-se neste artigo o objetivo de implementá-los em um protótipo baseado em sistema embarcado, que foi desenvolvido conforme o apresentado na subseção a seguir.

## 2.2 PROTÓTIPO DO ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

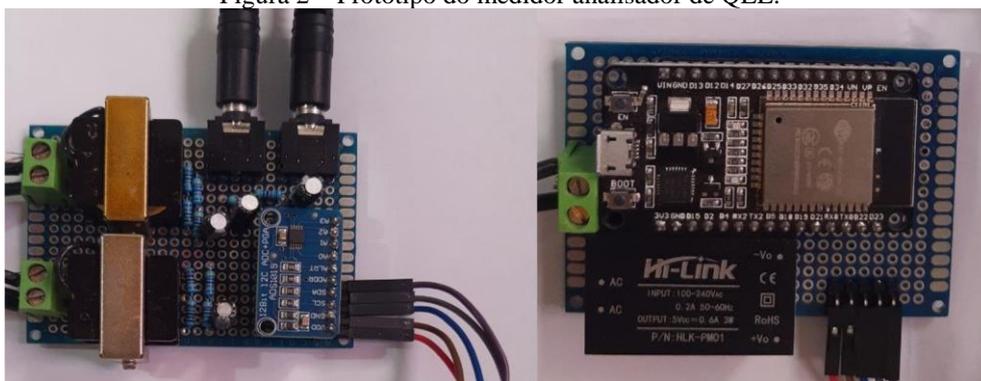
O protótipo do analisador de QEE é composto pelo hardware do circuito de aquisição de sinais com sensores de tensão e corrente, um microcontrolador ESP32 e o circuito de alimentação do protótipo. Para obter o sinal de tensão da rede observada no PAC em condições adequadas de leitura para o conversor analógico para digital (ADC) do protótipo, foi feito o rebaixamento da tensão por meio de transformadores, e adicionado um sinal de tensão contínua para condicionar o sinal de tensão ao nível de 0 a 3 volts, compatível ao ADC deste protótipo, que corresponde ao modelo ADS1256. Para monitorar a corrente, foi utilizado sensor de corrente SCT-013-050, que possui capacidade de medir corrente alternada de até 50A. Esse tipo de sensor é formado por um transformador de corrente e necessita de um circuito de condicionamento para entrada do

ADC. Os circuitos de condicionamento de tensão e corrente são apresentados na Figura 1. A Figura 2 apresenta o protótipo montado, contendo o condicionamento de sinais para dois canais de corrente e dois de tensão, o ADC, uma fonte de alimentação Hi-Link HLK-PM01 e o ESP32.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 2 – Protótipo do medidor analisador de QEE.



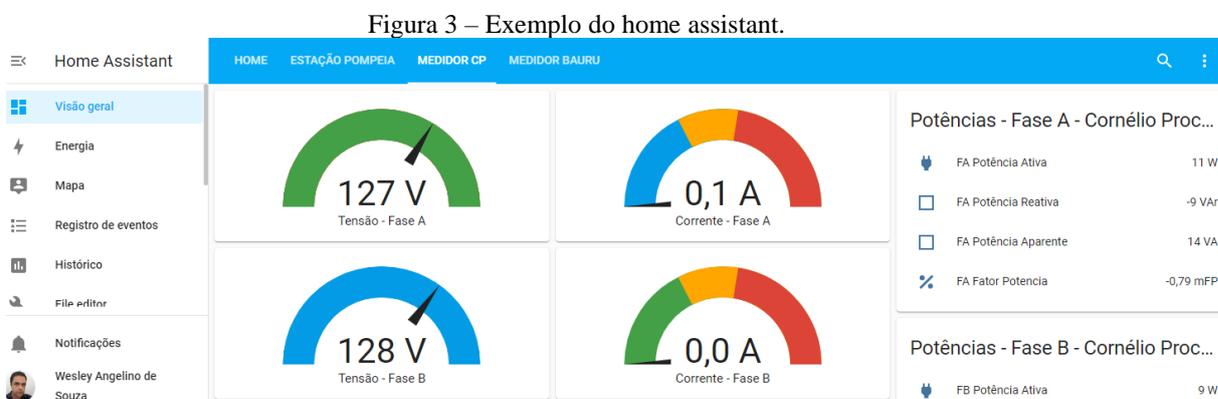
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os valores dos sinais condicionados são aquisitados no ADS1256 e enviados ao ESP32 através da comunicação I2C. Ao receber os dados, o ESP32 é o responsável por calcular os indicadores de QEE apresentados na Subseção 2.1 e outras grandezas elétricas, como a tensão e corrente eficazes, potência ativa, reativa e aparente e o consumo de energia elétrica. Posteriormente, o ESP32 envia os dados via *wireless* para um *broker* do *Home Assistant* (HA), utilizando o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). O *broker* atua como servidor nos dois sentidos de comunicação, seguindo o modelo de “publicar – assinar” no qual o publicador (*publisher*) envia dados para um *broker* e os assinantes (*subscriber*) recebem os dados. O *publisher* deste artigo é realizado pelo ESP32 e o *subscriber* é o feito pelo HA, responsável pela visualização dos dados

coletados, permitindo ao usuário ter uma interface e interagir com os mecanismos de visualização de dados.

### 2.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO – HOME ASSISTANT

O HA é uma plataforma de código aberto para automação residencial e pode ser instalada e executada em um computador servidor, como também em dispositivos embarcados, como o *Raspberry Pi*. A programação segue os conceitos de modularização para integrar e dar suporte para os dispositivos de IoT (*Internet of Things*, em português Internet das Coisas). A Figura 3 apresenta a interface do HA, que pode ser executada em um navegador web ou por aplicativos móveis.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A integração entre os pontos via MQTT necessita do protocolo de conectividade baseado em TCP/IP, tendo a necessidade de definir o acesso por IP parte do *broker* (servidor do MQTT) e o *publisher* (o protótipo do medidor) tendo que se conectar ao IP e porta do MQTT do *broker*. O conjunto de dados são enviados no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), conforme apresentado na Figura 4.

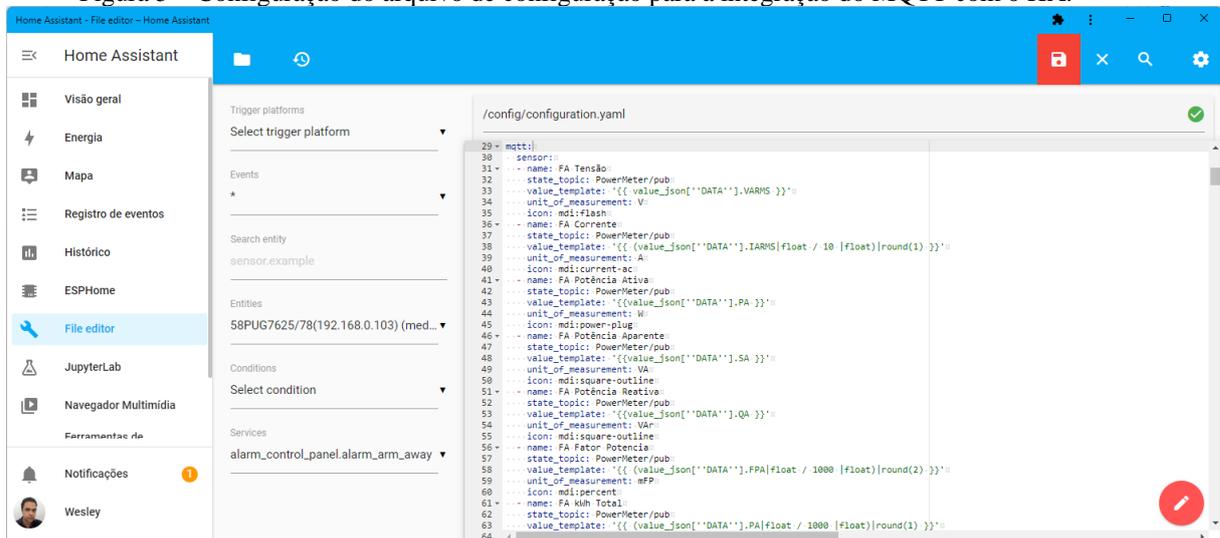
Figura 4 – Grandezas enviadas via MQTT no formato JSON.

```
Mensagem 1 recebida em PowerMeter/pub às 21:25:
{
  "DATA": {
    "VARMS": 127,
    "VBRMS": 0,
    "VCRMS": 127,
    "IARMS": 3,
    "IBRMS": 157,
    "ICRMS": 13,
    "VABRMS": 127,
    "VBCRMS": 127,
    "VCARMS": 220,
    "VABCTRMS": 158,
    "PA": 40,
    "PB": -6,
    "PC": 159,
    "PT": 193,
    "QA": -11,
    "QB": -5,
    "QC": -30,
    "QT": -46,
    "SA": 41,
    "SB": 7,
    "SC": 161,
    "ST": 198,
    "FPA": -975,
    "FPB": -857,
    "FPC": -987,
    "FPT": -974,
    "KVARHA": 816319,
    "KVARHB": 112013,
    "KVARHC": -235445,
    "KVARHT": 692887,
    "KWHA": 991203,
    "KWHB": 2408178,
    "KWHC": 809159,
    "KWHT": 4208541,
    "FREQ": 5996,
    "TEMP": -32768,
    "SERRS": 0,
    "WRSSI": -40,
    "UPTIME": 39785
  }
}
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A integração entre o MQTT e o HA é feito através do ajuste do arquivo de configuração *configuration.yaml* por meio do atributo *sensor*, e da configurações das propriedades de acordo com as grandezas enviadas via JSON, conforme o exemplo apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Configuração do arquivo de configuração para a integração do MQTT com o HA.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Posterior à configuração, pode-se adicionar as entidades (os sensores) na opção do supervisor, tendo os painéis visuais, tendo como o exemplo a Figura 3.

Considerando os aspectos de desenvolvimento descritos nesta seção, o medidor foi montado, sendo feita a aquisição dos sinais de tensão e corrente a 7,68 Hz, os algoritmos de observação de tensão e corrente implementados conforme a norma

PRODIST 8, com a decomposição harmônica sendo feita através da decomposição harmônica FFT pelo método borboleta. O HA foi instalado em um *Raspberry Pi 4*, modelo de 8GB de memória RAM. Após a implementação dos indicadores de QEE e grandezas elétricas no protótipo e integração do HA conforme os procedimentos apresentados nas Seções 2.2 e 2.3, tem-se os testes e validações apresentados na próxima seção.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo para se obter os resultados foi a calibração dos sensores de tensão e corrente. Para isso, foi feita a configuração de 127 Volts puramente senoidal e simétrica (ou seja, sem distorção harmônica) por uma fonte programável CA/CA da *California Instruments*, e como carga foi utilizado um banco de carga resistiva equivalente a  $8\Omega$ , para que se obtivesse um sinal de corrente sem defasagem à tensão e sem distorções harmônicas. Após a coleta de 300 amostras de calibração (2,5 horas de observação), o sistema apresentou um erro médio de 2,1% no valor da medição. Após a calibração, foram feitos três casos experimentais, com os resultados apresentados a seguir.

#### 3.1 CASO 1 – ANÁLISE DE CARGAS EM CONDIÇÕES SENOIDAIS PURAS

Neste estudo de caso, foi utilizada a fonte programável a 127 Volts, sem distorções harmônicas, observando três perfis de carga: *i*) carga resistiva de  $15\Omega$ ; *ii*) carga RL ( $R=8\Omega$ ,  $L=15\text{mH}$ ) e *iii*) carga não linear ( $R=20\Omega$ ,  $L=20\text{mH}$  e retificador monofásico). Nestas circunstâncias, o medidor de energia apresentou os indicadores conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Estudo de caso 1 – tensão senoidal, sem harmônicas, em três perfis de cargas.

Carga	$T_L$	$f_p$	$DTT_{95\%}$	$DTT_i_{95\%}$	$DTT_3_{95\%}$
R ( $15\Omega$ )	100% adequado	0,997	Adequado	Adequado	Adequado
RL ( $R=8\Omega$ , $L=15\text{mH}$ )	100% adequado	0,818	Adequado	Adequado	Adequado
R= $20\Omega$ , $L=20\text{mH}$ e retificador	100% adequado	0,963	Adequado	Adequado	Adequado

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Como a tensão é puramente senoidal e não possui oscilações, há somente a análise do fator de potência, que é sensível à observação das grandezas de tensão fornecida e da corrente das cargas que foram ligadas. Neste estudo de caso, somente o caso com carga RL apresentou valor abaixo de 0,92 no fator de potência, apresentando, portanto, violação

no indicador de fator de potência. Os indicadores de tensão ( $T_L$ ) apresentou 100% adequada em razão da fonte de alimentação apresentar estabilidade na tensão fornecida (127V) e os de distorção na tensão não apresentaram inconformidades ( $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_i_{95\%}$  e  $DTT_3_{95\%}$ ), pois a tensão da fonte não foi configurada com níveis de distorções harmônicas.

### 3.2 CASO 2 – ANÁLISE DE CARGAS EM CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS

Foi utilizada a fonte programável em três níveis de tensão e de harmônicas, alimentando uma carga puramente resistiva com o valor de  $15\Omega$ . A primeira configuração, ajustada para os 120 minutos iniciais, apresenta uma tensão de 127V, com distorção harmônica total (DHT) de 5,6% (127V eficaz na fundamental, 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª com 2,5% do valor da fundamental). Na segunda configuração, a fonte foi configurada a 115V por mais 120 minutos, com DHT de 11,2% (115V eficaz na fundamental, 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª com 5% do valor da fundamental). A terceira configuração é de uma tensão de 100V por 120 minutos, com DHT de 14,8% (100V eficaz na fundamental, 3ª e 9ª com 10% do valor da fundamental, mais 5ª, 7ª e 11ª com 2,5% do valor da fundamental).

Para este estudo de caso, os dados foram coletados a cada 20 segundos, para assim atender o critério de 1008 leituras, segundo o estabelecido pelo PRODIST módulo 8. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos, sendo possível perceber que o sistema apresentou os índices voltados à distorção de tensão violados. Na primeira configuração, mesmo em teoria não tendo a violação, há indicativo de excedente de distorção em poucas amostras, devido a possíveis ruídos no sistema de aquisição. Já na segunda e terceira configuração, o sistema identificou as violações no nível de tensão eficaz ( $T_L$ ) e nos níveis de distorção harmônica de tensão ( $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_i_{95\%}$  e  $DTT_3_{95\%}$ ).

Tabela 5 – Estudo de caso 2 – 1008 leituras em diferentes configurações de tensão.

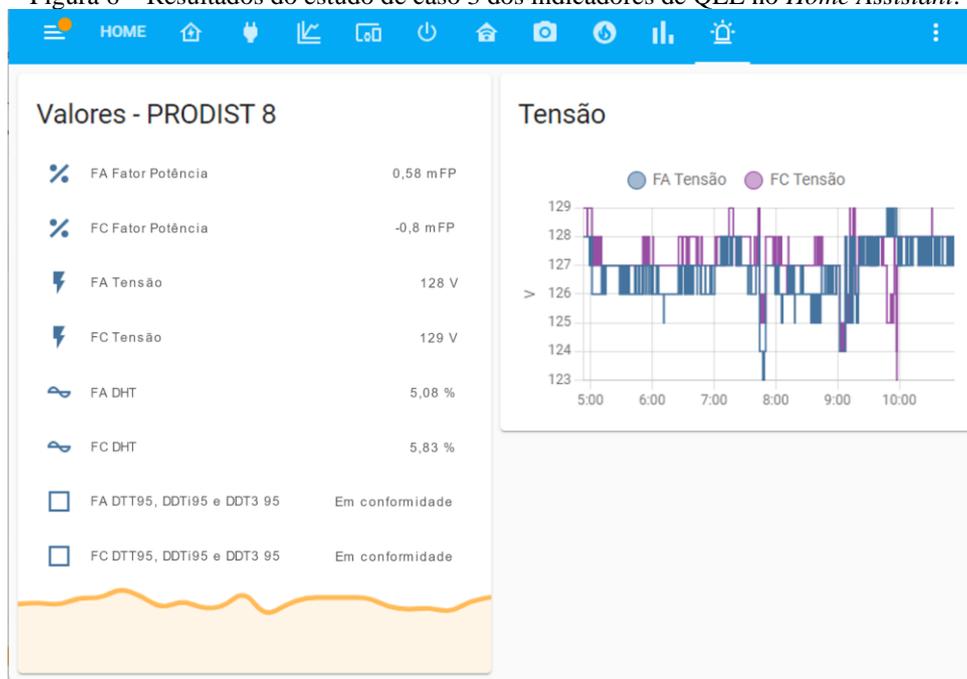
Configuração	$T_L$	$fp$ médio	$DTT_{95\%}$	$DTT_i_{95\%}$	$DTT_3_{95\%}$
- (127V e 336 leituras de DHT de 5,6%)	Adequada 34% Precária 33%	0,998	Violado em 66,5% das leituras	Violado em 69,4% das leituras	Violado em 68,5% das leituras
- (115V e 336 leituras de DHT de 11,2%)	Crítica 33%				
- (100V e 336 leituras de DHT de 14,8%)					

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 3.3 CASO 3 – ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DO HOME ASSISTANT

Neste estudo de caso foi instalado o medidor no PAC de uma residência bifásica e tem-se como propósito apresentar os indicadores no sistema supervisório HA, que foi instalado em um *Raspberry Pi* 4 8GB. O MQTT no HA foi configurado na porta 1883, em uma rede local e o protótipo foi configurado para publicar, na estrutura JSON, as grandezas via MQTT para que o servidor colete os dados. A Figura 6 apresenta um cenário de monitoramento instantâneo dos indicadores, tendo a possibilidade de se observar os indicadores a nível temporal, como o que apresenta na Figura 7. Como se trata de um cenário residencial e por possuir muita carga eletrônica ou nenhuma consumindo energia, o fator de potência aparece em grande maioria abaixo do limite estabelecido pela norma. Mas, ao observar os níveis de tensão, os indicadores se apresentam em conformidade com o estabelecido pelo PRODIST módulo 8. Quanto à comunicação com o HA, o medidor envia os indicadores a cada 1 minuto, tendo estabilidade e favorecendo o armazenamento de dados para a posterior análise para dos indicadores de QEE, sobretudo aos  $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_i_{95\%}$  e  $DTT_3_{95\%}$ .

Figura 6 – Resultados do estudo de caso 3 dos indicadores de QEE no *Home Assistant*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 7 – Estudo de caso 3: observação das grandezas elétricas no Home Assistant.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um medidor de QEE considerando como aspecto o interesse em monitorar e avaliar a QEE por meio dos indicadores, em tempo real e em pós análise, para qualquer tipo de instalação ou condição de fornecimento. Neste caso, foram utilizadas técnicas de processamento de dados e observação de cinco indicadores de QEE baseados na norma nacional PRODIST módulo 8: Tensão eficaz ( $T_L$ ), fator de potência ( $fp$ ) e os indicadores de harmônicas na tensão  $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_i_{95\%}$  e  $DTT_3_{95\%}$ . Os resultados, através de três estudos de caso, dois em laboratório e um em um cenário de instalação elétrica residencial, apresentam que o medidor apresentou funcionamento dentro do adequado, indicando possíveis violações dos indicadores de QEE e tendo uma boa integração com o HA.

Como trabalho futuro, pretende-se expandir os indicadores de QEE embarcados no qualímetro, seguindo os outros indicadores apresentados no PRODIST módulo 8, bem como avaliar e apresentar os indicadores ideias para os cenários residenciais, comerciais e industriais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a fundação Araucária, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Centro Integrado de Pesquisa em Controle e

Automação (CIPECA) pelo suporte financeiro ou estrutural para o desenvolvimento deste projeto.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, Procedimentos. Módulo 8 – qualidade da energia elétrica. **Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL**, 2010.

DECKMANN, S. M.; MELO, E. F. On-line evaluation of voltage quality indexes for harmonic distortion, flicker and sequence components. In: **8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings**. IEEE, 1998. p. 549-554.

DINIZ, I. S.; CARVALHO JÚNIOR, M.; SOUZA, W. A. Tacógrafo Automotivo sem Fio Digital. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 28809-28831, 2019.

EMANUEL, A. E. Summary of IEEE standard 1459: definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. **IEEE transactions on industry applications**, v. 40, n. 3, p. 869-876, 2004.

HASHEMPOUR, Mohammad M. et al. Real-time supervisory control for power quality improvement of multi-area microgrids. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 1, p. 864-874, 2018.

ROSLAN, M. F. et al. Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management. **Applied Energy**, v. 240, p. 583-607, 2019.

SANKARAN, C. **Power quality**. CRC press, 2017.

SHIN, Y.-J. et al. Power quality indices for transient disturbances. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 1, p. 253-261, 2005.

SOUZA, Wesley Angelino et al. Power quality, smart meters and additional information from different power terms. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 1, p. 158-165, 2015.

GARCIA, Fernando Deluno et al. Power metering: History and future trends. In: **IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)**. IEEE, 2017. p. 26-33.

SOUZA, Wesley Angelino de. Estudos de técnicas de análise e tecnologias para o desenvolvimento de medidores inteligentes de energia residenciais, **Tese de Doutorado**, UNICAMP, 2016.

SWARTZLANDER, Earl E.; SALEH, Hani HM. FFT implementation with fused floating-point operations. **IEEE Transactions on Computers**, v. 61, n. 2, p. 284-288, 2010.