

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



**MURILO PORTO AMARAL**

**MÓDULO AFERIDOR DE QUALIDADE  
DA ENERGIA ELÉTRICA**

VITÓRIA – ES  
MAIO/2017

MURILO PORTO AMARAL

## **MÓDULO AFERIDOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Parte manuscrita da Proposta de Projeto de Graduação do aluno **Murilo Porto Amaral**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz de Freitas Vieira  
Co-orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin

VITÓRIA – ES  
MAIO/201

MURILO PORTO AMARAL

## **MÓDULO AFERIDOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Murilo Porto Amaral, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 26, de maio de 2017.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. José Luiz de Freitas Vieira**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Profa. Dra. Jussara Farias Fardin**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Co-orientadora**

---

**Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

---

**Profa. Dra. Eliete Maria de Oliveira Caldeira**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

*Aos meus pais, meus melhores amigos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos são monótonos e repetitivos, mas sou impelido a agradecer àqueles que foram importantes em todos esses anos. Em primeiro lugar aos meus pais, que são os responsáveis por inculcar em mim esse espírito questionador e transgressor e que sempre me deram tanto apoio e carinho.

À minha família, pelo amor e ajuda incondicionais, sem os quais a conclusão deste trabalho seria impossível. Aos meus amigos e colegas que me ajudaram nos momentos de dúvidas e dificuldades e que nunca deixaram de tentar ter um diálogo sério e coerente comigo, por maiores que fossem meus esforços em desencorajá-los.

Ao PET Elétrica, grupo que me fez refletir sobre vários aspectos que tinha como imutáveis e que hoje vejo de forma completamente diferente e ainda me deu amigos e companheiros que levo e levarei para toda a vida.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, por todo o conhecimento que insistiram tanto em me passar que acabei tendo que aprender alguma coisa. Ainda pela confiança em usar o laboratório com vários equipamentos perigosos sem supervisão, impressionantemente acabou dando tudo certo no final. Me parece que tiveram razão.

Em especial aos professores José Luiz e Jussara, que se esforçaram em me orientar e que realmente fizeram com que este trabalho fosse concluído, por vezes oferecendo equipamentos ou simplesmente aconselhando e encorajando para seguir adiante. A todos vocês o meu muito obrigado.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um módulo aferidor que é capaz de adquirir os fatores que definem a qualidade da energia elétrica entregue em um ponto e disponibilizá-los na internet. O protótipo desenvolvido utilizou os microcontroladores ATmega328P-PU e o STM32F407VG, os quais se comunicam através do protocolo *SPI (Serial Peripheral Interface)* e enviam os dados a um servidor.

O servidor disponibiliza os dados através do programa supervisor ScadaBR, capaz de se conectar com a internet e enviar relatórios das variáveis medidas.

O protótipo do módulo aferidor desenvolvido pode realizar a medição das seguintes variáveis: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicas até a 25ª ordem, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência, em concordância com o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) do ano de 2016.

O protótipo desenvolvido suporta um nível de tensão de até 220V eficazes, corrente de 12 A eficazes e potência aparente de 3000VA.

A partir do protótipo implementado obteve-se o registro das seguintes variáveis da rede elétrica: o valor eficaz de tensão, as distorções harmônicas individuais de tensão até a 25ª harmônica e a distorção total de tensão, o valor da frequência e o fator de *ripple*. Os valores foram medidos a partir de uma tomada de 127 volts, a vazio e com cargas não-lineares.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perda financeira em vários ramos da indústria com paradas de plantas de até 1 minuto.....	15
Figura 2 – Limites da classificação da tensão em regime permanente .....	19
Figura 3 – Nível de sensação de cintilação relacionado à Equação (11) .....	24
Figura 4 – Sensor de corrente LA55-P.....	28
Figura 5 – Sensor de tensão LV20-P .....	28
Figura 6 – Circuito para a obtenção das constantes de proporcionalidade dos sensores .....	29
Figura 7 – Circuito de adequação dos sinais de tensão e corrente.....	31
Figura 8 – Placa do circuito de adequação .....	32
Figura 9 – Filtro <i>Sallen-Key</i> de 8ª ordem implementado.....	34
Figura 10 – Diagrama de módulo de Bode do filtro de 8ª ordem implementado.....	34
Figura 11 – Placa de circuito do filtro desenvolvido .....	35
Figura 12 – Diagrama esquemático da placa de comunicação .....	36
Figura 13 – Fotografia da placa de comunicação implementada.....	36
Figura 14 – Diagrama de blocos do STM32F407VGT6.....	38
Figura 15 – Diagrama de blocos funcional do microcontrolador ATmega328P-PU embarcado no Arduino UNO.....	39
Figura 16 – Protótipo desenvolvido .....	40
Figura 17 – Fluxograma do programa embarcado na placa de desenvolvimento STM32F4DISCOVERY.....	42
Figura 18 – Senoide com tensão de <i>ripple</i> .....	45
Figura 19 – Fluxograma do programa embarcado no microcontrolador Arduino UNO .....	46
Figura 20 – Tela inicial do programa supervisorio .....	47
Figura 21 – Tela alternativa do programa supervisorio .....	48
Figura 22 – Tela inicial típica do programa supervisorio .....	49
Figura 23 – Tela alternativa típica do programa supervisorio.....	50
Figura 24 – Tensão eficaz (V) no intervalo de 0,2 segundos e no intervalo de 10 minutos ao longo do tempo .....	52
Figura 25 – Corrente eficaz (A) no intervalo de 0,2 segundos e no intervalo de 10 minutos ao longo do tempo .....	52
Figura 26 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 6ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	53

Figura 27 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 13 <sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	53
Figura 28 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 19 <sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	54
Figura 29 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 25 <sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	54
Figura 30 – Fator de potência (abs) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo ...	55
Figura 31 – Frequência (Hz) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	55
Figura 32 – Potência ativa (W) e aparente (VA) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	56
Figura 33 – Fator de <i>ripple</i> (%) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo .....	56
Figura 34 – Tensão eficaz (V) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	58
Figura 35 – Frequência (Hz) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	58
Figura 36 – Fator de <i>ripple</i> (%) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	59
Figura 37 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 7 <sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	59
Figura 38 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 13 <sup>a</sup> harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	60
Figura 39 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 19 <sup>a</sup> harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	60
Figura 40 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 25 <sup>a</sup> harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	61
Figura 41 – Distorções harmônicas individuais de tensão (%) até a 7 <sup>a</sup> harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo .....	61



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Simbologia utilizada para o cálculo de harmônicos .....	21
Quadro 2 – Distorção harmônica total máxima por nível de tensão do barramento.....	22
Quadro 3 – Distorção harmônica individual máxima de tensão por nível de tensão do barramento.....	22
Quadro 4 – Simbologia utilizada para o cálculo de flutuação de tensão .....	23
Quadro 5 – Valores para a classificação de flutuação de tensão em relação à FT .....	25
Quadro 6 – FT em relação à tensão do barramento .....	25
Quadro 7 – Simbologia utilizada para o cálculo de variação de tensão de curta duração ....	26
Quadro 8 – Classificação da variação de tensão de curta duração .....	26

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Limites para uma tensão de 127V de acordo com a Figura 2 .....	20
Tabela 2 – Valores medidos para obtenção das constantes de proporcionalidade do sensor de tensão e de corrente.....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
ETT	Elevação Temporária de Tensão
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração
CI's	Circuitos Integrados
DMA	Direct Memory Access
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
SDIO	Secure Digital Input Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
CAN	Controller Area Network
USB	Universal Serial Bus
MIPS	Milhões de Instruções Por Segundo

## LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo (s)
R	Valor da resistência do resistor ( $\Omega$ )
V(t)	Tensão instantânea (V)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)
i	Janela de amostragem (adimensional)
V <sub>rmsi</sub>	Valor da tensão RMS da janela “i” correspondente (V)
N	Número de amostras da tensão obtida na janela “i” correspondente (adimensional)
V <sub>j</sub>	Valor da tensão de uma das “N” amostras da janela “i” correspondente (V)
V <sub>rmsj</sub>	Valor RMS da tensão integralizada referente ao período de 10 minutos (V)
J	Número de janelas obtidas no período de 10 minutos (adimensional)
DRP	Duração relativa da transgressão para tensão precária (s)
DRC	Duração relativa da transgressão para tensão crítica (s)
n <sub>lp</sub>	Número de janelas onde foi detectado a tensão com valor RMS na faixa precária
n <sub>lc</sub>	Número de janelas onde foi detectado a tensão com valor RMS na faixa crítica
DRPM	Duração relativa da transgressão máxima de tensão precária (s)
DRCM	Duração relativa da transgressão máxima de tensão crítica (s)
f <sub>p</sub>	Fator de potência (adimensional)
P	Potência ativa (W)
Q	Potência reativa (VAr)
DIT <sub>h</sub> %	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h (%)
DTT %	Distorção harmônica total de tensão (%)
V <sub>h</sub>	Tensão harmônica de ordem h (V)
H	Ordem harmônica (adimensional)
H <sub>máx</sub>	Ordem harmônica máxima (adimensional)
H <sub>mín</sub>	Ordem harmônica mínima (adimensional)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS IMPORTANTES NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 Tensão em Regime Permanente .....	18
2.2 Fator de potência .....	20
2.3 Harmônicos .....	21
2.4 Desequilíbrio de tensão .....	23
2.5 Flutuação de tensão .....	23
2.6 Variação de tensão de curta duração .....	25
2.7 Variação de frequência .....	27
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO AFERIDOR DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	<b>28</b>
3.1 <i>Hardware</i> .....	28
3.1.1 Sensores e circuitos de adequação .....	28
3.1.2 Filtro .....	33
3.1.3 Placa de comunicação .....	35
3.1.4 O Microcontrolador STM32F407VGT6.....	36
3.1.5 O Microcontrolador ATmega328P-PU.....	38
3.1.6 O Servidor .....	40
3.2 <i>Software</i> .....	41
3.2.1 A Placa de Desenvolvimento STM32F4DISCOVERY .....	41
3.2.1.1 Tensão eficaz verdadeira ( <i>true RMS</i> ).....	43
3.2.1.2 Fator de potência .....	43
3.2.1.3 Harmônicos .....	44
3.2.1.4 Desequilíbrio de tensão .....	44
3.2.1.5 Tensão de <i>Ripple</i> .....	44
3.2.1.7 Variação em frequência .....	45
3.2.2 Programa embarcado no microcontrolador Arduino UNO.....	45
3.2.3 O programa supervisor ScadaBR .....	46
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>49</b>
4.1 Teste com conexão na rede elétrica.....	49

4.2 Discussões.....	62
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No início da distribuição da energia elétrica, as cargas consistiam em sua quase totalidade de resistências, indutâncias e capacitâncias. Tais elementos não geram descontinuidades e distorções nas formas de onda de corrente e na tensão de alimentação da rede de distribuição [1].

No entanto, este cenário foi alterado significativamente com o advento dos semicondutores de potência, tais como: diodo, transistor, tiristor, *MOSFET*, *IGBT*, etc. Tais elementos semicondutores proporcionaram o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos que possibilitam diversas facilidades no controle dos mais diversos tipos de carga. Entretanto, eles provocam descontinuidades e distorções na corrente da rede elétrica, além de distorções na tensão de alimentação da rede de distribuição. Por outro lado, tais equipamentos que contam com elementos semicondutores são sensíveis à qualidade da energia elétrica, já que algumas faltas ou falhas de fornecimento de energia elétrica, mesmo que de curta duração, podem resultar em quedas globais nas redes de distribuição onde estão inseridos [1-3].

No Brasil, a ANEEL define os pontos analisados para uma aferição da qualidade de energia elétrica através do Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica [4] sendo este, apenas um dos vários documentos denominados de PRODIST [5], neste caso será usado como referência a versão de 2016. Os pontos para análise são:

- tensão em regime permanente;
- fator de potência;
- harmônicos;
- desequilíbrio de tensão;
- flutuação de tensão;
- variação de tensão de curta duração;
- variação de frequência.

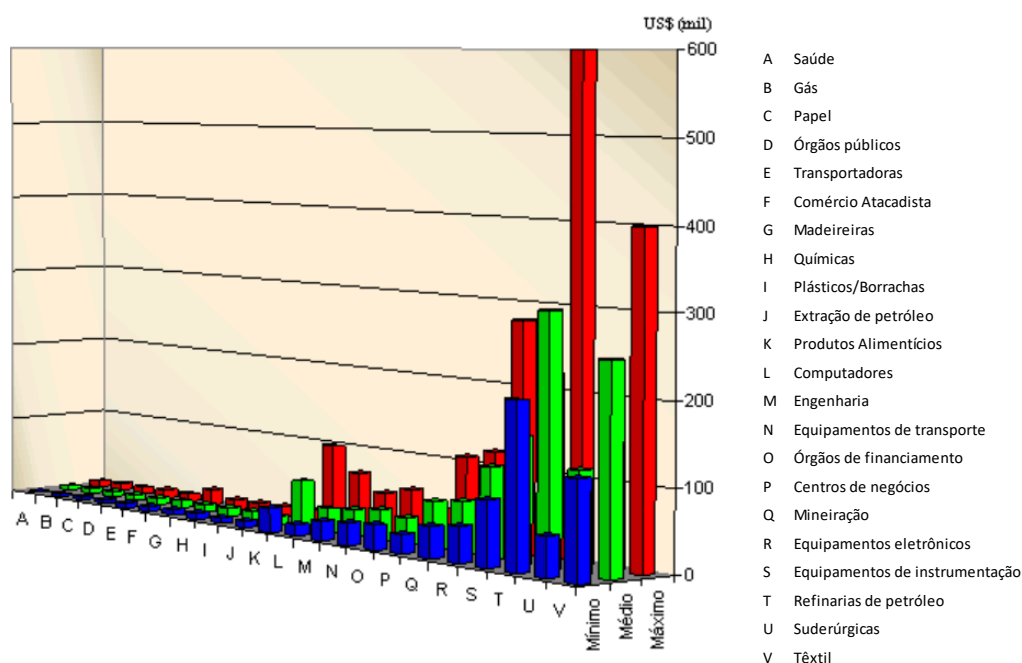
Um outro ponto importante que deve ser considerado é a falta de acompanhamento dos pontos individuais de fornecimento de energia elétrica dos circuitos residenciais, comerciais e de pequenas e microempresas. Existem diversos equipamentos que podem medir com precisão tais pontos. Entretanto, eles se mostram onerosos para os padrões da pequena e microempresa e, conseqüentemente, inviáveis para os consumidores residenciais.

Além disso, uma preocupação crescente é com o desperdício da energia elétrica por cargas que poderiam não estar consumindo em determinados horários, ou seja, poderiam ser desconectadas da rede elétrica. Uma outra questão diz respeito a incapacidade dos equipamentos de se auto protegerem de faltas e falhas da rede elétrica de alimentação quando se emprega somente os dispositivos de proteção definidos pelas normas. Uma análise detalhada de qualidade da energia elétrica no ponto de fornecimento, por exemplo, através de um relatório de consumo e de qualidade da energia elétrica entregue, poderia facilitar a adoção de medidas para o decréscimo do consumo de energia e para a melhoria de qualidade da energia fornecida.

A qualidade de energia, sob a ótica do consumidor, pode assumir diferentes interpretações. Para os consumidores residenciais o mais importante é a continuidade do fornecimento com tensão em valor adequado. Entretanto, no setor industrial, em geral, assume-se que a maior preocupação é com a não interrupção de seus processos, fato que pode ser gerado por faltas, falhas ou perturbações na rede. Em uma parada de um processo industrial, muitas vezes é necessário refugar todo o material que estava na linha de produção, já que o produto final poderia ficar fora dos padrões definidos por norma [6].

Outra questão relevante é a perda financeira decorrente da falta de qualidade no fornecimento da energia elétrica. A Figura 1 mostra a perda financeira para vários ramos de atividade.

Figura 1 – Perda financeira em vários ramos da indústria com paradas de plantas de até 1 minuto





Outra fonte de preocupação é a possível falha do sistema de proteção que, associado a qualidade inadequada de fornecimento da energia elétrica, podem levar à queima de equipamentos sensíveis. Tais fatos podem provocar a queima dos equipamentos conectados à rede elétrica. Por isso, é imperioso que os dispositivos de proteção e seccionamento apresentem capacidade necessária para a abertura dos circuitos, nos casos que a segurança não pode ficar comprometida no universo industrial, comercial ou residencial.

Durante décadas a qualidade de energia não foi devidamente considerada pelos órgãos reguladores brasileiros. No entanto, a crescente demanda por energia elétrica, impõe dificuldades às distribuidoras para manter uma qualidade aceitável de fornecimento de energia. A situação fica ainda mais crítica se os parâmetros de qualidade não forem monitorados. Além disso, o perfil de consumo também é responsável pela qualidade da energia elétrica, principalmente, devido ao uso crescente de cargas não-lineares. Desta forma, há uma tendência de que tanto as formas de onda da tensão de fornecimento como as da corrente da rede elétrica se tornem cada vez mais distorcidas.

Do ponto de vista do consumidor é interessante que a qualidade do fornecimento da energia elétrica seja monitorada, principalmente para verificação se as distribuidoras de energia elétrica estão atendendo os parâmetros definidos pelos órgãos reguladores. Com isso, possíveis solicitações de ressarcimentos aos consumidores pelas distribuidoras de energia estariam tecnicamente embasadas.

Do ponto de vista das distribuidoras de energia elétrica, o monitoramento da qualidade da energia elétrica permitiria a verificação dos locais em que a rede de distribuição não atende aos parâmetros de desempenho. Desta forma, as distribuidoras podem atuar rapidamente para compensar os locais da rede de distribuição para que eles retornem à condição de atendimento dos parâmetros de desempenho, minimizando a aplicação de multas pelos órgãos reguladores.

Combinando com as novas tendências tecnológicas, como as redes elétricas inteligentes (*smart grids*), medidores de energia elétrica inteligentes, conectados à internet, passam a ter interesse crescente. Tais medidores poderiam proporcionar além do consumo de energia, apresentar diversos parâmetros de qualidade da energia elétrica.

Nessa linha, pode-se inferir que devem ser realizados investimentos em pesquisas e desenvolvimento que fomentem a implementação de equipamentos de medição que proporcionem, além do consumo, os principais parâmetros de qualidade da energia elétrica. Isso permitiria além da verificação e acompanhamento do consumo de energia, a fiscalização da qualidade do fornecimento pelos consumidores. Assim, deve ser incentivada a investigação e o desenvolvimento de equipamentos de medição que permitam a análise do consumo e da qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Estima-se que cerca de 10% de toda a energia elétrica consumida no Brasil é desperdiçada. Dentre os mais diferentes motivos, pode-se citar um deles, que é a grande quantidade de equipamentos elétricos e eletrônicos que não possuem automação intrínseca que possibilita aos mesmos se desligar ou mesmo reduzir a sua potência quando não há pessoas no local, como por exemplo: aparelhos de ar condicionado, sistemas de iluminação, etc. [7].

O presente projeto foi idealizado dentro do tema: “casa inteligente”, sendo um elemento passível de proporcionar uma automação residencial. A proposição visou o desenvolvimento e a implementação de um módulo aferidor de baixo custo e baixo consumo de energia elétrica, o mesmo ainda deveria ser capaz de realizar a aquisição dos dados para a computação do consumo e da qualidade do fornecimento da energia elétrica e ainda que também pudesse ter atuação na carga.

O projeto deve prever a possibilidade de expansão, de forma a gerar uma plataforma que permita a comunicação entre uma rede de medidores internos interligados a um servidor central de processamento.

O capítulo 2 apresenta uma descrição de todos os parâmetros utilizados no projeto, para a análise de qualidade de energia, parâmetros estes definidos em [4]. O capítulo 3 trata do desenvolvimento do projeto, iniciando pela obtenção dos dados e explicando até como opera a interface final com o usuário. No capítulo 4 é apresentado e discutido os resultados das medições realizadas. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões de continuidade do trabalho. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS IMPORTANTES NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O módulo 8 do PRODIST [4] cita várias características a serem consideradas durante a análise da qualidade da energia, assim, discorre-se sobre todos esses aspectos a seguir.

### 2.1 Tensão em Regime Permanente

Este fator mede a qualidade e a continuidade da tensão entregue em uma instalação por um longo período de tempo. Um equipamento de medição deve atender aos seguintes requisitos mínimos:

- taxa amostral: 16 amostras por ciclo.
- conversor analógico/digital de sinal de tensão de 12 bits;
- precisão de até 1%.

Esta medida deve ser feita 1008 vezes consecutivas em intervalos de 10 minutos cada, no entanto, exclui-se essa necessidade quando são detectados afundamentos ou elevações momentâneas dos níveis da tensão bem como de interrupções momentâneas da mesma. Para que sejam feitas 1008 medidas consecutivas em intervalos de 10 minutos totaliza-se um período de 168 horas, ou 7 dias [4].

Os valores eficazes deverão ser calculados em janelas consecutivas em que cada uma delas compreende 15 ciclos, ou seja, de 0,25 segundos. Assim, tem-se o cálculo do valor eficaz da tensão segundo a Equação (1).

$$V_{\text{rms}_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k^2} \text{ [V]} \quad (1)$$

Onde:

- $V_{\text{rms}_i}$ : Valor da tensão eficaz da janela “i” correspondente;
- N: Número de amostras da tensão obtida na janela “i” correspondente;
- $V_k$ : Valor da tensão de uma das “N” amostras da janela “i” correspondente.

Assim, em um período de 10 minutos, será calculado um novo valor da tensão eficaz para esse novo intervalo segundo a Equação (2).

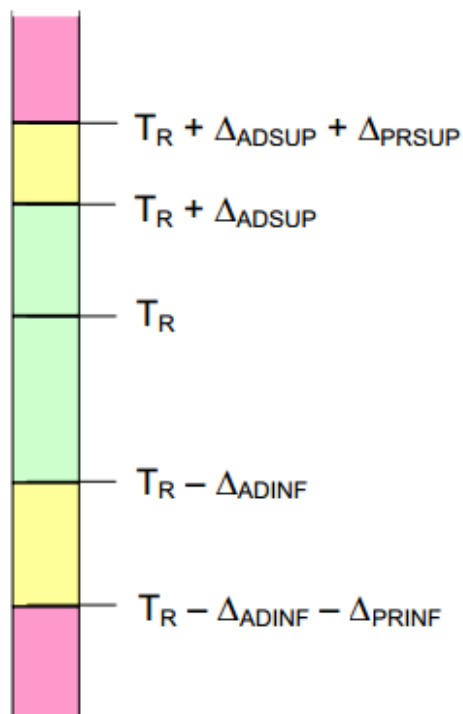
$$V_{\text{rms}j} = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{i=1}^J V_{\text{rms}i}^2} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

Sendo:

- $V_{\text{rms}j}$ : Valor eficaz da tensão integralizada referente ao período de 10 minutos;
- $J$ : Número de janelas obtidas no período de 10 minutos;
- $V_{\text{rms}i}$ : Valor da tensão eficaz da janela “i”.

Ainda no módulo 8 do PRODIST [4] é aconselhado que a tensão medida de acordo com a Equação (2) não ultrapasse os limites apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Limites da classificação da tensão em regime permanente



Na Figura 2, na cor verde se encontram as faixas adequadas de tensão, em amarelo as precárias e em rosa as críticas. Esses valores, para 127V estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites para uma tensão de 127V de acordo com a Figura 2

Faixa	Tensão Inferior (V)	Tensão Superior (V)
Verde	117	133
Amarelo Superior	133	140
Amarelo Inferior	109	117

Fonte: Produção do próprio autor

Realizadas as leituras, é necessário calcular o DPR (duração relativa da transgressão para tensão precária) e o DRC (duração relativa da transgressão para tensão crítica), segundo a Equação (3) e a Equação (4).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} 100 [\%] \quad (3)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} 100 [\%] \quad (4)$$

Onde:

- nlp: número de janelas onde foi detectada a tensão no nível precário;
- nlc: número de janelas onde foi detectada a tensão no nível crítico.

O DPR máximo é de 3% e o DRC máximo é de 0,5%. Os outros indicadores descritos em [4] que dizem respeito ao regime em tensão permanente, como os indicadores coletivos e de compensação ao consumidor, fogem ao escopo deste projeto e não serão tratados.

## 2.2 Fator de potência

O fator de potência deverá ser calculado, conforme definido em [4], de acordo com os valores medidos de potência ativa (P) e reativa (Q) ou de suas respectivas energias (EA e ER), de acordo com a Equação (5) e a Equação (6).

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (6)$$

O valor do fator de potência não poderá ser inferior a 0,92 para tensões inferiores a 230kV indutivos ou capacitivos, de acordo com a regulamentação vigente.

### 2.3 Harmônicos

Quando a forma de onda não está em um formato senoidal perfeito, é dito que são os efeitos dos harmônicos da rede. São ondas de valores de frequência múltiplos da original que são somadas e, se apresentarem uma amplitude significativa, alteram o seu formato. Podem ocorrer deformidades tanto na tensão quanto na corrente.

Segundo [4], deve-se analisar desde a frequência fundamental até a 25ª harmônica para o cálculo da distorção harmônica total ( $H_{\text{máx}} = 25$ ). O Quadro 1 apresenta a simbologia utilizada na determinação da distorção harmônica.

Quadro 1 – Simbologia utilizada para o cálculo de harmônicos

Identificação da Grandeza	Símbolo
<b>Distorção harmônica individual de tensão de ordem h</b>	DIT <sub>h</sub> %
<b>Distorção harmônica total de tensão</b>	DTT %
<b>Tensão harmônica de ordem h</b>	V <sub>h</sub>
<b>Ordem harmônica</b>	H
<b>Ordem harmônica máxima</b>	H <sub>máx</sub>
<b>Ordem harmônica mínima</b>	H <sub>min</sub>
<b>Tensão fundamental medida</b>	V <sub>1</sub>

Fonte: PRODIST, 2016

A determinação da DIT<sub>h</sub>% e da DTT% é obtida pelas Equações (7) e (8).

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (7)$$

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (8)$$

A distorção harmônica total deve obedecer aos limites descrito no Quadro 2.

Quadro 2 – Distorção harmônica total máxima por nível de tensão do barramento

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: PRODIST, 2016

Os valores harmônicos individuais também devem obedecer ao descrito no Quadro 3.

Quadro 3 – Distorção harmônica individual máxima de tensão por nível de tensão do barramento

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	$\geq 15$	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	$\geq 6$	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Produção do próprio autor

## 2.4 Desequilíbrio de tensão

É um fenômeno caracterizado pela regulação inadequada do defasamento de 120° entre as fases do circuito. O fator de desequilíbrio (FD%) pode ser calculado segundo a Equação (9) e a Equação (10).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (10)$$

Onde  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  são os valores eficazes de linha de cada fase. O fator de desequilíbrio calculado deve ser inferior a 2%.

## 2.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é a variação do valor eficaz da tensão, podendo ser repetitiva ou esporádica. Em [4] é definida a simbologia empregada na determinação deste fator, como descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Simbologia utilizada para o cálculo de flutuação de tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
<b>Severidade de Curta Duração</b>	Pst
<b>Severidade de Longa Duração</b>	Plt
<b>Valor diário do indicador Pst que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24hs</b>	PstD95%
<b>Valor semanal do indicador Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos</b>	PltS95%
<b>Fator de Transferência</b>	FT

Fonte: PRODIST, 2016

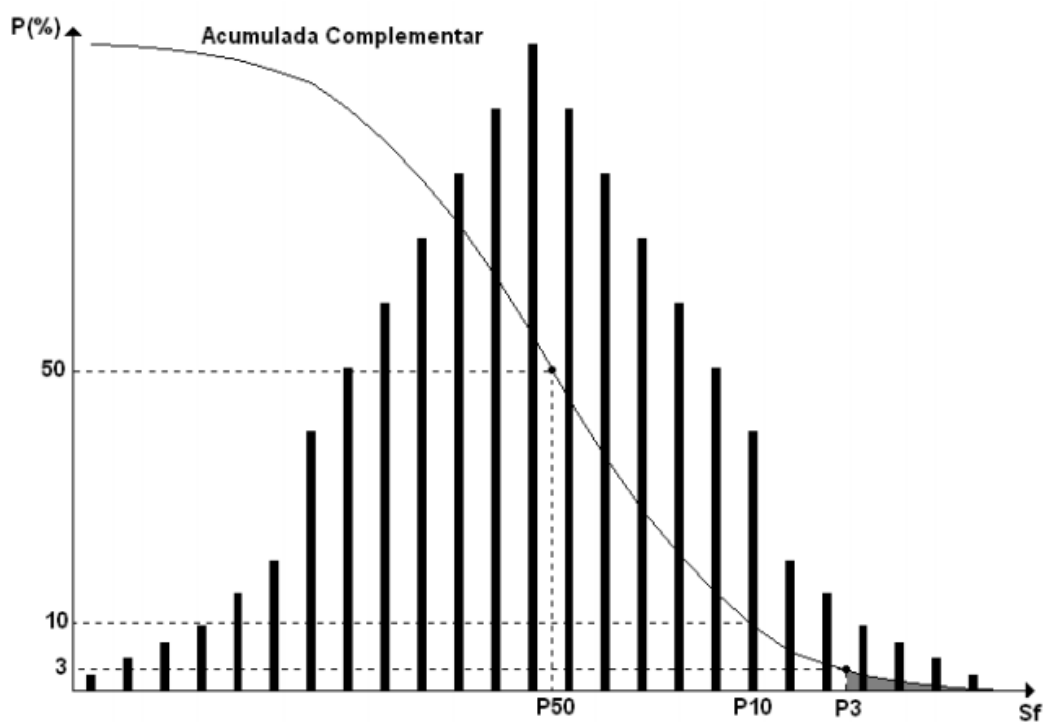


As equações para os cálculos de Pst e Plt estão dispostos na Equação (11) e na Equação (12), respectivamente.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (11)$$

Onde  $P_i$  ( $i = 0,1; 1; 3; 10; 50$ ) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante os Procedimentos de Distribuição  $i$  % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, e de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*. A Figura 3 apresenta o nível de sensação de cintilação relacionado à Equação (11).

Figura 3 – Nível de sensação de cintilação relacionado à Equação (11)



Fonte: PRODIST, 2016

O Plt é calculado com 12 amostras consecutivas de Pst, portanto, tem-se:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Pst_i)^3} \quad (12)$$

O Pst deve ser calculado em um período contínuo de 10 minutos, de modo análogo à tensão eficaz. Assim, 12 amostras consecutivas de Pst geram um Plt. Em um período de 24 horas de medições de Pst, tem-se o PstD95%. Com o maior valor de Pst95% encontrado em um período de 7 dias, tem-se o PltS95%. É fácil encontrar esses valores quando se separa os maiores valores encontrados no período (7 para o PstD95% e 4 para o PltS95%) e tem-se como resultado o menor entre eles. Os valores adequados estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Valores para a classificação de flutuação de tensão em relação à FT

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
<b>Adequado</b>	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
<b>Precário</b>	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0,8 – 1,6 p.u. / FT
<b>Crítico</b>	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Fonte: PRODIST, 2016

Os valores de FT são definidos, por faixa de tensão, como apresentado no Quadro 6. Cabe ressaltar, que os valores de tensão devem ser mantidos em níveis adequados.

Quadro 6 – FT em relação à tensão do barramento

Tensão nominal do barramento	FT
Tensão do barramento $\geq 230$ kV	0,65
$69$ kV $\leq$ Tensão do barramento $< 230$ kV	0,8
Tensão do barramento $< 69$ kV	1

Fonte: PRODIST, 2016

## 2.6 Variação de tensão de curta duração

A variação de tensão de curta duração (VTCD) é caracterizada como sendo um desvio significativo de tensão em curto intervalo de tempo [4]. A terminologia empregada para a VTCD é descrita no Quadro 7.

Quadro 7 – Simbologia utilizada para o cálculo de variação de tensão de curta duração

<b>Identificação do Distúrbio</b>	<b>Sigla</b>
<b>Varição de Tensão de Curta Duração</b>	VTCD
<b>Interrupção Momentânea de Tensão</b>	IMT
<b>Afundamento Momentâneo de Tensão</b>	AMT
<b>Elevação Momentânea de Tensão</b>	EMT
<b>Interrupção Temporária de Tensão</b>	ITT
<b>Afundamento Temporário de Tensão</b>	ATT
<b>Elevação Temporária de Tensão</b>	ETT

Fonte: PRODIST, 2016

Os distúrbios na tensão também são caracterizados pelo intervalo de tempo em que ocorrem, como descrito no Quadro 8.

Quadro 8 – Classificação da variação de tensão de curta duração

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (RMS)</b>
<b>Varição Momentânea de Tensão</b>	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
<b>Varição Temporária de Tensão</b>	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u.

Fonte: PRODIST, 2016

Cabe ressaltar que a determinação dos parâmetros relativos à tensão foi detalhada na seção 2.1.

## 2.7 Variação de frequência

A frequência medida aceitável deve estar entre os valores de 59,9Hz e 60,1Hz em regime contínuo. A frequência também não pode sair da faixa de 60,5Hz até 59,5Hz por mais de 30 segundos, havendo assim a necessidade do desligamento da carga para que haja uma adequação do equilíbrio carga-rede de alimentação. Também é necessário o desligamento caso ocorra as seguintes condições:

- não pode exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz em condições extremas;
- pode permanecer acima de 62Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- pode permanecer abaixo de 58,5Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO AFERIDOR DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Para uma maior organização, optou-se por descrever o desenvolvimento do protótipo pelo seu *hardware* e pelo seu *software*. Assim, o texto descreve inicialmente o *hardware* implementado e, posteriormente, é descrito o *software* desenvolvido.

#### 3.1 Hardware

##### 3.1.1 Sensores e circuitos de adequação

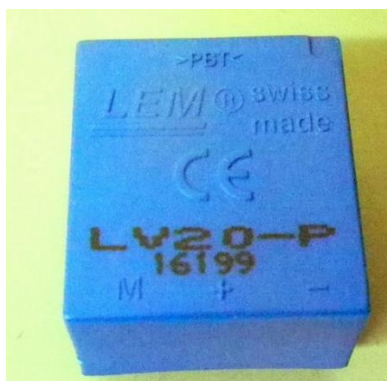
Os sensores utilizados para o desenvolvimento do protótipo foram o sensor de corrente LA55-P e o sensor de tensão LV20-P [9, 10], ambos fabricados pela LEM, os quais são mostrados na Figura 4 e na Figura 5.

Figura 4 – Sensor de corrente LA55-P



FONTE: DACPOL, 2013.

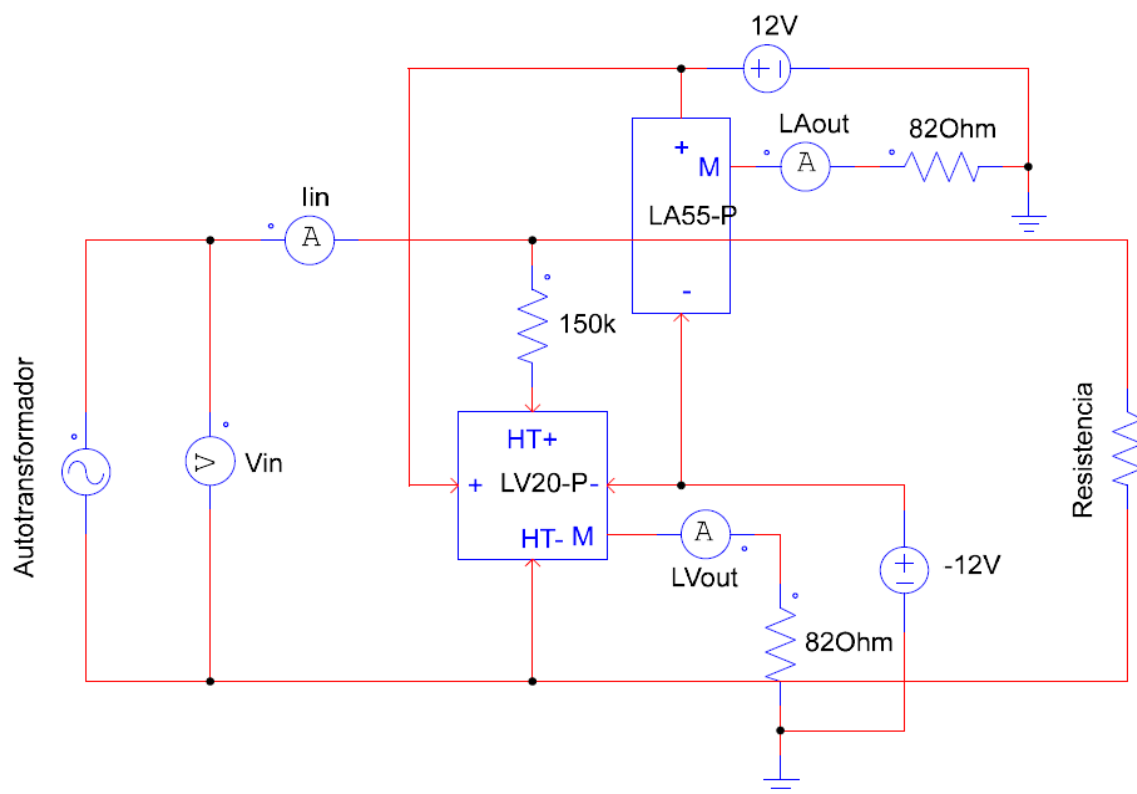
Figura 5 – Sensor de tensão LV20-P



FONTE: eBay, 2013.

Para a obtenção das constantes de proporcionalidade dos sensores, foi implementado o circuito mostrado na Figura 6, o qual utilizou uma resistência de chuveiro e um autotransformador.

Figura 6 – Circuito para a obtenção das constantes de proporcionalidade dos sensores



FONTE: Produção próprio autor.

A partir de diversos ensaios realizados, foram obtidos valores que relacionam  $V_{in}$  e  $LV_{out}$ , bem como, entre  $I_{in}$  e  $LA_{out}$ . Os valores obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Desenvolveu-se então uma rotina no Matlab® para obter a função de transferência de ambos sensores. Com isso, foi possível projetar os circuitos de adequação de sinais de corrente e tensão para serem processados pelo microcontrolador utilizado no protótipo. A listagem do programa desenvolvido se encontra no Anexo A.

As Equações (13) e (14) descrevem as relações de proporcionalidade obtidas nos ensaios dos sensores de corrente e tensão, respectivamente.

$$I_{out}[A] = I_{in}[A] * 10^{-3} \quad (13)$$

$$I_{out}[A] = V_{in}[V] * 1,60888.10^{-4} \quad (14)$$

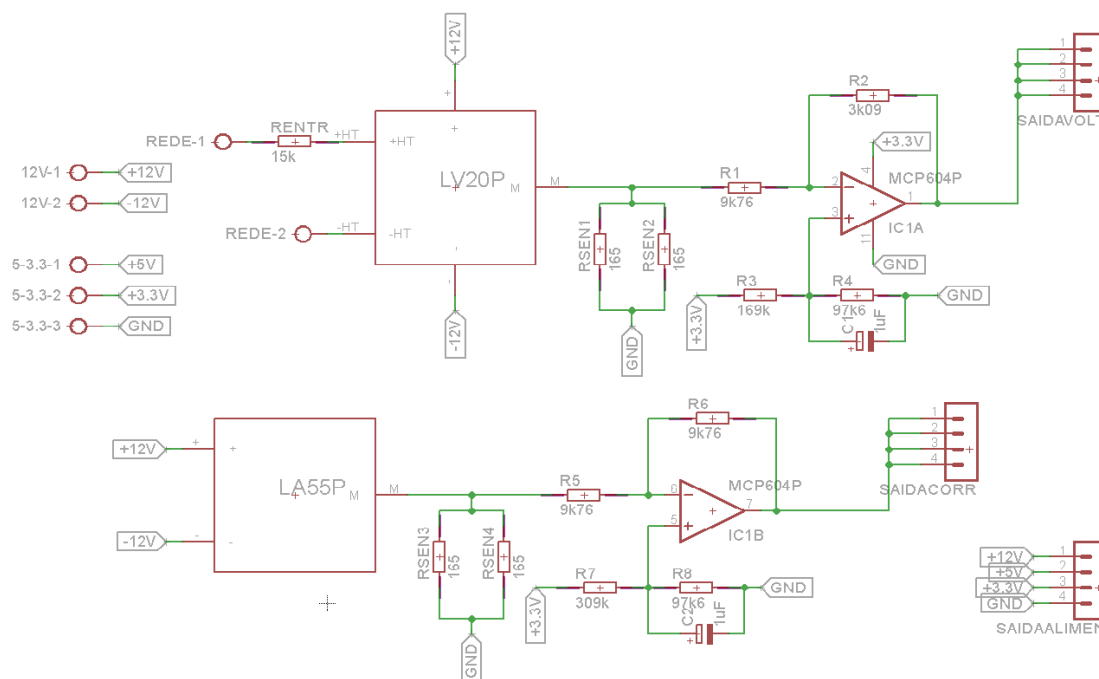
Tabela 2 – Valores medidos para obtenção das constantes de proporcionalidade do sensor de tensão e de corrente

<b>V<sub>in</sub> [V RMS]</b>	<b>L<sub>Vout</sub> [mA RMS]</b>	<b>I<sub>in</sub> [A RMS]</b>	<b>L<sub>Aout</sub> [mA RMS]</b>
104,8	16,8	2,0	2,0
106,9	17,1	2,5	2,5
108,1	17,3	3,5	3,5
110,1	17,7	4,5	4,5
113,8	18,2	5,5	5,5
117,1	18,8	6,5	6,5
118,8	19,1	7,5	7,5
120,4	19,3	8,5	8,5
122,8	19,8	9,5	9,5
125,3	20,2	10,5	10,5
127,9	20,6	11,5	11,5
128,8	20,8	12,5	12,5
131,4	21,2	13,5	13,5
133,4	21,5	14,5	14,5
136,1	21,9	15,5	15,5
138,4	22,4	16,5	16,5
140,7	22,7	17,5	17,5
142,9	23,0	18,5	18,5
144,1	23,3	20,0	20,0

FONTE: Produção próprio autor.

A partir das funções de transferência, foram desenvolvidos os circuitos de adequação de sinais mostrados na Figura 7. Tais circuito realiza a adequação de sinais, para que o valor máximo de cada uma das grandezas não ultrapasse os valores máximos de entrada do microcontrolador. Esse passo é importante, já que a adequação de sinais minimiza os erros de quantização.

Figura 7 – Circuito de adequação dos sinais de tensão e corrente



FONTE: Produção próprio autor.

Cabe destacar que o protótipo utiliza diversos níveis de tensão, cujo objetivo foi o de minimizar o espaço por ele ocupado. Para tanto, foi utilizada uma fonte chaveada de uma CPU de microcomputador, a qual disponibiliza as diversas tensões necessárias para a alimentação dos circuitos do protótipo. O circuito utilizado é um amplificador inversor, muito comum e amplamente difundido na literatura [11], sua função transferência é dada pela equação (16).

$$V_{out}[V] = -V_{in}[V] \left( \frac{R_2}{R_1} \right) + V_{ref}[V] \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \quad (16)$$

A função geral de resolução, Equação (16), não pode ser aplicada diretamente ao circuito implementado, visto que ela apresenta entrada e saída em tensão. Como os sensores apresentam saída do tipo corrente, pode-se realizar uma transformação de fonte utilizando o resistor  $R_{sen}/2$  para que se tenha a saída dos sensores do tipo tensão. Assim, aplicando a Equação (16) e a relação de proporcionalidade de cada sensor, obtém-se a função de transferência descrita pelas Equações (17) e (18).

$$V_{out}[V] = -I_{in}[A] * 0,081808483616967 + 1,577620068963699 \quad (17)$$



$$V_{out}[V] = -V_{in}[V] * 4,167070330848451 * 10^{-3} + 1,587379166356232 \quad (18)$$

Os circuitos de adequação de sinais, mostrados na Figura 7, foram desenvolvidos para que as suas saídas apresentassem uma tensão máxima de 3,3V, valor este limitado pela entrada do microcontrolador. A correspondência de tensão de 3,3V nas Equações (17) e (18) seria de uma corrente máxima de 21,05A e uma tensão máxima de 411V. Se tais valores fossem de ondas senoidais, corresponderiam a 14,48A e 290V eficazes.

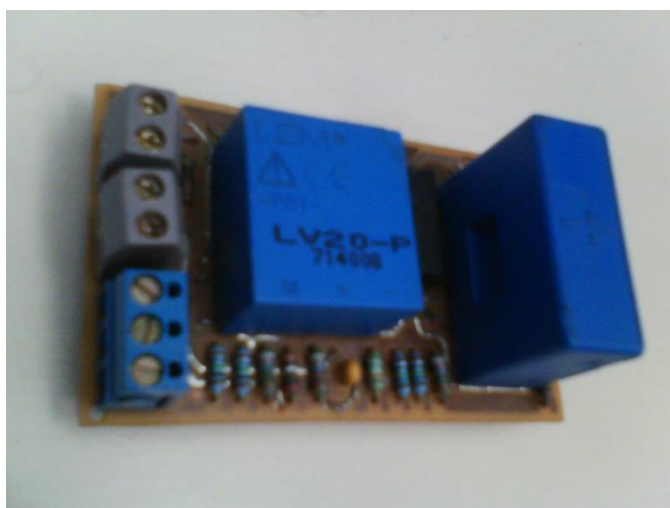
Entretanto, verificou-se que a fonte de alimentação não gerava a tensão de referência de 3,3V em sua saída, mas sim 3,48V. Assim, foi necessário promover a alteração da tensão de referência, e com isso foram obtidas as Equações (19) e (20).

$$V_{out}[V] = -I_{in}[A] * 0,081808483616967 + 1,663672072725355 \quad (19)$$

$$V_{out}[V] = -V_{in}[V] * 4,167070330848451 * 10^{-3} + 1,673963484521118 \quad (20)$$

As funções de transferência das Equações (19) e (20) correspondem de forma adequada ao que foi obtido nos experimentos práticos. A placa desenvolvida do circuito de adequação está mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Placa do circuito de adequação



FONTE: Produção próprio autor.

### 3.1.2 Filtro

O filtro foi projetado principalmente para limitar a largura de banda do sinal, ou seja, para realizar a função de filtro *anti-aliasing*, satisfazendo assim a condição de amostragem adequada. Portanto, foi assumido que a frequência de 0 DB é menor do que a metade da frequência de amostragem do sinal.

Escolheu-se o filtro Butterworth, já que ele apresenta as seguintes características interessantes: apresenta uma variação frequência plana na banda passante, evitando *ripple* e ondulações, além disso, empregando a topologia *Sallen-Key*, ele utiliza menos componentes eletrônicos se comparado a outros tipos de filtros. Cabe lembrar que deve ser considerada também a frequência de amostragem utilizada pelo microcontrolador.

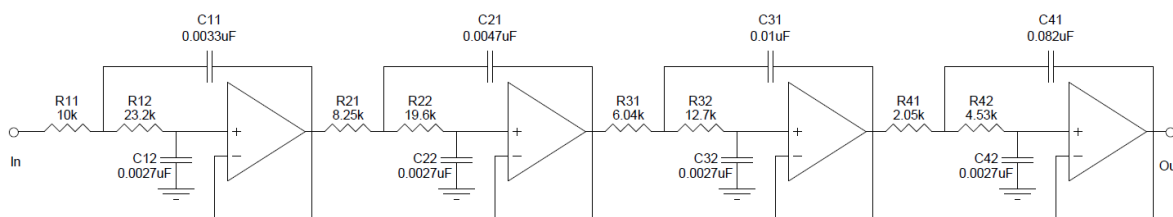
Como estabelecido em [4], deve-se ter pelo menos 16 amostras por ciclo, assim, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, de 960Hz. No entanto, essa frequência é muito baixa para se fazer medições até a 25<sup>a</sup> harmônica (1500Hz), como requerido em [4]. Portanto, para evitar o efeito denominado de *aliasing* seria necessário se ter uma frequência de amostragem de 3000Hz. Além disso, deve-se considerar a atenuação sempre existente do filtro, quando a definição de um valor de frequência de amostragem muito perto do valor de frequência de 0DB. Deve-se considerar ainda que a frequência de amostragem deve ser múltipla da frequência fundamental e, ao mesmo tempo, ser definida em um valor que seja um divisor inteiro da frequência do microcontrolador (168MHz). Resumindo, deve-se escolher uma frequência de amostragem tal que:

- a) seja múltipla de 60Hz;
- b) seja divisora inteira de 168MHz;
- c) seja grande o bastante para não ser afetada pelo filtro ou por *aliasing*.

Com base nos requisitos descritos anteriormente, foi escolhida uma frequência de 7680Hz, resultando em 128 amostras por ciclo. Como as janelas de medida devem conter um mínimo de 12 ciclos, cada medição apresenta 1536 valores. Com isso, pode-se utilizar uma *FFT* de 2048 pontos para que não ocorra perda de informação. Com base neste valor de frequência, projetou-se o filtro para um valor e frequência de corte um pouco inferior a metade da frequência de 7680Hz, ou seja, para uma frequência de 3500Hz.

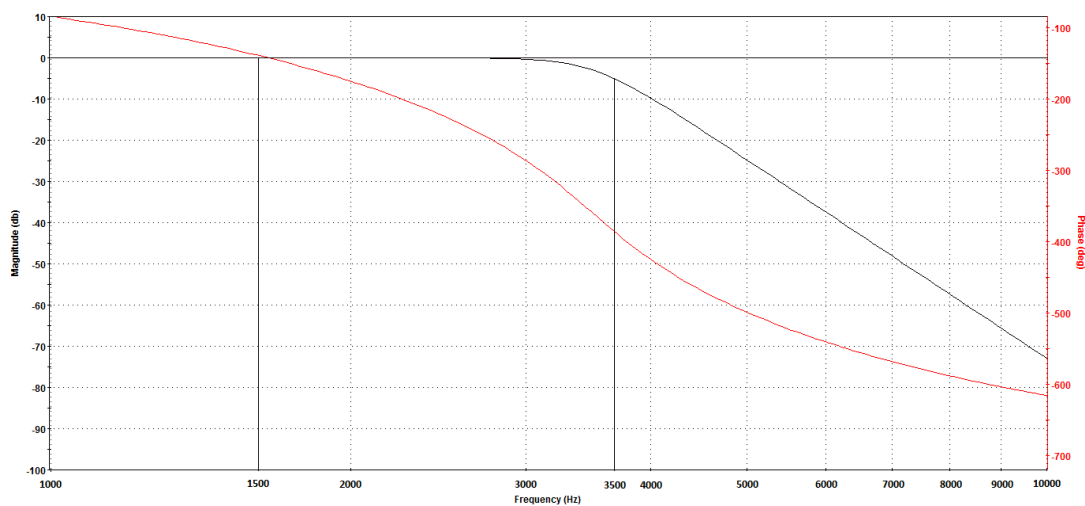
O filtro foi projetado com o uso do *software Filterlab* da Microchip®. O filtro Sallen-Key gerado apresenta 8ª ordem. O *software* empregado gera tanto diagrama de circuito do filtro como o diagrama de módulo de Bode e, ambos, estão representados na Figura 9 e Figura 10, respectivamente.

Figura 9 – Filtro Sallen-Key de 8ª ordem implementado



FONTE: Produção próprio autor.

Figura 10 – Diagrama de módulo de Bode do filtro de 8ª ordem implementado



FONTE: Produção próprio autor.

A placa do filtro desenvolvido está mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Placa de circuito do filtro desenvolvido



FONTE: Produção próprio autor.

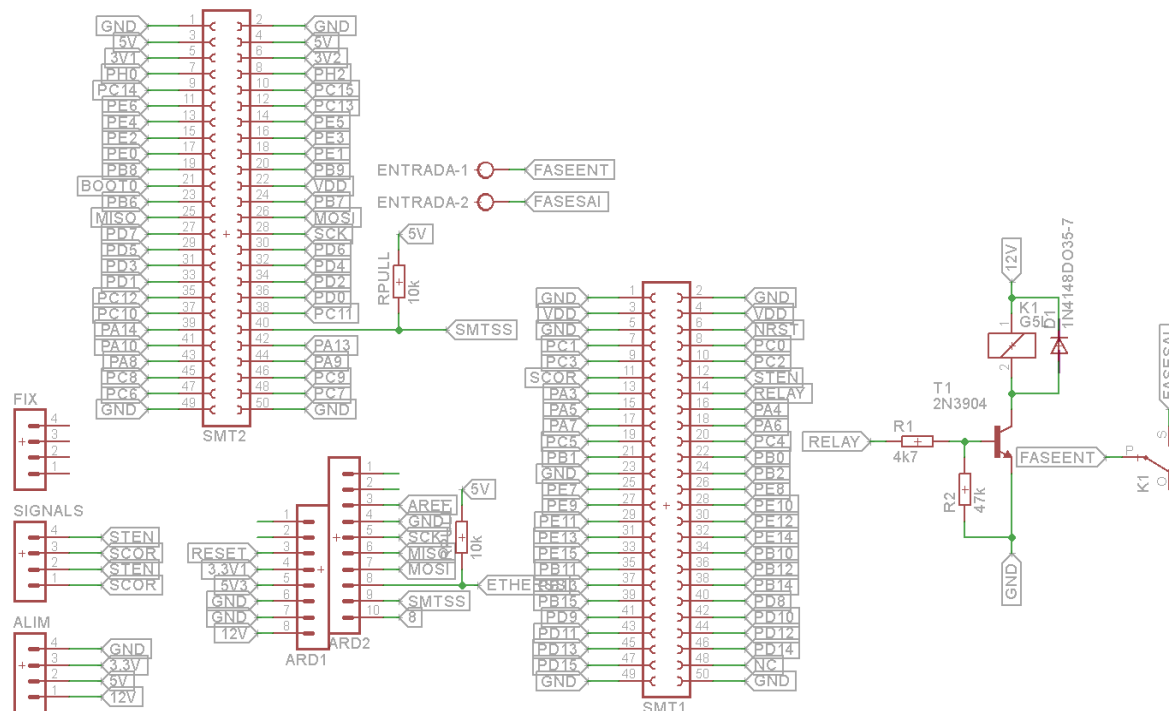
### 3.1.3 Placa de comunicação

A fim de minimizar conexões e uso de *jumpers*, optou-se por empregar *pin-headers*. Entretanto, tal escolha, requereu uma placa de comunicação adicional para a obtenção dos dados disponibilizados pelo filtro e para o seu envio aos dois microcontroladores utilizados no projeto. A placa de comunicação ainda conta com um relé que pode atuar em casos de anomalia da rede elétrica, permitindo que o usuário desligue a alimentação da carga na ocorrência desse tipo de evento.

A opção pelo uso de dois microcontroladores foi pelo fato de que o microcontrolador *ARM* empregado apresenta complexidade significativa para a sua programação. Além disso o microcontrolador *ARM* não apresenta uma comunicação muito amigável. Entretanto, ele apresenta elevada capacidade de processamento e possui baixo custo. Por estes fatos, optou-se por utilizar um microcontrolador *Arduino* empregando uma comunicação bem simples inclusive com o microcontrolador *ARM*, objetivando reduzir o custo final do projeto.

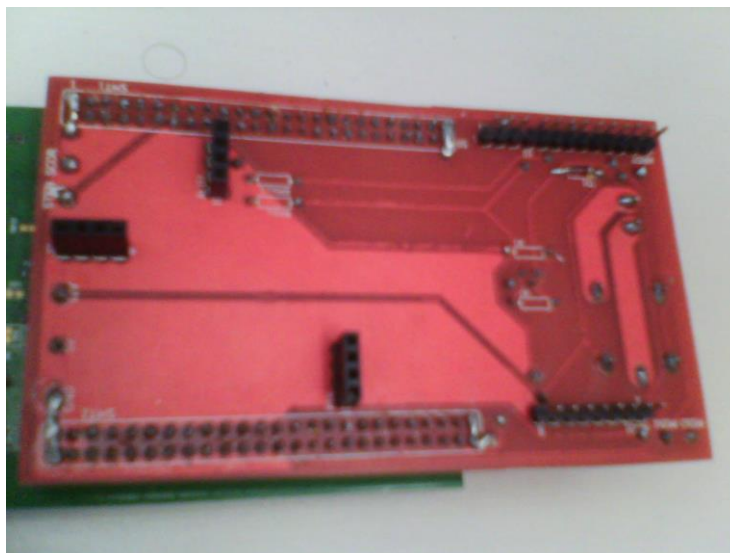
O diagrama esquemático da placa de comunicação está mostrado na Figura 12. A placa de comunicação implementada está mostrada na Figura 13

Figura 12 – Diagrama esquemático da placa de comunicação



FONTE: Produção próprio autor.

Figura 13 – Fotografia da placa de comunicação implementada



FONTE: Produção próprio autor.

### 3.1.4 O Microcontrolador STM32F407VGT6

Um dos microcontroladores utilizados no projeto para realizar todo o processamento de medição dos parâmetros de qualidade da energia elétrica foi o STM32F407VGT6 da STMicroelectronics [12]. Trata-se de um microcontrolador com núcleo ARM Cortex-M4 que possui um *clock* de

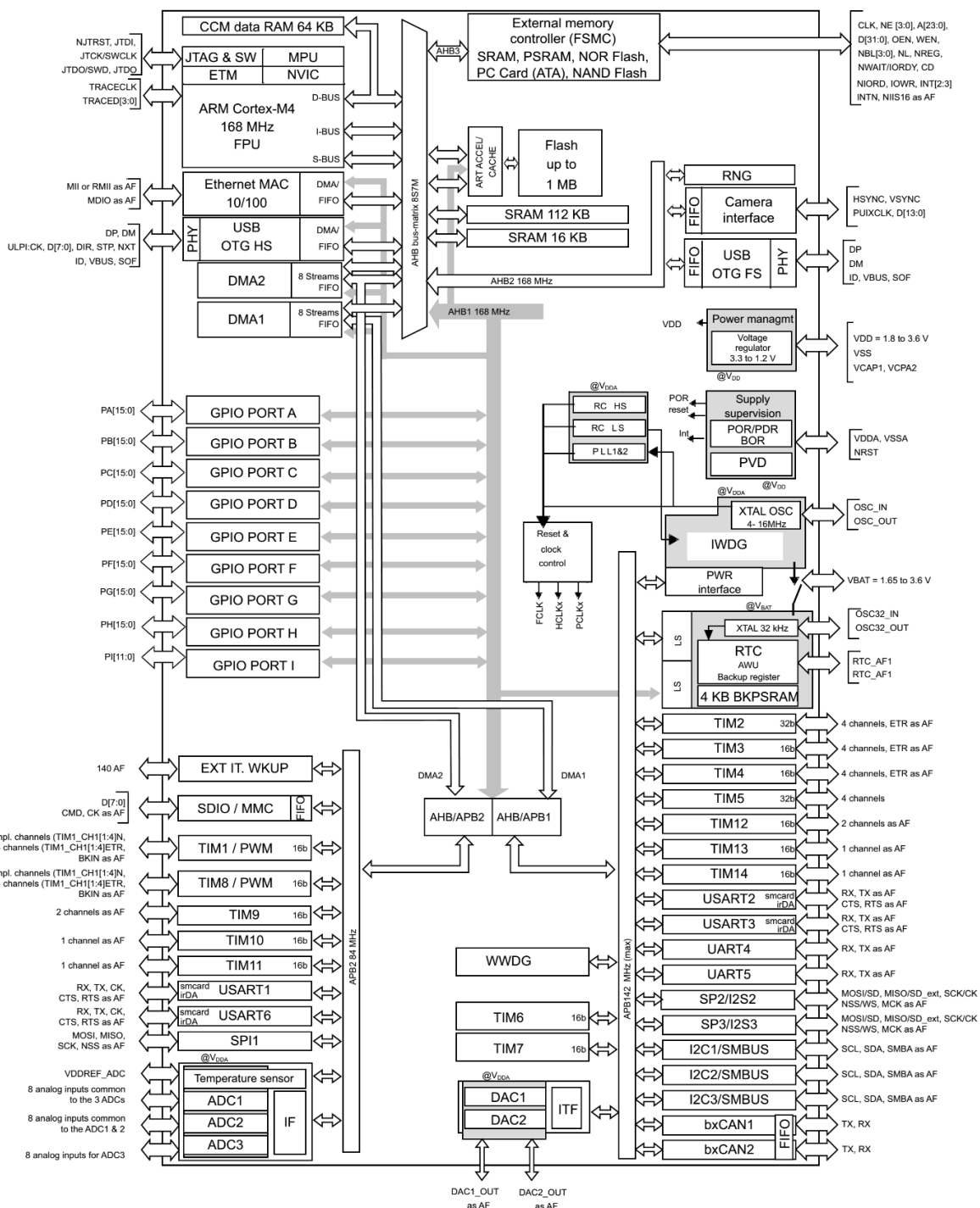
168MHz, capacidade de realizar uma *FFT* de até 4096 pontos. Ele apresenta também: uma unidade de ponto flutuante (*FPU*) que suporta instruções *ARM*, memória *flash* de 1MB. Este microcontrolador é capaz de realizar todo o processamento em menos de 0,2 segundos, requisito de tempo necessário para este projeto. Para o desenvolvimento e depuração do software foi utilizada a placa STM32F4DISCOVERY.

Os principais periféricos disponibilizados por este microcontrolador são os seguintes:

- a) três conversores A/D (Analogico-Digital) de 12 bits com até 24 canais;
- b) dois conversores D/A (Digital-Analógico) de 12 bits;
- c) dezesseis canais de *DMA* (*Direct Memory Access*);
- d) dezessete *timers*;
- e) três interfaces *I2C* - *Inter-Integrated Circuit*;
- f) quatro interfaces *USART* - *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* / 2 *UART* - *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (10Mbit/s);
- g) três interfaces *SPI* - *Serial Peripheral Interface* (42Mbits/s);
- h) duas interfaces *CAN* - *Controller Area Networ*;
- i) uma interface *SDIO* - *Secure Digital Input Output*;
- j) *USB* - *Universal Serial Bus 2.0 full-speed*.

O diagrama de blocos funcional do microcontrolador STM32F407VGT6 é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de blocos do STM32F407VGT6



FONTE: STM, 2014.

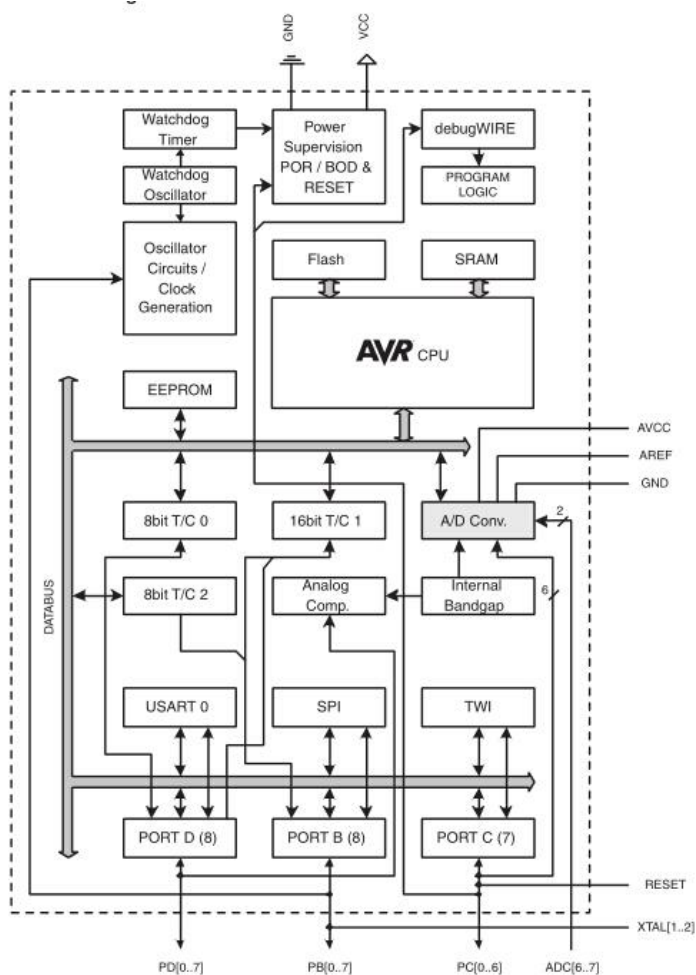
### 3.1.5 O Microcontrolador ATmega328P-PU

O segundo microcontrolador utilizado foi um ATmega328P-PU da ATMEL, embarcado especificamente no Arduino UNO. Trata-se de um microcontrolador de 8 bits CMOS baseado na arquitetura AVR da ATMEL [13]. Ele recebe o resultado do processamento realizado pelo

microcontrolador STM32F407VGT6 e realiza a transmissão destes dados para a interface do usuário. Cabe destacar que este microcontrolador foi incluído no projeto para facilitar o desenvolvimento do envio de dados para um servidor.

Os periféricos utilizados desse microcontrolador foram: a interface de comunicação serial síncrona *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), uma interrupção simples ativada em nível baixo e a comunicação através da porta *USB* (*Universal Serial Bus*). Portanto, não serão aqui descritos todos os periféricos deste microcontrolador, e sim, apresentado o seu diagrama de blocos funcional, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos funcional do microcontrolador ATmega328P-PU embarcado no Arduino UNO



FONTE: Arduino, 2014.

Cabe destacar que foi utilizado um relé para abrir o circuito do medidor por *hardware*, quando houver risco para a carga. Entretanto a reativação deste relé deverá ser feita por *software*.

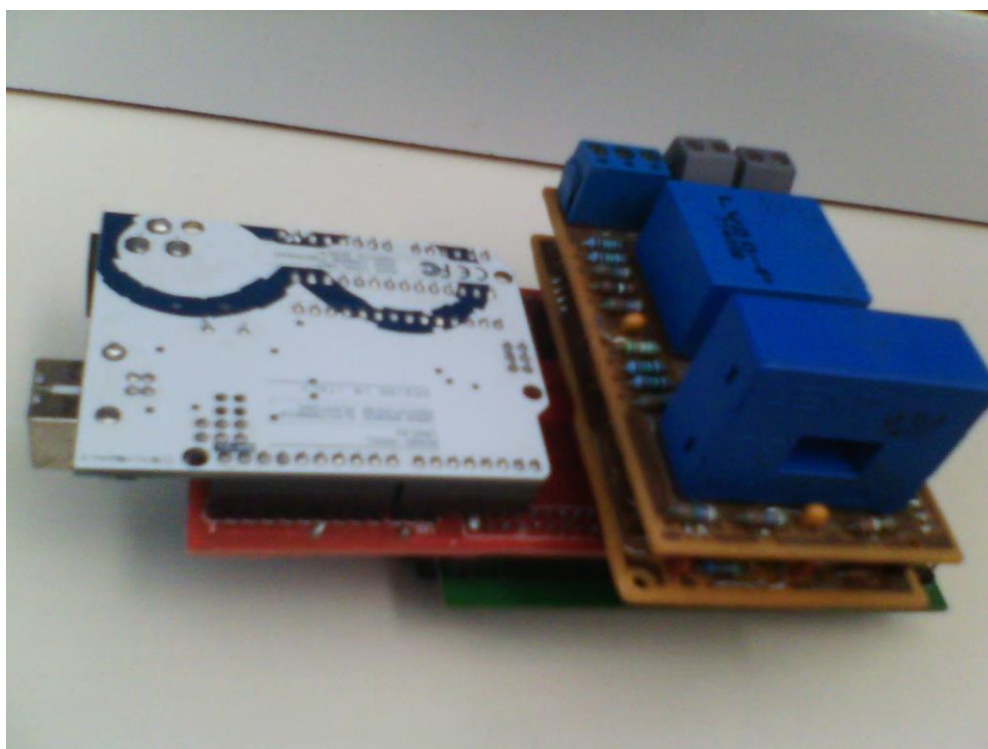


### 3.1.6 O Servidor

O projeto foi concebido para que houvesse uma conexão de acesso fácil com a Internet a partir de um navegador (*browser*), ou seja, um programa desenvolvido para permitir a navegação pela internet. Portanto, foi necessária a utilização de um servidor para permitir o funcionamento adequado do programa supervisor ScadaBR. O servidor é o responsável por receber, armazenar e catalogar os dados referentes à qualidade e à medição de energia elétrica para consultas futuras. Além disso, ele possibilita a emissão de relatórios referente às medições obtidas e também apresenta um painel virtual que sinaliza no caso da ocorrência de anomalias.

Utilizou-se um microcomputador do tipo notebook, entretanto, como o aplicativo funciona na linguagem de programação JAVA, e não necessita para a sua operação uma configuração que requeira requisitos muito específicos, praticamente qualquer microcomputador poderia ser utilizado. O protótipo implementado do módulo aferidor de qualidade da energia elétrica, incluindo todos os periféricos, é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Protótipo desenvolvido



FONTE: Produção próprio autor.

## 3.2 Software

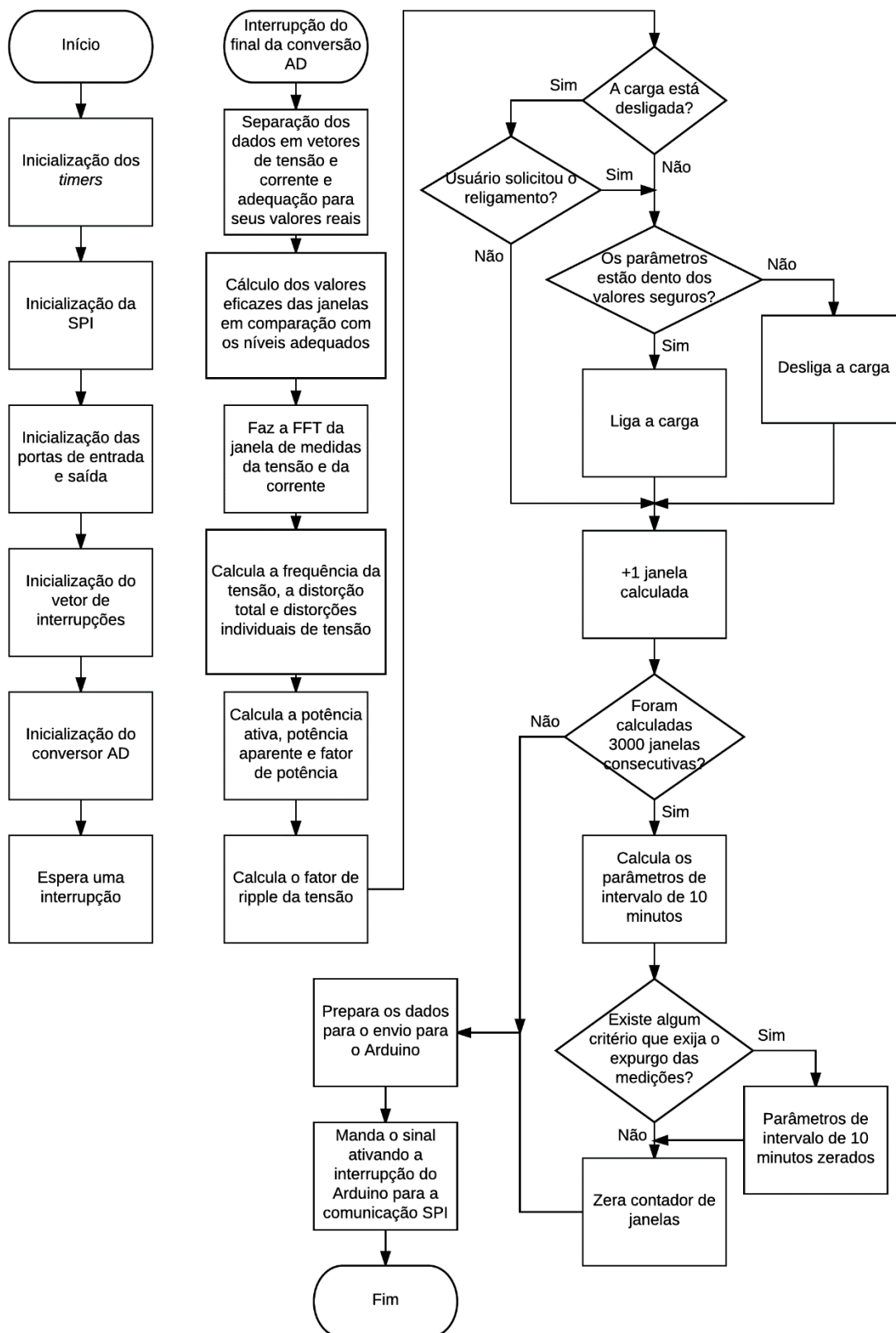
### 3.2.1 A Placa de Desenvolvimento STM32F4DISCOVERY

O software para o microcontrolador STM32F407VGT6 foi desenvolvido em programação C no *IAR Embedded Workbench* da *IAR Systems*® [8]. Inicialmente foi utilizada a versão livre (*trial*) deste *software*. Entretanto, foi necessária a alteração para a versão de tempo ilimitado, mas com limite de tamanho de código, devido ao custo. O fluxograma do programa é apresentado na Figura 17.

Inicialmente são inicializados os *timers*, a comunicação serial síncrona (*SPI*), as portas de entrada e saída, o vetor de interrupções e a conversão analógico-digital (A/D). Tanto a conversão A/D como a interface *SPI* foram implementadas utilizando acesso direto à memória (*DMA*). Desta forma, os periféricos poderiam trabalhar com os dados simultaneamente com a unidade central de processamento *CPU* (*Central Processing Unit*), minimizando o tempo de processamento do programa.

A amostragem dos dados foi realizada na frequência de 7680Hz. Tais dados são convertidos simultaneamente por um conversor A/D de 12 bits e armazenados em um vetor de 3072 posições, 1536 para tensão e 1536 para a corrente. Cabe destacar que deve ser feita a conversão desses valores para que possam ser mostrados de forma adequada para a sua leitura.

Figura 17 – Fluxograma do programa embarcado na placa de desenvolvimento STM32F4DISCOVERY



FONTE: Produção próprio autor.

Como descrito na Seção 3.1.1, há uma restrição em relação aos valores máximos das variáveis (tensão e corrente), qual seja, o STM32F4DISCOVERY não utiliza a tensão de 3,3V como o padrão para seu valor de referência, mas sim 3V. Para tal valor, os valores máximos de cada variável, após a aplicação das Equações (19) e (20), correspondem a 16,3A e 318,2V de pico, ou 11,55A e 225V eficazes, para formas de onda senoidais.

Na sequência, os dados são enviados para o microcontrolador Arduino UNO, utilizando o protocolo de comunicação *SPI*. O STM32F407VGT6 foi configurado como escravo por ser o microcontrolador de maior capacidade de processamento, e o que trabalha com os dados brutos. A seguir, apresenta-se a descrição de como foram obtidos os valores de cada parâmetro relativos à qualidade da energia elétrica.

#### **3.2.1.1 Tensão eficaz verdadeira (*true RMS*)**

Após os dados serem separados em cada um de seus vetores, é feito o cálculo *true rms* da tensão e da corrente, como descrito na equação (1), e, posteriormente, armazenado em um vetor de 3000 posições. O uso desse vetor é necessário para se fazer o cálculo da tensão eficaz no intervalo de 10 minutos, como cada ciclo corresponde a 0,2 segundos, 3000 ciclos correspondem a exatamente 10 minutos.

A partir deste ponto é realizada uma comparação para identificar se ocorreu algum caso descrito no Item 2.6, e assim aplicar ou não o critério de expurgo de amostras. Caso o expurgo não seja necessário, é feito o cálculo descrito na Equação (2) após completar o vetor, caso contrário o seu valor é mantido em 0, indicando a variação.

Caso a tensão ultrapasse os limites descritos no Item 2.1 ou a corrente ultrapasse 10A eficazes, é enviado um sinal de erro para o programa supervisor e se interrompe a alimentação da carga. O restabelecimento da alimentação da carga somente ocorre quando o nível de tensão retorna à normalidade e o usuário reativa a função de alimentação da carga no programa supervisor.

#### **3.2.1.2 Fator de potência**

Uma vez que não foi especificado na norma [4] o método para medição de potências, optou-se por obter a potência ativa através da multiplicação dos valores de tensão e corrente e pela soma

ponto a ponto, realizando a média de tais valores. A potência aparente foi obtida multiplicando os valores eficazes de tensão e corrente de cada ciclo de medições.

A norma [4] não considera a possível distorção na forma de onda da corrente. Assim, para um cálculo mais preciso, foi realizada a *FFT* da corrente para se obter a distorção harmônica total *THD* (*Total Harmonic Distortion*). De forma geral, pode-se empregar a Equação (21) para obtenção do fator de potência (*FP*).

$$FP = \frac{P/S}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} I_n^2}}{I_1} \right)^2}} 100[\%] \quad (21)$$

Na Equação (21)  $I_1$  é o valor da fundamental da corrente e  $I_n$  corresponde às correntes harmônicas de ordem 2 a ordem n. Como a norma somente explicita o cálculo de tensões até a 25ª, optou-se por realizar esse mesmo corte com a corrente.

### 3.2.1.3 Harmônicos

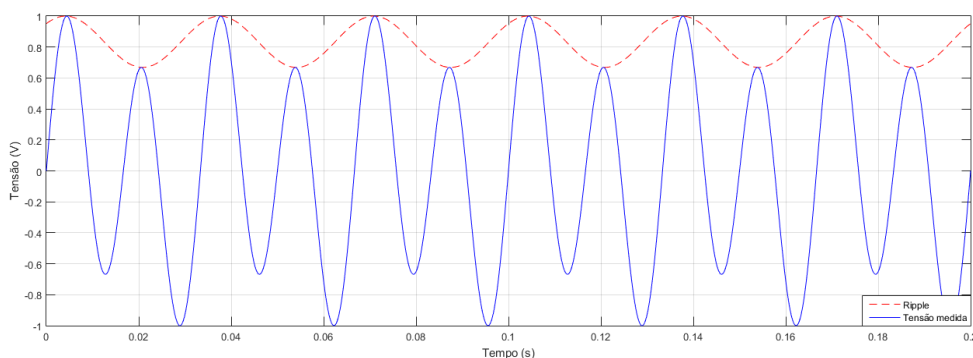
Cabe destacar que o harmônico máximo avaliado foi o 25º, e que os valores dos harmônicos são apenas indicados. Não há uma preocupação para não submeter a carga a condições extremas desse fator de qualidade.

### 3.2.1.4 Desequilíbrio de tensão

Como somente se realiza as medições em uma única fase da rede elétrica, não se realiza os cálculos de desequilíbrio de tensão descrito no Item 2.4.

### 3.2.1.5 Tensão de *Ripple*

Optou-se por obter a flutuação de tensão empregando uma abordagem diferente da apresentada na norma [4]. O cálculo da flutuação de tensão é obtido pela Equação (22) a partir do fator de *ripple* em cada ciclo de medições. A Figura 18 apresenta a ilustração base para o cálculo feito no programa.

Figura 18 – Senoide com tensão de *ripple*

FONTE: Produção próprio autor.

$$\gamma = \left( \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \right) 100[\%] \quad (22)$$

Relativo à equação (22) o valor  $V_{rms}$  representa o valor eficaz do *ripple* da tensão mostrada na Figura 18 em vermelho, e o valor  $V_{dc}$  representa o valor eficaz total da forma de onda da tensão mostrada em azul.

### 3.2.1.6 Variação de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração constantes do Item 2.6 foram descritas no Item 3.2.1.1. Caso haja a ocorrência de alguma destas variações o programa apresenta uma mensagem de erro.

### 3.2.1.7 Variação em frequência

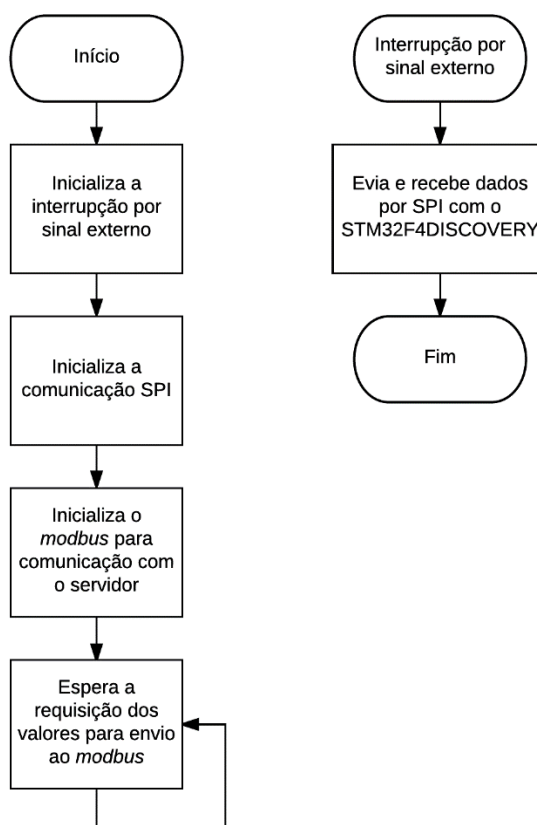
Para o cálculo da frequência da tensão entregue é analisado o sinal e é feita a média do inverso do tempo de cruzamento por zero do sinal. Caso o valor da frequência da rede elétrica ultrapasse os limites descritos no Item 2.7, estando a opção de segurança ativada no programa, a alimentação da carga é cortada, até que o valor da frequência retorne à faixa normal e o usuário reative a operação do medidor no programa supervisorio.

## 3.2.2 Programa embarcado no microcontrolador Arduino UNO

O *software* (programa) embarcado no microcontrolador Arduino UNO foi implementado apenas para realizar a comunicação com o microcontrolador STM32F407VGT6. Utilizou-se para isso, a comunicação nativa do microcontrolador STM32F407VGT6 e a sua biblioteca

disponível. Além disso, o microcontrolador Arduino UNO realiza a comunicação com o programa supervisor ScadaBR através da sua saída *USB*. O fluxograma está representado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma do programa embarcado no microcontrolador Arduino UNO



FONTE: Produção próprio autor.

Não se realiza nenhum tratamento de dados. O microcontrolador Arduino UNO recebe um sinal que ativa uma interrupção indicando o término do processamento de dados pelo microcontrolador STM32F407VGT6, a partir disso, recebe os dados processados e os transmite ao programa supervisor.

### 3.2.3 O programa supervisor ScadaBR

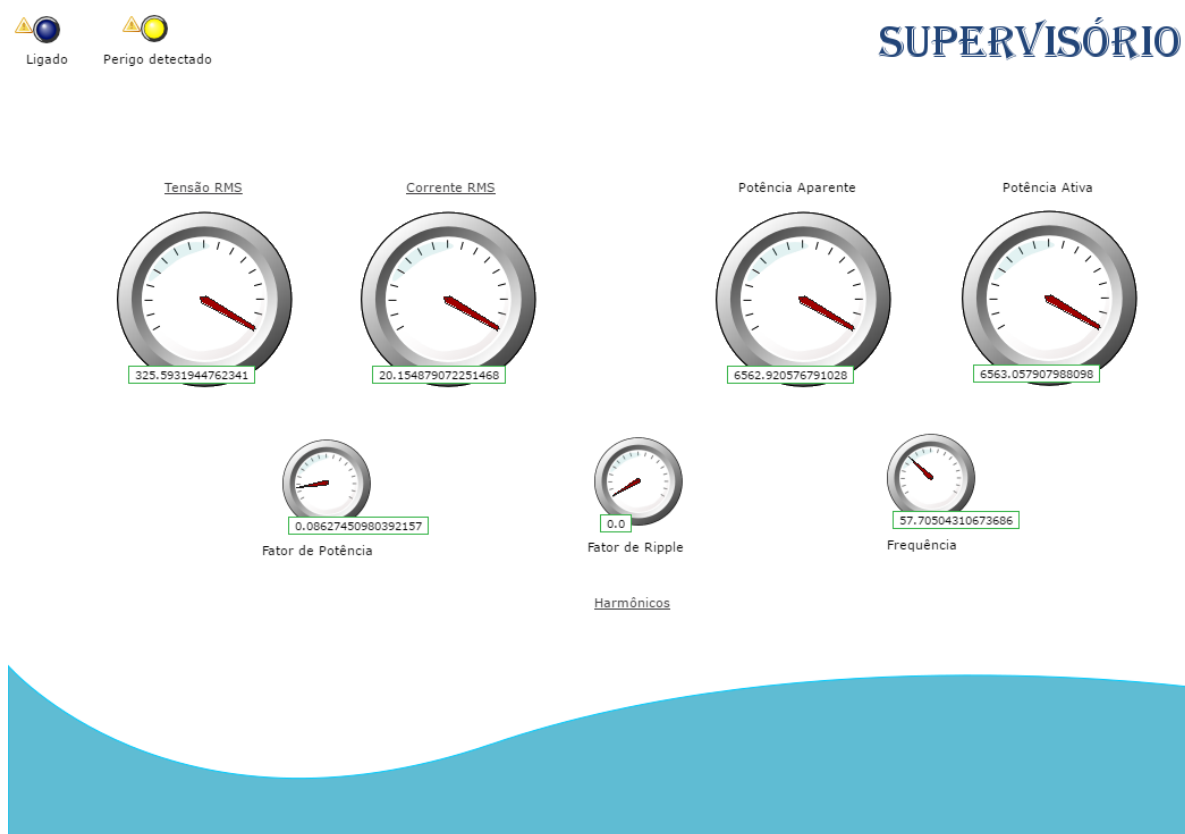
No programa supervisor ScadaBR, os dados são reconvertidos aos valores originais para serem apresentados em mostradores analógicos e em gráficos para análise e acompanhamento dos resultados da medição.

Somente neste ponto é que se realiza uma avaliação dos dados, inclusive daqueles que não foram considerados para a segurança da carga, e em função da avaliação realizada, pode-se também desligar a alimentação da carga.

Optou-se por desenvolver um programa supervisorio bem simples, que apresentasse os dados de forma direta e que possibilitasse navegação fácil.

As telas padrão para a observação dos parâmetros são mostradas na Figura 20 e na Figura 21. Vale ressaltar que os valores dos medidores dessas figuras são apenas valores fantasia, não são originários de medições reais.

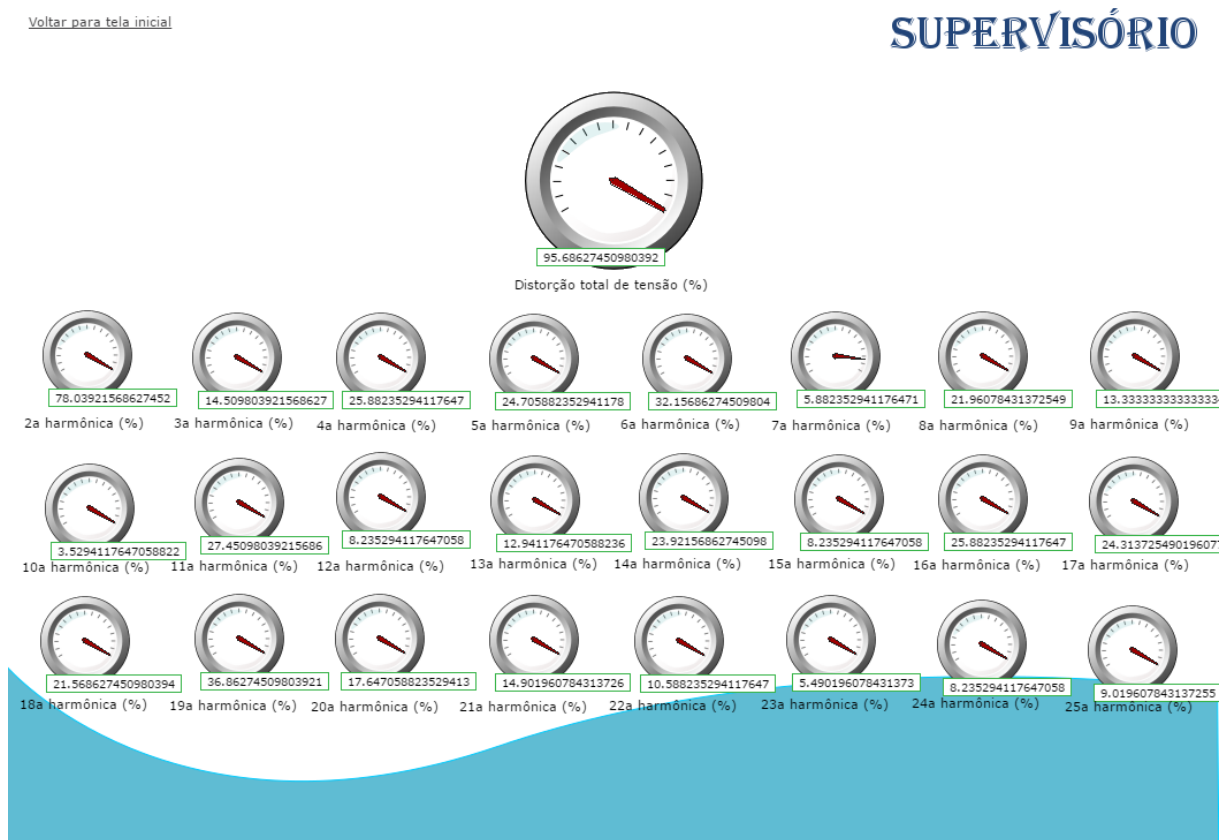
Figura 20 – Tela inicial do programa supervisorio



FONTE: Produção próprio autor.



Figura 21 – Tela alternativa do programa supervisorio



FONTE: Produção próprio autor

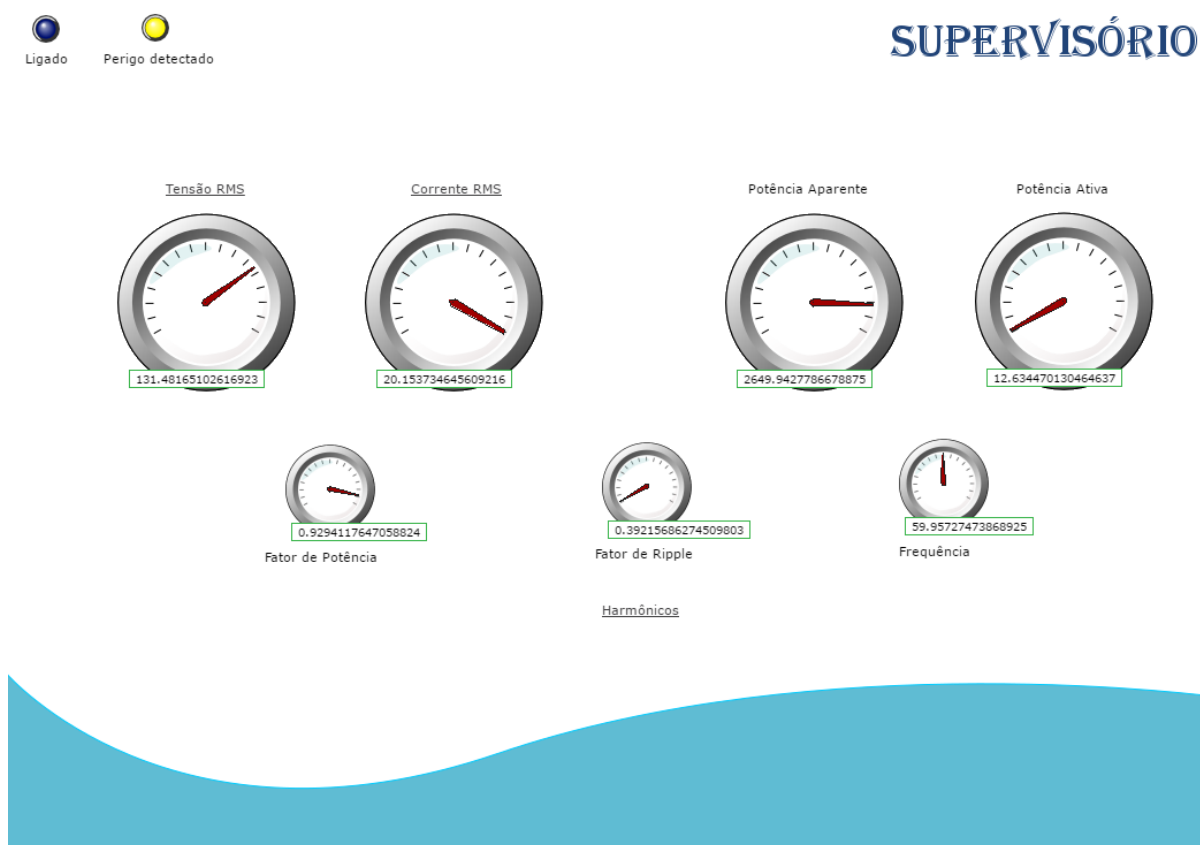
Os indicadores analógicos disponíveis nas telas foram concebidos de forma a facilitar a inspeção contínua de um operador. Assim, seus limites físicos de máximo e mínimo estão de acordo com os máximos e mínimos disponíveis em [4].

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Teste com conexão na rede elétrica

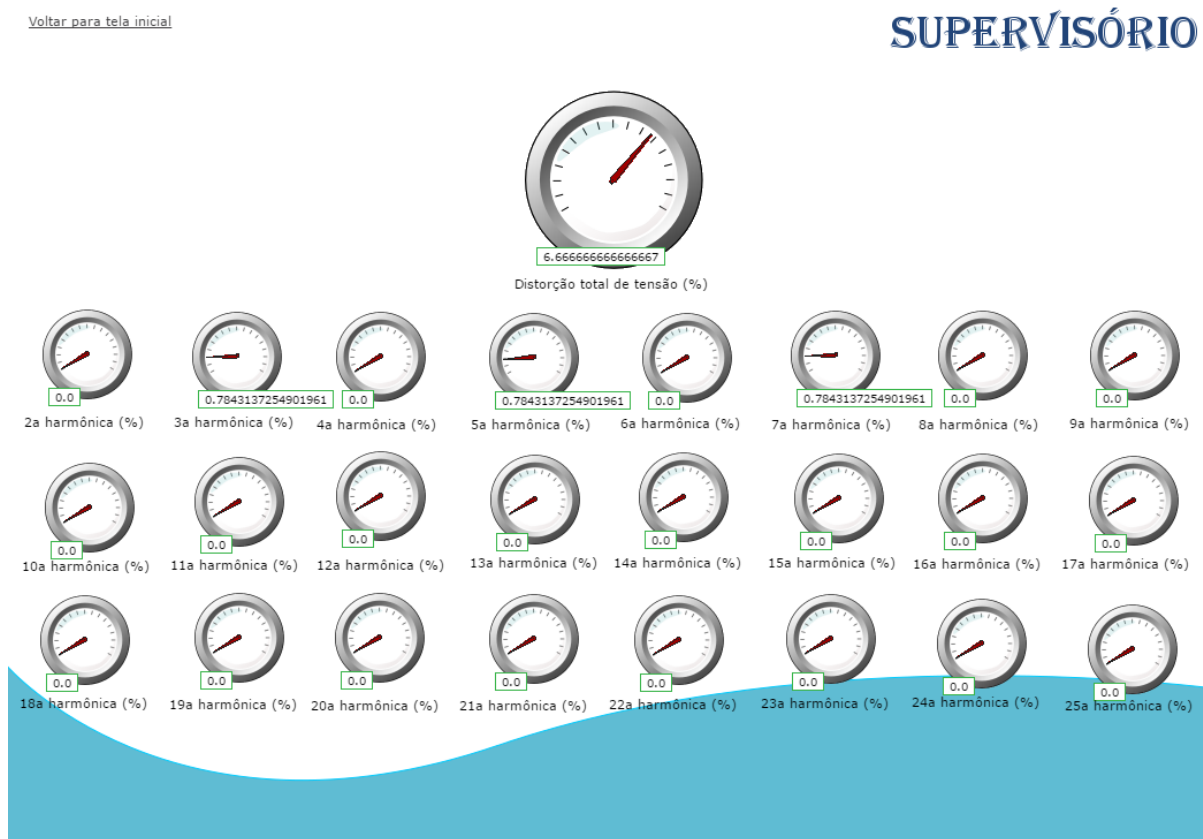
O protótipo do módulo aferidor foi conectado para realizar medições na rede elétrica durante um período longo de tempo. O objetivo foi o de verificar a consistência dos dados medidos e a sua robustez mediante as alterações de temperatura por uso contínuo. As telas típicas do programa supervisorio, durante o período de medição, são mostradas na Figura 22 e na Figura 23.

Figura 22 – Tela inicial típica do programa supervisorio



FONTE: Produção próprio autor.

Figura 23 – Tela alternativa típica do programa supervisorio



FONTE: Produção próprio autor.

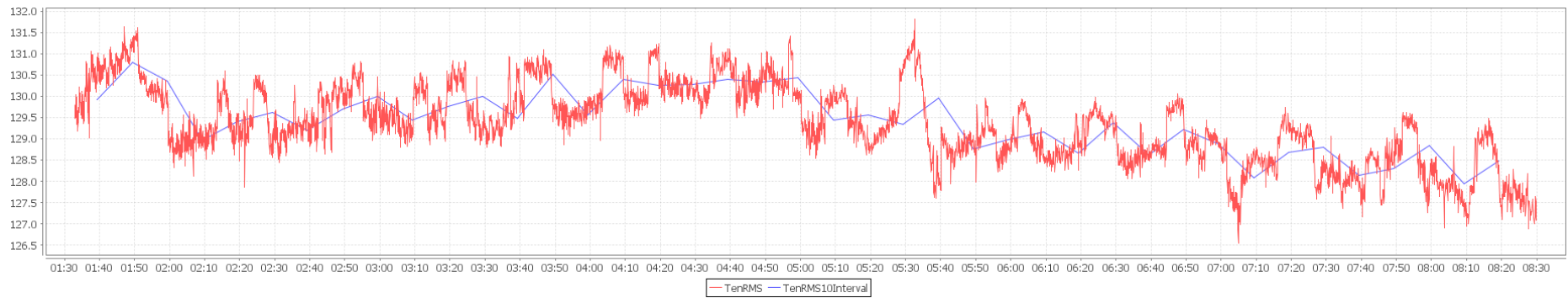
Durante o desenvolvimento do projeto ocorreu uma falha na parte referente à medição de corrente do módulo aferidor. Dessa forma, os valores relacionados à corrente são apenas ilustrativos, e são apenas utilizados para mostrar que o módulo aferidor chegou a realizar a medição de corrente. Entretanto, os dados calculados estão coerentes com os valores ilustrativos de corrente.

Foi realizada a obtenção dos dados a partir do protótipo do módulo aferidor de qualidade da energia elétrica, em uma medição de 7 horas, relativos a:

- tensão eficaz no intervalo de 0,2 segundos bem como no intervalo de 10 minutos, mostrada na Figura 24;
- corrente eficaz no intervalo de 0,2 segundos bem como no intervalo de 10 minutos, mostrada na Figura 25;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 6ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 26;

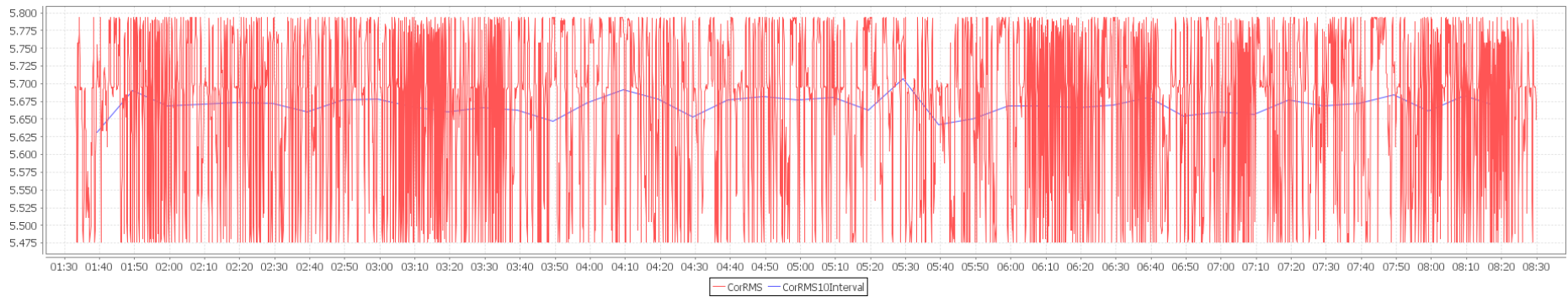
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 13<sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 27;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 19<sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 28;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 25<sup>a</sup> harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 29;
- fator de potência em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrado na Figura 30;
- frequência em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 31;
- potência ativa e aparente (VA) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrada na Figura 32;
- fator de *ripple* (%) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo, mostrado na Figura 33.

Figura 24 – Tensão eficaz (V) no intervalo de 0,2 segundos e no intervalo de 10 minutos ao longo do tempo



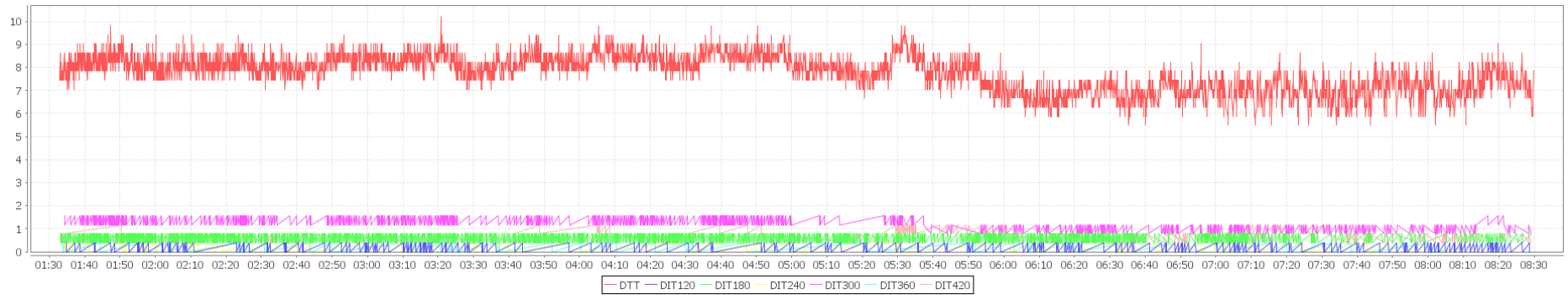
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 25 – Corrente eficaz (A) no intervalo de 0,2 segundos e no intervalo de 10 minutos ao longo do tempo



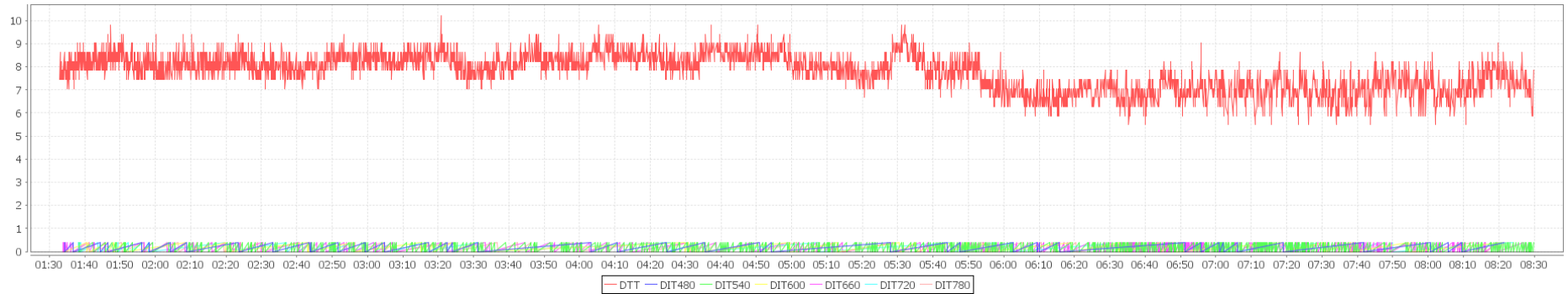
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 26 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 6ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



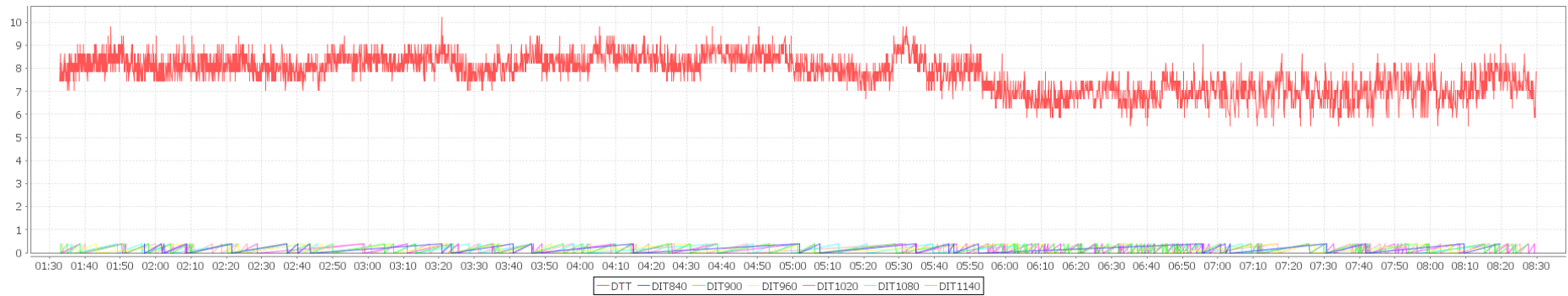
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 27 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 13ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



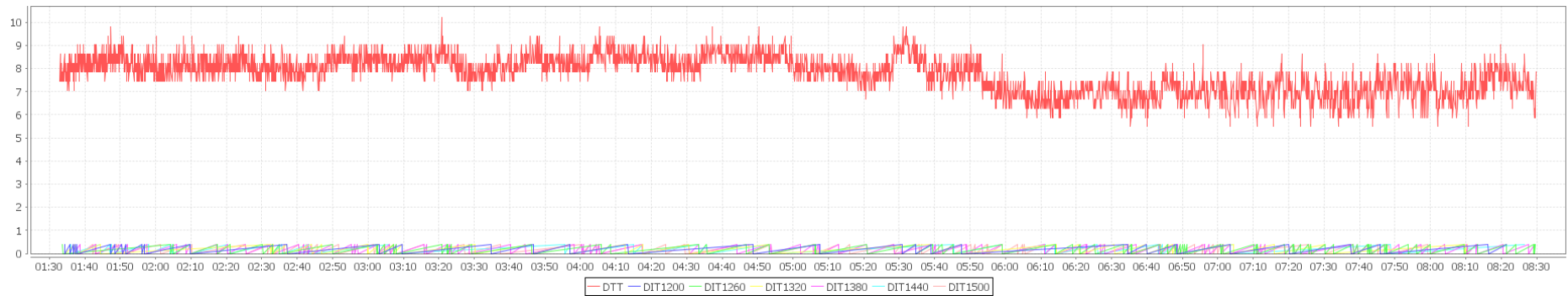
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 28 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 19ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



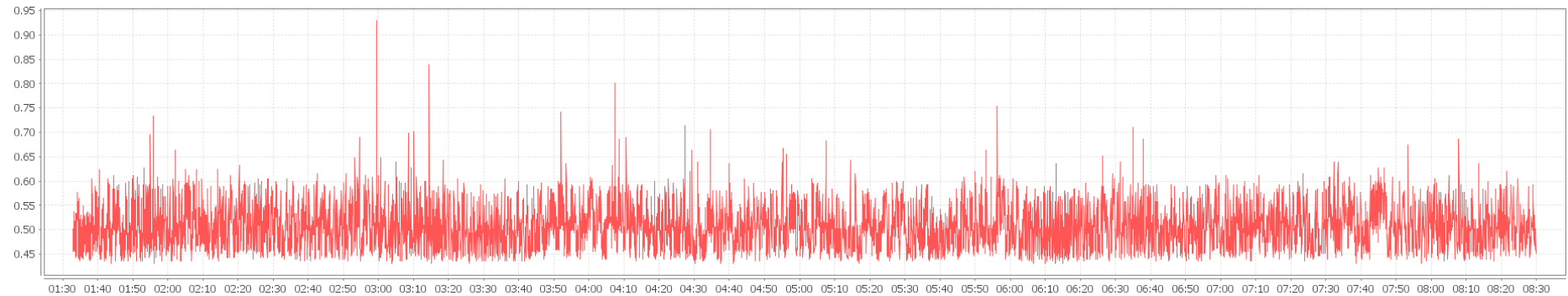
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 29 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 25ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



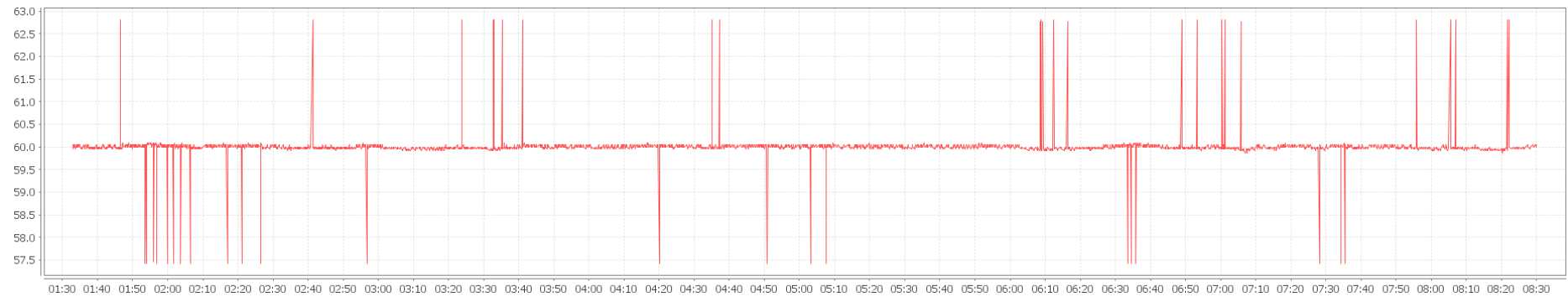
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 30 – Fator de potência (abs) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



FONTE: Produção próprio autor.

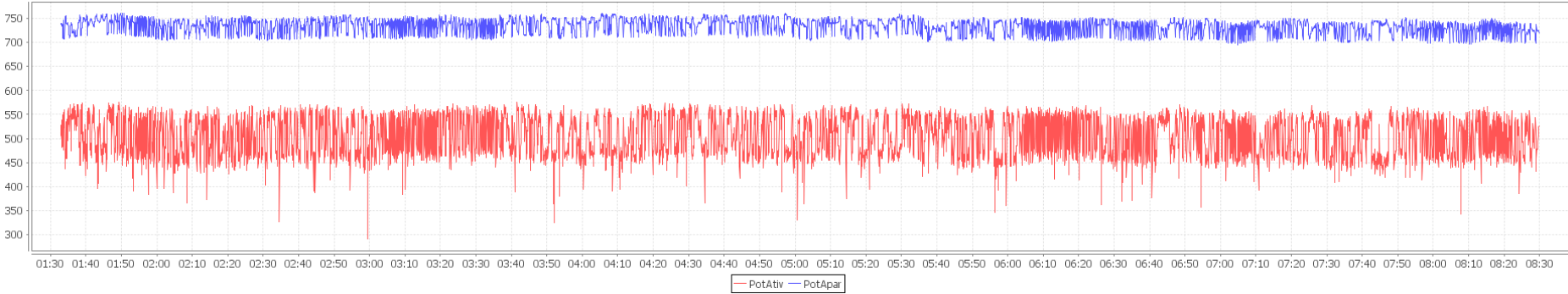
Figura 31 – Frequência (Hz) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



FONTE: Produção próprio autor.

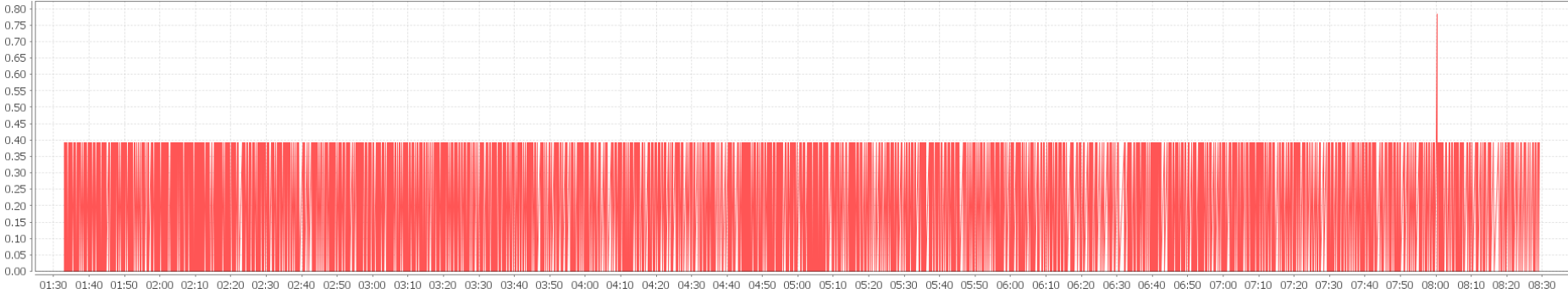


Figura 32 – Potência ativa (W) e aparente (VA) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo



FONTE: Produção próprio autor.

Figura 33 – Fator de ripple (%) em um intervalo de 0,2 segundos ao longo do tempo

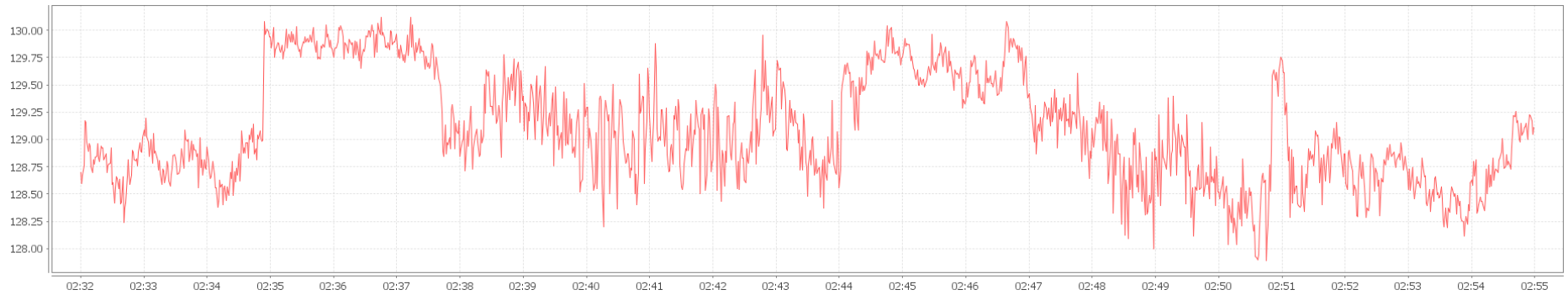


FONTE: Produção próprio autor.

Com o objetivo de verificar a sensibilidade da medição das variáveis pelo protótipo do módulo aferidor, foi realizado o acompanhamento enquanto se adicionou cargas na rede elétrica. As cargas utilizadas foram: um televisor Semp Toshiba de 49 polegadas e um *notebook Powernote* de 120 VA. Os dois aparelhos (cargas) foram ligados em horários diferentes para que se pudesse observar a sensibilidade da medição do módulo aferidor. O notebook foi ligado no instante 02:33h e o televisor foi ligado no instante 02:44h. As medições obtidas são as seguintes:

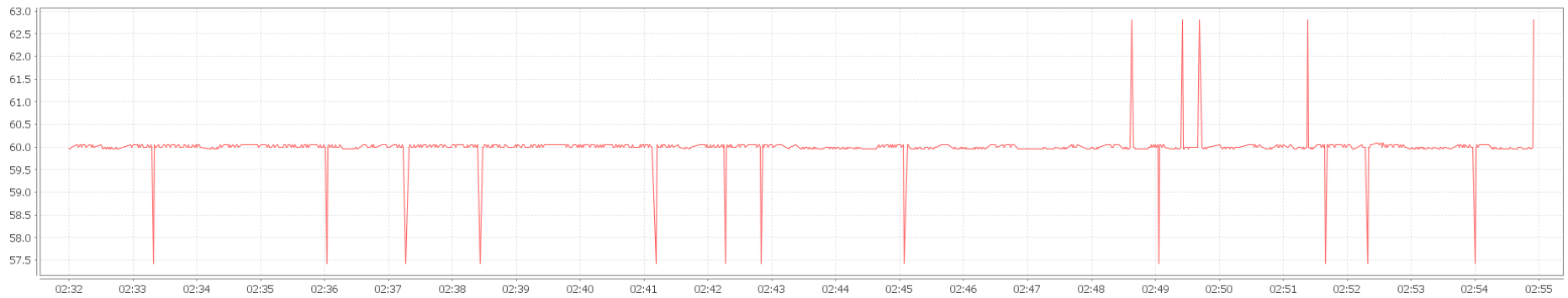
- tensão eficaz, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas ao longo do tempo, mostrada na Figura 34;
- frequência, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostrada na Figura 35;
- fator de *ripple*, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostrado na Figura 36;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão até a 7<sup>a</sup> harmônica, em um intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostradas na Figura 37;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão até a 13<sup>a</sup> harmônica, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostradas na Figura 38;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão até a 19<sup>a</sup> harmônica, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostradas na Figura 39;
- distorção harmônica total e distorções individuais de tensão até a 25<sup>a</sup> harmônica, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostradas na Figura 40;
- distorções harmônicas individuais de tensão até a 7<sup>a</sup> harmônica, no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo, mostradas na Figura 41.

Figura 34 – Tensão eficaz (V) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



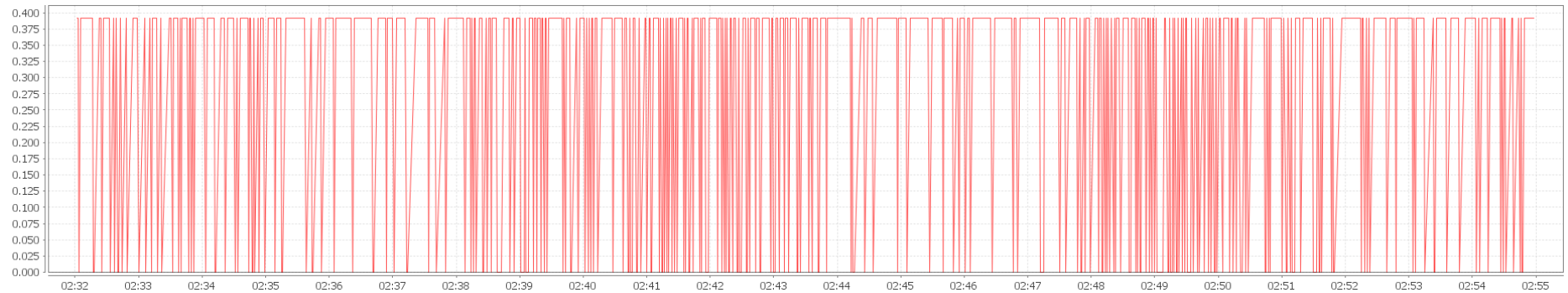
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 35 – Frequência (Hz) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



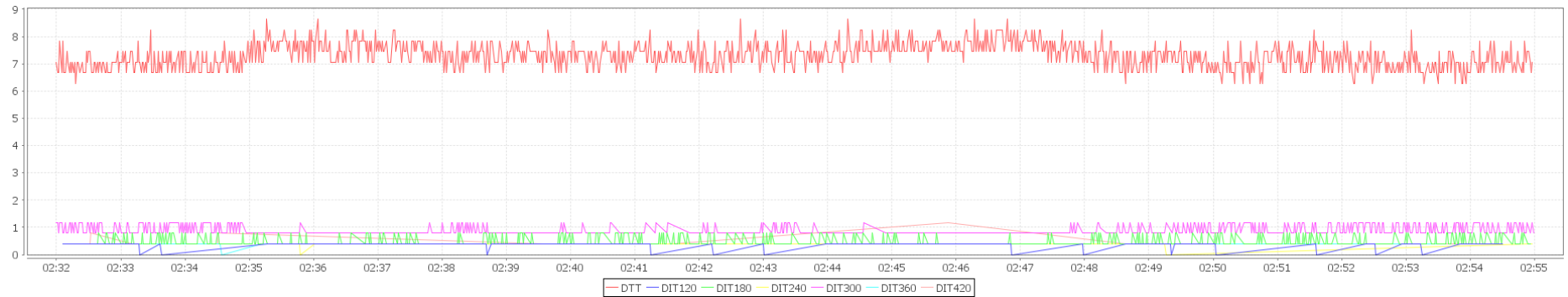
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 36 – Fator de *ripple* (%) no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



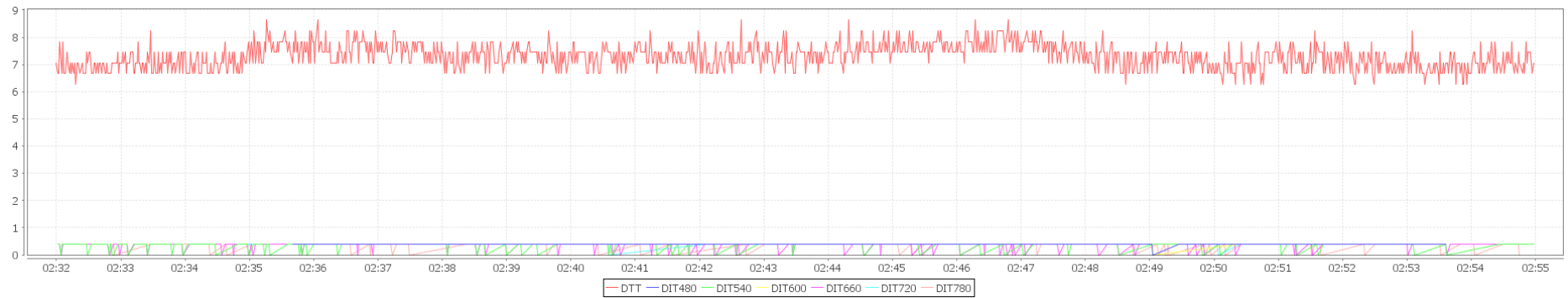
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 37 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 7ª harmônica em um intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



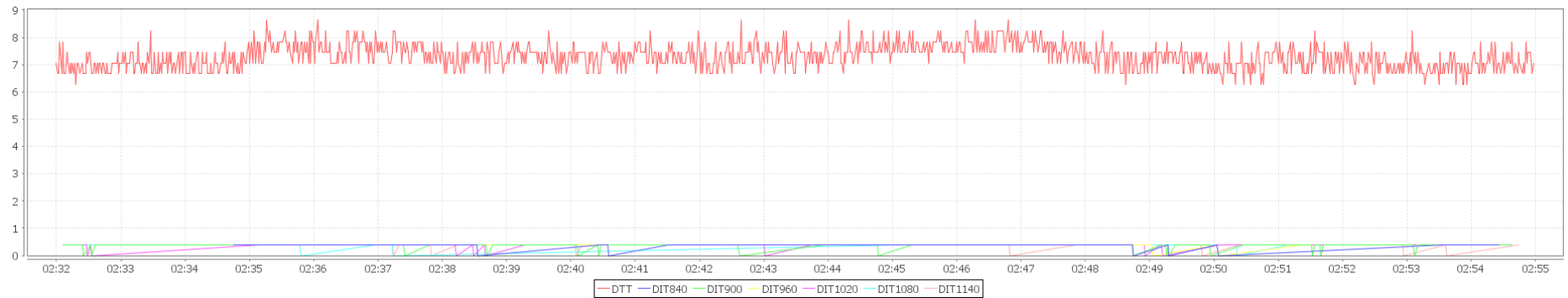
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 38 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 13ª harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



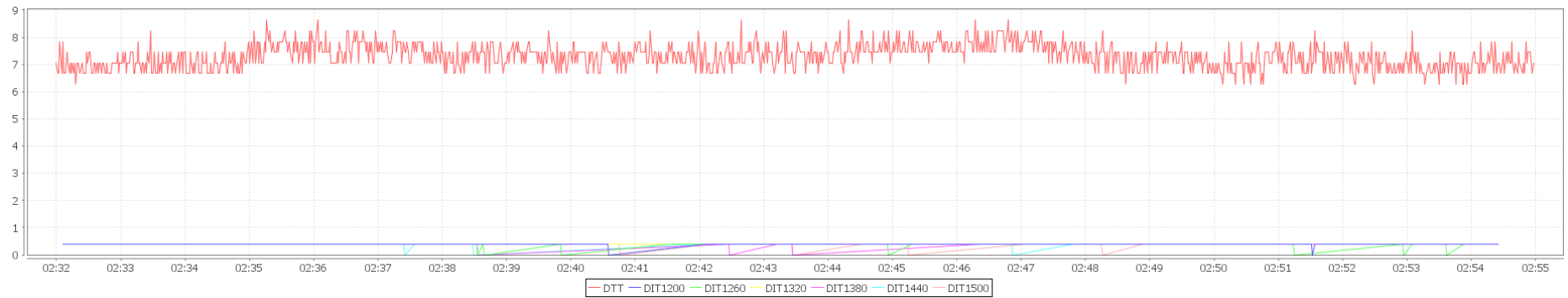
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 39 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 19ª harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



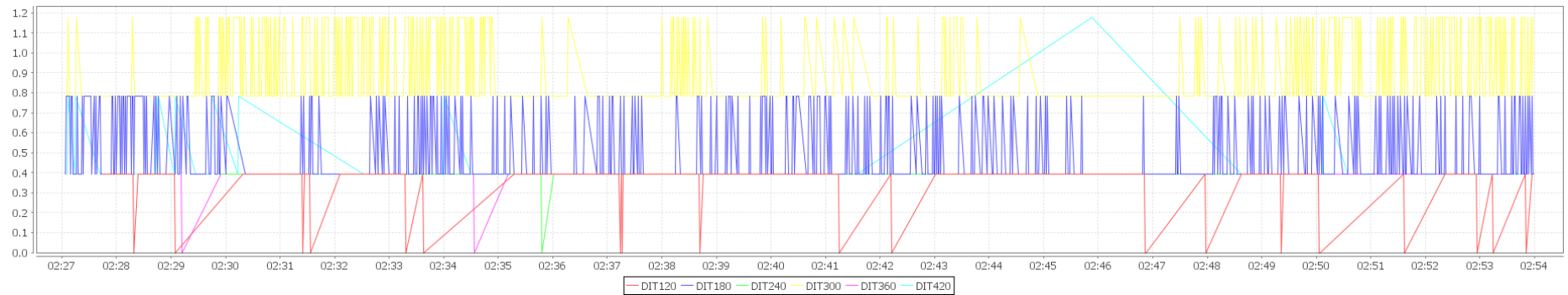
FONTE: Produção próprio autor.

Figura 40 – Distorção harmônica total e distorções individuais de tensão (%) até a 25ª harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



FONTE: Produção próprio autor.

Figura 41 – Distorções harmônicas individuais de tensão (%) até a 7ª harmônica no intervalo de 0,2 segundos, sob diferentes cargas, ao longo do tempo



FONTE: Produção próprio autor.

## 4.2 Discussões

Os dados medidos foram consistentes se comparados com as leituras obtidas a partir de um multímetro de marca Minipa e modelo ET – 2030A. Entretanto, deve-se considerar que o módulo aferidor de qualidade da energia elétrica precisaria ser calibrado a partir de um medidor padrão de parâmetros de qualidade da energia elétrica.

Optou-se por não dar ênfase à calibração do protótipo uma vez que o objetivo não foi o de se obter neste trabalho um instrumento de medição como um produto.

Procurou-se observar a consistência dos dados disponibilizados pelo módulo aferidor, bem como na sua capacidade de medir um valor de uma variável e apresentá-la, sem alterações, na tela final do programa supervisor.

Escolheu-se algumas variáveis, cujas medições pelo módulo aferidor foram acompanhadas ao longo tempo. Os resultados de tal acompanhamento, sem introdução de carga na rede elétrica, foram mostrados nas Figuras de 29 a 33. Quando se introduziu diferentes cargas na rede elétrica, os resultados do acompanhamento foram mostrados nas Figuras de 34 a 41.

Na Figura 24 observa-se a tensão eficaz sendo seguida da média de seus valores do intervalo de 10 minutos anteriores. Na Figura 25 observa-se um comportamento similar ao da Figura 24 com a diferença de que os dados são relativos à corrente. Os valores de tensão são aceitáveis pois não ultrapassaram os limites estabelecidos em [4]. Os valores de corrente foram inseridos através da geração de formas de ondas senoidais recortadas (para a inserção de harmônicos), no vetor de corrente do microcontrolador STM32F407VG, o resultado obtido se apresentou dentro de limites aceitáveis.

Os resultados mostrados nas Figuras de 26 a 29 se referem a distorção total de tensão, bem como as distorções individuais até a 25<sup>a</sup> harmônica, todos os valores são aceitáveis pois se mantiveram abaixo dos limites estabelecidos em [4].

Na Figura 30 é mostrado o fator de potência do intervalo medido, o seu valor deve-se inteiramente à distorção imposta pelo recorte na forma de onda de corrente, uma vez que ela foi gerada para se manter em fase com a tensão.

Na Figura 31 é mostrada a frequência do intervalo, que também se manteve dentro dos limites estabelecidos pela norma [4], apenas apresentou alguns picos esporádicos, talvez se devam a erros de quantização, erros de dessincronização do *clock* do microcontrolador ou todos os anteriores. Necessita de mais investigações para julgar se é melhor expurgar tais medidas.

Na Figura 32 estão mostrados os valores relativos à potência no intervalo, e seus valores estão coerentes com os valores medidos de tensão e corrente.

Na Figura 33 é mostrado o fator de *ripple*, o qual, em geral, não apresenta valor superior a 0,5%. De forma esporádica, chegou a apresentar um valor que não excedeu 1%.

Nas Figuras de 34 a 36 e nas Figuras de 38 a 40 as quais apresentaram as medidas com carga, não foram observadas diferenças significativas para o que foi obtido para as mesmas variáveis quando sem carga.

Na Figura 37 houve uma discrepância no valor de distorção individual da 7ª harmônica quando comparado aos resultados obtidos através da observação pelo período de 7 horas. Utilizando-se o mesmo intervalo foi gerado um novo gráfico para uma melhor observação, o qual foi mostrado na Figura 41.

Na Figura 41 é possível observar, praticamente, a ausência de harmônicas, inclusive, ocorre de forma esporádica, o valor nulo, após o televisor ser ligado. Pode-se observar também um pico de distorção na 7ª harmônica no momento em que o televisor é ligado.



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a desenvolver um módulo aferidor de qualidade da energia elétrica que fosse facilmente programável pelo usuário, e além disso que possibilitasse o desligamento da alimentação da carga a fim de evitar riscos ou danos à mesma.

Entretanto, foi possível acrescentar facilidades adicionais ao módulo aferidor, sendo incluído: a capacidade de conexão à internet, possibilidade de ser controlado remotamente por um *smartphone* via *browser* e, apesar de não implementada, há possibilidade de ligação à internet de forma independente, ou seja, não é necessário um servidor fisicamente próximo ao módulo aferidor.

A calibração do protótipo do módulo aferidor não foi efetivada já que o objetivo do projeto foi o do seu desenvolvimento, sendo que a etapa de calibração poderia ser realizada em um trabalho futuro. Além disso, em trabalhos futuros, várias funcionalidades poderiam ser adicionadas ao módulo aferidor, sem a necessidade de alterações muito significativas, tais como:

- obtenção de um módulo aferidor de qualidade de 3 fases. Neste caso, seriam analisadas as 3 fases da rede bem como suas correntes para a determinação mais completa das condições do ponto de entrega da energia elétrica. Nesse caso poderiam ser gerados todos os relatórios das grandezas elétricas definidas em [4]. Entretanto, o módulo aferidor deveria ser utilizado no padrão de entrada ou em cargas trifásicas. O projeto certamente apresentaria um custo maior tanto em relação aos componentes elétricos empregados para obtenção das grandezas elétricas e para a sua filtragem, além de requerer microcontroladores mais rápidos, com maior capacidade de processamento e armazenamento de dados;
- inclusão da possibilidade de identificação da carga, o que permitiria observar o padrão de consumo e identificar as cargas ligadas à rede elétrica. Isso poderia viabilizar a implementação de redes inteligentes (*smart grids*) e possibilitaria a geração de relatórios de possíveis falhas na instalação elétrica podendo propiciar redução de gastos. Entretanto, isso requereria um estudo aprofundado em padrões de carga;

- alteração do módulo aferidor de qualidade para operação em alta tensão. Isso iria requerer a adaptação dos componentes elétricos empregados para obtenção das variáveis elétricas para operação em tensões elevadas. Entretanto, o custo certamente iria se elevar consideravelmente;
- ampliar os indicadores para a inclusão de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), assim atendendo aos requisitos para unidades consumidoras.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JANUZZI, A. C. **Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- [2] SOUZA, R. P. **Desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia via USB**. 2008. Projeto (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa.
- [3] LIMA, M. A. A. **Desenvolvimento de um sistema de medidas em tempo real de tensão, corrente, potência e energia conectado à porta paralela do computador**. 2007. Projeto (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa.
- [4] ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_7.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf) >. Acesso em: 03 set. 2016.
- [5] ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/prodist> >. Acesso em: 01 set. 2013.
- [6] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F. e WAYNE, B. H. **Electrical Power Systems Quality**, MCGRAW-HILL, 1996
- [7] LEITÃO, T. **Estudo indica que Brasil desperdiça por ano energia suficiente para abastecer o estado do Rio**. Disponível em: < <http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2013-01-09/estudo-indica-que-brasil-desperdiça-por-ano-energia-suficiente-para-abastecer-estado-do-rio> >. Acesso em: 01 set. 2013.
- [8] IAR Systems. **IAR Embedded Workbench**. Disponível em: < <https://www.iar.com/> >. Acesso em: 05 jan. 2016.
- [9] LEM. **LA55-P**. Disponível em: < <http://www.digikey.com/product-detail/en/lem-usa-inc/LA-55-P/398-1010-ND/409823> >. Acesso em: 05 jan. 2016.
- [10] LEM. **LV20-P**. Disponível em: < <http://www.digikey.com/product-detail/en/lem-usa-inc/LV-20-P/398-1020-ND/409833> >. Acesso em: 05 jan. 2016.
- [11] MANCINI, R. **Single-supply op amp design**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt189/slyt189.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2016.
- [12] ST. **STM32F407VG6**. Disponível em: <<http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f4-series.html?qquerycriteria=productId=SS1577>>. Acesso em: 05 jan. 2016.

[13] ATMEL. **ATmega328P-PU**. Disponível em: <[http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)>. Acesso em: 05 jan. 2016.

[14] STMICROELETRONICS. **STM32F4DISCOVERY: Discovery kit for STM32 F4 series - with STM32F407VG MCU**.

Disponível em: <<http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>>.

Acesso em: 01 set. 2013.