

Fernando Ferreira de França

**Sistema Embocado para Monitoramento e  
Caracterização da Qualidade de Energia em  
Instalações Elétricas Residenciais**

Rio de Janeiro

2016



Fernando Ferreira de França

# **Sistema Embarcado para Monitoramento e Caracterização da Qualidade de Energia em Instalações Elétricas Residenciais**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estácio de Sá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Estácio de Sá  
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. D.Sc. André Sarmento Barbosa  
Coorientador: Prof. D.Sc. José Brant de Campos

Rio de Janeiro  
2016

F814s França, Fernando Ferreira de

Sistema Embocado para Monitoramento e Caracterização da Qualidade de Energia em Instalações Elétricas Residenciais. / Fernando Ferreira de França. – Rio de Janeiro, 2016.

85 p.; il. (algumas color.); 30 cm.

Trabalho monográfico (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –  
Universidade Estácio de Sá  
Engenharia Elétrica, 2016

I. Título  
1. Qualidade de Energia Elétrica. 2. Sistemas Embocados. 3. Sustentabilidade.

CDD 621.3

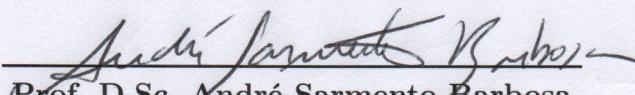
Fernando Ferreira de França

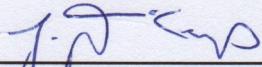
## **Sistema Embarcado para Monitoramento e Caracterização da Qualidade de Energia em Instalações Elétricas Residenciais**

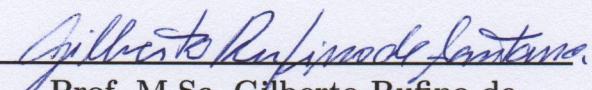
Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estácio de Sá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

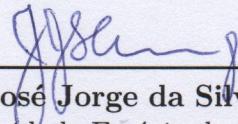
Aprovado em 18 de junho de 2016.

Banca examinadora:

  
**Prof. D.Sc. André Sarmento Barbosa**  
Universidade Estácio de Sá

  
**Prof. D.Sc. José Brant de Campos**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

  
**Prof. M.Sc. Gilberto Rufino de  
Santana**  
Universidade Estácio de Sá

  
**Prof. M.Sc. José Jorge da Silva Araújo**  
Universidade Estácio de Sá

Rio de Janeiro  
2016



*Este trabalho é dedicado àqueles que fizeram tudo o que havia para ser feito  
simplesmente porque era possível. Vocês sabem quem são.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo por suas grandes sacadas como a luz, a força gravitacional, o eletromagnetismo e tudo mais que permeia este vasto universo desde o *Big Bang*.

Aos meus pais Vilma e Sebastião, avós Eunice e Francisco (em memória), madrinhas Denise e Dayse e toda família pelo apoio incondicional e suporte em todas as minhas escolhas até aqui.

A todos os meus professores, em especial: Alexander Mazolli (pelo começo desse trabalho e pelas cervejas em Paris), André Sarmento (pela orientação, paciência e principalmente pelas conversas), Jorge Bitencourt (por estar disponível sempre para resolver qualquer problema), José Araújo (pelo apoio e por sempre estar disposto a ajudar), José Brant (por todo incentivo, oportunidades e conselhos), Mathusalecio Padilha, David Moura, Robson França e Paula Faragó pelos incentivos e por estarem sempre na torcida. Vocês são verdadeiros mestres.

A todos os meus amigos que sempre estiveram por perto mesmo quando estive longe, em especial: Alexandre Lourenço, Artur Vilar, Bianca Cheriff, Carlos Galindo, Gabriel Guerra, Guilherme Garcia, Jan Seidl, João Gabriel, Matheus Vicente, Rafael Gama, Rafael Pereira e Victor Ferraz. Obrigado pelo apoio, conversas, dúvidas, pizzas, cafés, cervejas, jogatinas, projetos, foguetes e roque!



*“Do. Or not do. There is no try.”*  
*(Mestre Yoda)*



## RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e construção de um sistema embarcado que, através de instrumentos de hardware e software, monitora os diversos parâmetros que impactam na redução da qualidade de energia em uma instalação elétrica residencial monofásica com o objetivo de caracterizar o desempenho desta instalação com base nos parâmetros estabelecidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O sistema desenvolvido é composto por um primeiro estágio de instrumentação eletrônica para condicionamento e medição dos sinais de tensão, corrente e frequência da rede elétrica, seguido pela amostragem e conversão analógico-digital e finalmente o processamento dos dados para visualização das informações. Através da construção do protótipo foi possível realizar as medições propostas obtendo como resultados a caracterização do desempenho da instalação elétrica monitorada através dos indicadores de qualidade de energia elétrica estabelecidos pelo PRODIST, tanto para a qualidade do produto como também para a qualidade do serviço.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia Elétrica. Sistemas Embarcados. Sustentabilidade.



## ABSTRACT

This project presents the development and construction of an embedded system that monitors the various aspects that impacts on power quality in a single-phase electrical installation, in order to characterize the performance of this installation based on parameters established by the PRODIST document, prepared by the National Electric Energy Agency (ANEEL). The developed system consists of a first electronics instrumentation stage for conditioning and measuring of voltage, current and frequency signals, followed by sampling, analog-to-digital conversion and finally the data processing for information presentation. By building the prototype it was possible to perform measurements, obtaining as the results the performance characterization for the monitored electrical installation through the power quality indicators established by PRODIST, both for the quality of the product but also for the quality of service.

**Keywords:** Electrical Power Systems Quality. Embedded Systems. Sustainability.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama unifilar simplificado de um SEP . . . . .	27
Figura 2 – Integração eletroenergética no Brasil . . . . .	29
Figura 3 – Interação entre fonte e cargas . . . . .	31
Figura 4 – Faixas de tensão na distribuição . . . . .	33
Figura 5 – Triângulo das potências . . . . .	36
Figura 6 – Forma de onda e espectro de frequências harmônicas de uma fonte chaveada . . . . .	37
Figura 7 – Flutuação de tensão causada pela operação de forno a arco . . . . .	40
Figura 8 – Interrupção momentânea de tensão precedida por afundamento . . . . .	43
Figura 9 – Afundamento temporário de tensão causado pela partida de motor . . . . .	44
Figura 10 – Indicadores de continuidade apurados na fatura do consumidor pela distribuidora Light Serviços de Eletricidade SA . . . . .	49
Figura 11 – Arquiteturas de computadores <i>Harvard</i> e <i>von Neumann</i> . . . . .	52
Figura 12 – Tiva C Series TM4C123G LaunchPad . . . . .	53
Figura 13 – Diagrama de blocos do microcontrolador TM4C123GH6PM . . . . .	54
Figura 14 – Raspberry Pi . . . . .	55
Figura 15 – Arquitetura geral do sistema . . . . .	57
Figura 16 – Protótipo do sistema . . . . .	58
Figura 17 – <i>Front-end</i> para medição de tensão . . . . .	59
Figura 18 – Sinal de tensão condicionado para o processo de amostragem . . . . .	60
Figura 19 – <i>Front-end</i> para medição de corrente . . . . .	61
Figura 20 – Sinal de corrente condicionado para o processo de amostragem . . . . .	61
Figura 21 – <i>Front-end</i> para medição de frequência . . . . .	62
Figura 22 – Sinal de saída da detecção da passagem por zero . . . . .	63
Figura 23 – Relação de tensão do conversor A/D . . . . .	64
Figura 24 – Diagrama de fluxo de dados da conversão A/D . . . . .	65
Figura 25 – Diagrama de fluxo de dados da transmissão serial . . . . .	66
Figura 26 – Diagrama de fluxo de dados para o software de aquisição, conversão A/D e transmissão serial . . . . .	67
Figura 27 – Comunicação serial (UART) entre o TM4C123 e Raspberry Pi . . . . .	68
Figura 28 – Diagrama de fluxo de dados para o software das.py para leitura de dados na porta serial e gravação no banco de dados . . . . .	69
Figura 29 – Diagrama de classes UML dos módulos <i>database.py</i> e <i>uart.py</i> . . . . .	69
Figura 30 – Arquitetura geral do sistema Web . . . . .	70
Figura 31 – Página principal do sistema de monitoramento de QEE . . . . .	71
Figura 32 – Página de relatórios do sistema de monitoramento de QEE . . . . .	72

Figura 33 – Histograma de tensões para 24 horas . . . . .	74
Figura 34 – Histograma de tensões para 168 horas . . . . .	74
Figura 35 – Índices para as transgressões da tensão eficaz em 24 horas . . . . .	76
Figura 36 – Índices para as transgressões da tensão eficaz em 168 horas . . . . .	76
Figura 37 – Monitoramento em tempo real da tensão . . . . .	77
Figura 38 – Monitoramento em tempo real da corrente . . . . .	78
Figura 39 – Monitoramento em tempo real da potência e fator de potência . . . . .	78
Figura 40 – Monitoramento em tempo real da frequência . . . . .	79
Figura 41 – Indicadores de continuidade para a qualidade do serviço . . . . .	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de energia utilizadas no Brasil em operação . . . . .	27
Tabela 2 – Agentes de maior capacidade instalada no Brasil em operação . . . . .	28
Tabela 3 – Fenômenos de QEE causados pela interação entre sistema e cargas . .	31
Tabela 4 – Ponto de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220 V / 127 V) . . . . .	34
Tabela 5 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em percentagem da tensão fundamental . . . . .	38
Tabela 6 – Valores de referência para avaliação da flutuação de tensão . . . . .	41
Tabela 7 – Fatores de transferência típicos para avaliação da flutuação de tensão .	41
Tabela 8 – Bandeiras tarifárias para consumidores em baixa tensão residencial . .	47
Tabela 9 – Limites de continuidade por unidade consumidora em área urbana e tensão contratada $TC \leq 1kV$ . . . . .	50
Tabela 10 – Relação de medição do circuito <i>front-end</i> de tensão . . . . .	60



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CA	Tensão ou corrente alternada
CC	Tensão ou corrente contínua
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAS	<i>Data Acquisition System</i>
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão
DICRI	Duração de interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão
DIT <sub>h</sub>	Distorção harmônica individual de tensão
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão
DRC	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão
FIFO	<i>First In First Out</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>

I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
SBC	<i>Single Board Computer</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	<i>System on a Chip</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCC	Ponto de Conexão Comum
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSI	<i>Synchronous Serial Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WSGI	<i>Web Server Gateway Interface</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta$  Letra grega maiúscula delta

$\theta$  Letra grega minúscula teta



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>25</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	26
1.1.1	Objetivos Específicos . . . . .	26
<b>2</b>	<b>QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL . . . . .	27
2.2	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO E A QUALIDADE DE ENERGIA .	29
2.3	QUALIDADE DO PRODUTO . . . . .	32
2.3.1	Tensão em Regime Permanente . . . . .	32
2.3.2	Fator de Potência . . . . .	34
2.3.3	Harmônicos . . . . .	36
2.3.4	Desequilíbrio de Tensão . . . . .	39
2.3.5	Flutuação de Tensão . . . . .	39
2.3.6	Variação de Tensão de Curta Duração . . . . .	41
2.3.7	Variação de Frequência . . . . .	44
2.4	QUALIDADE DO SERVIÇO . . . . .	45
2.4.1	Indicadores de Continuidade . . . . .	45
2.5	QUALIDADE DE ENERGIA E OS CUSTOS . . . . .	46
<b>3</b>	<b>SISTEMAS EMBARCADOS . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1	DESCRIÇÃO GERAL . . . . .	51
3.2	MICROCONTROLADORES . . . . .	52
3.3	A FAMÍLIA ARM CORTEX . . . . .	54
3.4	RASPBERRY PI . . . . .	55
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DO SISTEMA . . . . .</b>	<b>57</b>
4.1	DESCRIÇÃO GERAL . . . . .	57
4.2	INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA MEDAÇÃO . . . . .	58
4.2.1	<i>Front-end</i> para Medição de Tensão . . . . .	59
4.2.2	<i>Front-end</i> para Medição de Corrente . . . . .	60
4.2.3	<i>Front-end</i> para Medição de Frequência . . . . .	62
4.3	SISTEMA EMBARCADO PARA AQUISIÇÃO E CONVERSÃO DE SINAIS	63
4.4	SISTEMA EMBARCADO PARA PROCESSAMENTO DE DADOS E APRESENTAÇÃO . . . . .	68
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>73</b>
5.1	QUALIDADE DO PRODUTO . . . . .	73

5.1.1	Histograma de Tensões . . . . .	73
5.1.2	Indicadores Individuais de QEE . . . . .	75
5.1.3	Monitoramento em Tempo Real . . . . .	77
5.2	QUALIDADE DO SERVIÇO . . . . .	80
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo sustentável dos recursos não renováveis é uma crescente preocupação em nossa sociedade. O consumo a partir de fontes renováveis, aquelas cuja reposição natural é mais rápida que sua utilização, igualmente são alvo de preocupações quando pensamos nos impactos causados ao meio ambiente e consequentemente à nossa própria sobrevivência.

A energia elétrica é fundamental para manutenção da nossa sociedade e tanto sua geração quanto o consumo estão inseridos no contexto da sustentabilidade. Suas diversas formas de produção, a partir de fontes renováveis e não renováveis, observam os mesmos aspectos que relacionam a produção ao consumo, uma vez que essa relação deve estar sempre equilibrada para que não haja desperdício ou falte energia.

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica [1] elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a geração de energia elétrica no mundo no ano de 2012 foi de 21.531,7 TWh, tendo o Brasil ocupado a oitava posição com 2,6% desse total. O consumo de energia elétrica mundial foi de 19.710,4 TWh para o mesmo ano, onde novamente o Brasil ocupou a oitava posição com 2,5% do total.

Com relação a emissão de gases de efeito estufa, o Brasil ocupou a 33<sup>a</sup> posição de acordo com o mesmo documento. É possível compreender essa posição de baixo emissor quando relacionamos com a segunda posição ocupada no ranking de países geradores de energia hidrelétrica, atrás somente da China, bem como a 29<sup>a</sup> posição no ranking de países geradores de energia térmica.

Esses números reforçam a vocação do Brasil no contexto mundial da geração e consumo de energia elétrica de menor potencial poluente, mas também mostram que o consumo energético só aumentará com o passar dos anos, no nosso caso o consumo foi de 428,3 TWh em 2008 para 498,4 TWh em 2014.

O monitoramento e a caracterização dos diversos aspectos que estão relacionados com os conceitos de qualidade de energia elétrica (QEE) têm impacto direto neste contexto da geração e consumo sustentáveis, uma vez que desde a produção, transmissão até a distribuição, um sistema elétrico de potência (SEP) é composto por outros tantos sistemas onde suas perdas associadas aos distúrbios na qualidade de energia representam perdas econômicas como a redução da vida útil de equipamentos e o desperdício de energia elétrica.

## 1.1 OBJETIVOS

De uma forma geral o presente trabalho tem por objetivo a construção de um sistema embarcado que, através de instrumentos de hardware e software, monitore os diversos parâmetros que impactam na redução da qualidade energia elétrica de uma instalação residencial monofásica, fornecendo ao usuário e consumidor um panorama geral do comportamento de sua instalação.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Medir os diversos parâmetros da instalação elétrica que, de acordo com a ANEEL, definem a qualidade do produto e caracterizam os padrões indicativos de qualidade de energia elétrica;
- b) Medir os diversos parâmetros da instalação elétrica que, de acordo com a ANEEL, definem a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras e caracterizam os indicadores de continuidade no fornecimento;
- c) Armazenar os dados das medições em banco de dados, permitindo o acesso ao usuário a relatórios e gráficos contendo informações indicativas de sua instalação, levando em consideração o contexto tarifário e os distúrbios na qualidade de energia elétrica.

## 2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Entre a produção e o consumo da energia existem diversas etapas nas quais atuam vários agentes e sistemas, e convém aqui contextualizar este cenário com o objetivo de destacar o impacto e a importância da qualidade de energia elétrica.

### 2.1 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O sistema elétrico de potência brasileiro está dividido em geração, transmissão e distribuição de energia, conforme a figura 1. A geração é a área responsável pela produção da energia elétrica, utilizando para tal as diversas fontes disponíveis: hidráulica, térmica, solar, eólica entre outras, bem como as mais diversas tecnologias que são apresentadas na tabela 1.

Figura 1 – Diagrama unifilar simplificado de um SEP.

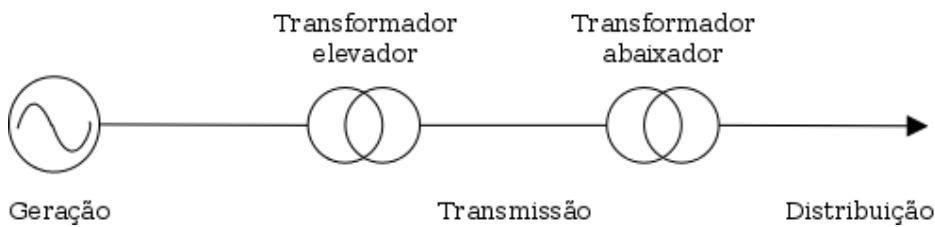


Tabela 1 – Fontes de energia utilizadas no Brasil em operação.

Origem	Quantidade	Potência outorgada (kW)	Potência fiscalizada (kW)	%
Hídrica	1210	94.791.949	92.061.930	64,82
Fóssil	2355	27.262.761	26.154.327	18,64
Biomassa	519	13.922.401	13.274.316	9,52
Eólica	338	8.238.118	8.196.472	5,63
Nuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,36
Solar	37	26.916	22.916	0,02
Total	4461	146.232.146	141.699.961	100

Fonte: Banco de Informações de Geração - BIG: Fontes de Energia [2].

O Brasil, por conta de suas características e dimensões geográficas, possui um grande potencial de geração de energia hidrelétrica, sendo esta a responsável por 64% da estrutura da capacidade instalada de geração de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A maior parte desta capacidade de geração hidrelétrica é de responsabilidade de grandes usinas hidrelétricas, que é outra característica do cenário brasileiro, conforme apresentado na tabela 2.

A produção de energia elétrica no Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte e que durante muitos anos priorizou um modelo de geração centralizada, composto

por centrais geradoras de grande e médio porte geograficamente afastadas dos grandes centros consumidores.

Atualmente existem diversos esforços e incentivos para a construção de usinas de menor porte com objetivo de aumentar a participação do setor privado, diminuir os impactos socioambientais além de descentralizar a geração objetivando entre outros o aumento na confiabilidade do sistema [3].

Tabela 2 – Agentes de maior capacidade instalada no Brasil em operação.

<b>Posição</b>	<b>Agentes do setor</b>	<b>Potência instalada (kW)</b>
1	Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF)	10.615.131,00
2	Furnas Centrais Elétricas S.A.	9.416.240,00
3	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (ELETRO NORTE)	9.199.004,10
4	Tractebel Energia S.A.	7.323.817,73
5	Itaipu Binacional	7.000.000,00
6	Petróleo Brasileiro S.A.	6.239.224,60
7	CEMIG Geração e Transmissão S.A.	6.004.832,40
8	Rio Paraná Energia S.A.	4.995.200,00
9	Copel Geração e Transmissão S.A.	4.921.207,00
10	Energia Sustentável do Brasil S.A. (UHE Jirau)	3.075.000,00

Fonte: Banco de Informações de Geração - BIG: Os 10 Agentes de Maior Capacidade Instalada no País (Usinas em Operação) [4].

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle operacional das instalações de geração e transmissão de energia elétrica interligadas através do Sistema Interligado Nacional (SIN). A transmissão é a área responsável pelo transporte do volume de energia gerado através de distâncias significativas, utilizando para tal linhas de transmissão que serão conectadas aos sistemas de distribuição próximos aos centros de carga (consumidores).

O SIN é formado por empresas das regiões Sudeste, Sul, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, apresentadas na figura 2. De acordo com o ONS, um pequeno percentual da capacidade de produção de energia do país se encontra fora do SIN [5], sendo estes essencialmente pequenos produtores isolados localizados na região amazônica que atendem consumidores locais.

Figura 2 – Integração eletroenergética no Brasil.



Fonte: Procedimentos de Rede [6].

## 2.2 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO E A QUALIDADE DE ENERGIA

O segmento de distribuição é a área do sistema elétrico de potência responsável pela entrega da energia elétrica ao consumidor final, operando geralmente em tensões inferiores a 230 kV de potência. De acordo com ANEEL, o Brasil possui atualmente 63 concessionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica [7].

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), são um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL e dispostos em nove módulos que normatizam e padronizam as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, tendo, de acordo com o Módulo 1 - Introdução, os principais objetivos [8]:

- Garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;

- b) Propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- c) Disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade de energia elétrica;
- d) Estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- e) Assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- f) Disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

Dessa forma, estão sujeitas ao PRODIST todas as concessionárias e permissionárias (denominadas distribuidoras) autorizadas dos serviços de geração distribuída e de distribuição de energia bem como todos os consumidores com instalações conectadas ao sistema em alta, média e baixa tensão.

O Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica é um dos seis módulos técnicos do PRODIST que descrevem ações técnicas dos agentes de distribuição, sendo seus principais objetivos [9]:

- a) Definir os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica abordando a qualidade do produto e do serviço prestado;
- b) Definir, para a qualidade do produto, os conceitos e os parâmetros para o estabelecimento de valores limite para os indicadores de QEE;
- c) Estabelecer, para a qualidade dos serviços prestados, a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento, definindo limites e responsabilidades, além da metodologia de monitoramento automático dos indicadores de qualidade.

Entende-se como qualidade de energia elétrica ou QEE, a condição do sinal de tensão ou corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil [10].

Essa condição adequada de operação que pode ser caracterizada como tendo forma de onda senoidal com frequência fixa, amplitude que varia conforme a modalidade de atendimento e valor eficaz dentro de referências estabelecidas, minimizando falhas ou estados de inoperância. Existem diversos fenômenos ou eventos eletromagnéticos que representam perturbações à QEE em uma instalação seja de natureza permanente ou transitória.

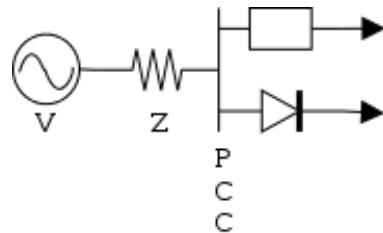
A energia elétrica passa por diversas etapas e sistemas desde a sua produção até a distribuição ao consumidor, que deve ser feita de acordo com os padrões definidos pelo

PRODIST dentro das várias classes de atendimento. Instalações elétricas residenciais se caracterizam pelo consumo de baixa tensão na distribuição (igual ou inferior a 1 kV), composto geralmente por cargas resistivas e indutivas, lineares e não lineares.

Dentro deste cenário diversos fenômenos se manifestam na instalação elétrica a partir da interação das cargas com o sistema, podendo ser prejudiciais para a QEE tanto sob o aspecto do funcionamento adequado quanto da sustentabilidade quando traduzido no baixo aproveitamento da energia fornecida.

Dependendo da natureza da carga instalada sua interação com a fonte poderá produzir eventos que afetarão a forma de onda da tensão e da corrente ao longo do circuito, a jusante do ponto de conexão comum (PCC) apresentado na figura 3. O sistema de distribuição, através de não conformidades na tensão de fornecimento, poderá por sua vez produzir eventos de distorção na forma de onda da tensão que alimenta o circuito. A tabela 3 relaciona esses eventos de acordo com a interação entre sistema e cargas.

Figura 3 – Interação entre fonte e cargas.



Fonte: Adaptado de Harmônicos em Sistemas Elétricos [10].

Tabela 3 – Fenômenos de QEE causados pela interação entre sistema e cargas.

Sistema-Cargas	Cargas-Sistema
Afundamento ou elevação de tensão	Correntes harmônicas
Desequilíbrio de tensão	Corrente reativa
Harmônicos de tensão	Corrente desbalanceada
Interrupção de tensão	Notches de tensão
Oscilações de tensão	Flickers de tensão
Impulso de tensão	

Fonte: Adaptado de Harmônicos em Sistemas Elétricos [10].

A qualidade da tensão fornecida influenciará na corrente que circulará na instalação elétrica assim como o tipo de carga instalada influenciará na tensão no circuito, uma vez que cargas lineares como lâmpadas incandescentes e chuveiros produzirão correntes não distorcidas quando energizadas por uma fonte de tensão senoidal, enquanto cargas não lineares como lâmpadas eletrônicas e computadores pessoais produzirão correntes distorcidas mesmo quando alimentadas por uma fonte de tensão senoidal, isso por causa da natureza de seus circuitos de retificação de tensão e chaveamento.

A tensão no PCC,  $V_{PCC}$ , é dada pela tensão na fonte  $V$  e a queda de tensão na impedância equivalente do circuito  $\Delta V$ , conforme a equação 1.

$$V_{PCC} = V - \Delta V \quad (1)$$

Dependendo da impedância do sistema e da corrente solicitada, correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares circularão através das cargas lineares a jusante do PCC causando indiretamente a distorção da tensão  $V_{PCC}$ , que poderá atingir proporções elevadas em sistemas com alta impedância causando problemas de qualidade de energia elétrica.

Caracterizado o problema da qualidade de energia elétrica, torna-se interessante o monitoramento dos diversos aspectos e fenômenos no fornecimento de energia que, de acordo com o PRODIST, impactam na qualidade do produto, assim como também os indicadores de continuidade para a qualidade do serviço, além de monitorar o comportamento das cargas instaladas e sua interação com o sistema.

A partir desse monitoramento será possível então caracterizar o comportamento da instalação elétrica residencial e analisar o seu desempenho com base nos procedimentos estabelecidos para QEE pelo PRODIST.

## 2.3 QUALIDADE DO PRODUTO

O PRODIST caracteriza os diversos fenômenos de QEE de natureza permanente ou transitória, além de estabelecer critérios de amostragem bem como valores de referência para análise da qualidade do produto [9]. São eles:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência.

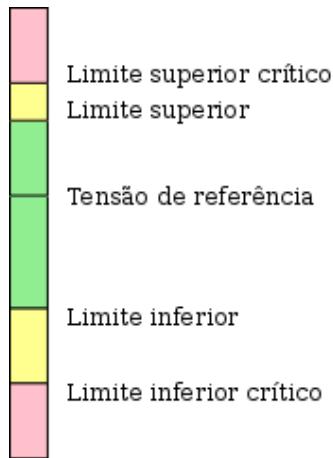
### 2.3.1 Tensão em Regime Permanente

Grande parte da geração e transmissão no sistema elétrico brasileiro é realizada na modalidade alternada, senoidal com frequência fundamental de 60 Hz. Essa também é a base da distribuição assim como o consumo residencial (grupo B, subgrupo B1 no PRODIST).

O PRODIST estabelece os parâmetros e as faixas de valores de tensão em regime permanente divididos como: adequado, precário e críticos com base na tensão de referência, conforme a figura 4. O termo regime permanente se refere ao intervalo de 10 minutos de aquisição e leitura da tensão onde não ocorram distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura.

Tensão adequada se refere à faixa de valores nominais em condições de operação normal, tensão precária se refere à faixa de valores nominais em condições de operação precária demandando da distribuidora medida programada para normalização dentro de um prazo pré-estabelecido, enquanto a tensão crítica se refere à faixa de valores nominais em condições de operação crítica demandando da distribuidora a correção imediata em um prazo pré-estabelecido.

Figura 4 – Faixas de tensão na distribuição.



Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 [9].

O fornecimento de energia elétrica pela distribuidora deve estar dentro dos limites adequados para cada modalidade de atendimento, sendo monofásico ou trifásico no caso residencial.

A classe de atendimento residencial monofásico é realizada com o valor de tensão eficaz nominal de 127 V entre fase e neutro, logo, a tensão de operação deve estar entre 92% e 105% deste valor nominal ( $117 \leq V \leq 133$ ) no ponto de entrega, que corresponde ao ponto de conexão do sistema elétrico da distribuidora com a instalação elétrica da unidade consumidora [11], coincidindo geralmente com o local onde está o equipamento de medição do consumo na unidade.

A conformidade da tensão em regime permanente deve ser analisada através da aquisição de um grupo de valores medidos para a construção dos indicadores individuais da unidade consumidora. Utiliza-se ainda como critério para o descarte e nova aquisição desse grupo de valores a eventual ocorrência, durante o intervalo dos 10 minutos de medição, de

uma variação temporária de tensão, caracterizada pela duração maior que 3 segundos e menor ou igual a 60 segundos com magnitude entre 0,1 pu e 1,1 pu, ou ainda interrupções de longa duração, aquelas com duração superior a 3 minutos [12].

A partir do conjunto de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos (período de integralização), é possível realizar o cálculo do índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para a tensão crítica (DRC) através das equações 2 e 3, respectivamente.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad (2)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100[\%] \quad (3)$$

Onde, de acordo com a tabela 4,  $nlp$  representa o número de leituras na faixa de tensão precária, aquelas com limite inferior maior ou igual a 110 V e menor que 117 V e limite superior maior que 133 V e menor ou igual a 135 V, e  $nlc$  representa o número de leituras na faixa de tensão crítica, tendo como limite inferior menor que 110 V e limite superior maior que 135 V para a modalidade de tensão monofásica.

Tabela 4 – Ponto de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220 V / 127 V).

<b>Tensão de atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de variação da tensão de leitura (Volts)</b>
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: PRODIST Módulo 8 [9].

Estes dois índices, DRP e DRC, compõe o indicador individual de tensão em regime permanente da unidade consumidora. São estabelecidos como limites 3% para o valor da duração relativa da transgressão máxima da tensão precária ( $DRP_M$ ) e o limite de 0,5% para o valor da duração relativa da transgressão máxima da tensão crítica ( $DRC_M$ ), sendo obrigação da distribuidora compensar o consumidor no caso de violação dos limites máximos  $DRP_M$  e  $DRC_M$ .

### 2.3.2 Fator de Potência

O fator de potência em uma instalação elétrica é um dos principais indicadores de QEE pois demonstra o quanto da energia entregue pela distribuidora a unidade consumidora está sendo efetivamente aproveitada para realização de trabalho útil, e quanto da energia está sendo desperdiçada.

Unidades consumidoras atendidas pelos sistemas de distribuição de média e alta tensões devem efetuar medição e controle permanentes do fator de potência em suas

instalações observando os valores de referência de acordo com a regulamentação vigente, que deve estar entre 0,92 e 1,00 indutivo ou entre 1,00 e 0,92 capacitivo sob pena de taxação adicional quando em não conformidade com esses valores (resolução da ANEEL nº 456 de novembro de 2000) [13].

Entretanto, objetivando um melhor aproveitamento da energia elétrica, é interessante que unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição em baixa tensão também meçam e monitorem o fator de potência de suas instalações ainda que, de acordo com o PRODIST [9], a medição individual permanente de unidades consumidoras do grupo B seja facultativa.

O fator de potência relaciona a *potência ativa ou real* -  $P$ , aquela que efetivamente realiza trabalho ao ser consumida pela carga (equipamento elétrico) e é medida em Watt [W], e a *potência reativa* -  $Q$ , medida em Volt-Ampère Reativo [VAR], que surge principalmente como resultado da interação de cargas indutivas como motores elétricos ou luminárias com reatores com a instalação elétrica e não produz trabalho, mantendo-se circulando no circuito degradando a eficiência da instalação com a diminuição no aproveitamento da *potência aparente ou total* -  $S$  que é entregue pela distribuidora e é medida em Volt-Ampère [VA].

Quanto menor o fator de potência da instalação maiores terão de ser as seções dos condutores e a capacidade dos disjuntores pois haverá aumento na intensidade da corrente com consequente aumento nas perdas Joule pelo aumento da temperatura tanto nos condutores quanto nos equipamentos, além de maior queda na tensão na instalação que pode impactar no funcionamento de equipamentos bem como diminuir suas vidas úteis e também menor intensidade luminosa em lâmpadas, causando desconforto.

É possível expressar o fator de potência através da razão entre a potência ativa e a potência aparente, conforme a equação 4, uma vez que ao representarmos vetorialmente as potências, a potência aparente ou total resulta da decomposição da potência ativa com a potência reativa. Podemos também expressar o fator de potência através do ângulo de defasagem (representado por  $\theta$  na figura 5) entre tensão e corrente causada pelo fenômeno de auto-indução que surge quando a corrente atravessa um enrolamento.

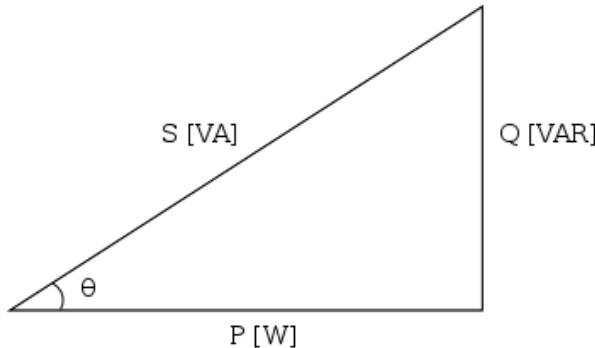
$$FP = \cos(\theta) = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Ao multiplicarmos ainda a potência aparente pelo cosseno do ângulo  $\theta$  obtemos a potência ativa (equação 5). Por esse motivo o nome de fator de potência.

$$P = \cos(\theta) \times S \quad (5)$$

De acordo com o PRODIST, o fator de potência da instalação deve ser calculado

Figura 5 – Triângulo das potências.



Fonte: Próprio autor.

a partir dos valores obtidos das potências ativa e reativa ou ainda a partir das suas respectivas energias, conforme as equações 6 e 7.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

$$FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (7)$$

### 2.3.3 Harmônicos

Distorções harmônicas são caracterizadas como fenômeno de natureza permanente que provocam deformações tanto na forma de onda da tensão como também na corrente. Consistem em componentes senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental e estão presentes no circuito enquanto sua fonte geradora estiver em operação, contribuindo assim para a redução da QEE.

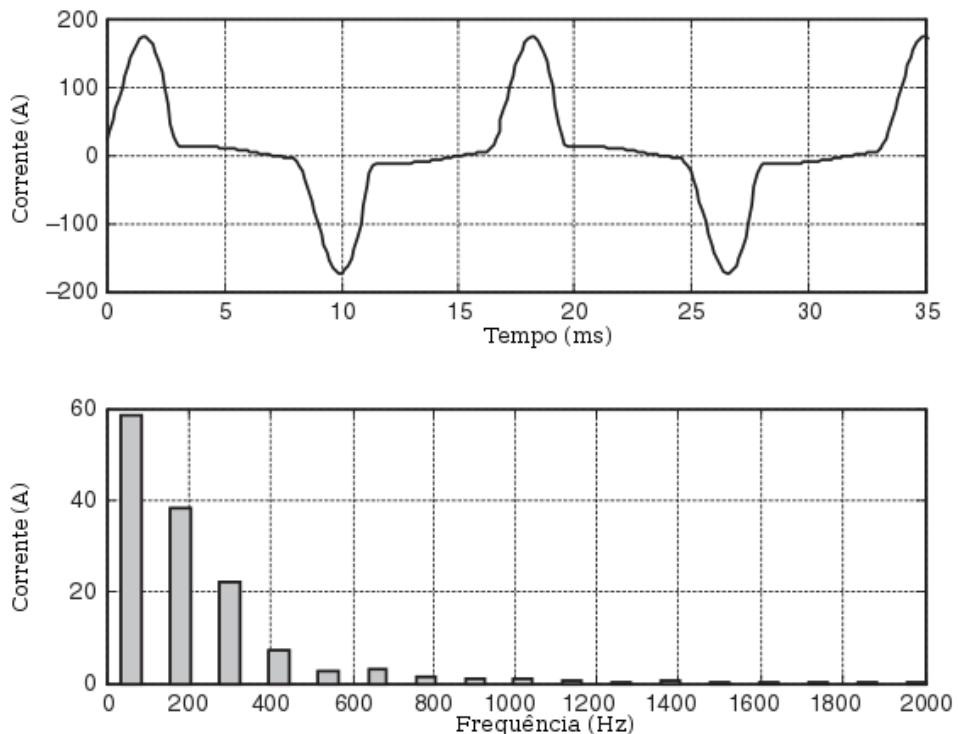
A eletrônica de potência introduziu uma série de componentes semicondutores que compõe diversos equipamentos e esses componentes, de natureza não linear, são responsáveis por uma parcela significativa dos harmônicos encontrados nas instalações elétricas [13]. Além disso, equipamentos industriais como fornos a arco, máquinas de solda e sistemas de tração elétrica também são fontes de distorções harmônicas.

Harmônicos classificados como não característicos são aqueles produzidos por dispositivos como lâmpadas fluorescentes e a vapor de sódio, fornos a arco e transformadores ou reatores operando em condição de saturação. Harmônicos classificados como característicos são aqueles produzidos por equipamentos que utilizam dispositivos semicondutores como *MOSFET*, *IGBT*, *GTO*, *MCT*, *SCR* e apresentam comportamento não linear como retificadores, inversores, compensadores estáticos e equipamentos de alimentação ininterrupta.

Estes dispositivos são largamente utilizados por equipamentos encontrados hoje em dia nas residências como computadores pessoais, forno micro-ondas e televisores. A presença de cargas não lineares nas instalações elétricas implica na produção de correntes distorcidas mesmo quando alimentadas por fontes de tensão senoidais, essa distorção é gerada durante os processos de retificação e chaveamento e ao circularem através da instalação poderão a partir da interação com a impedância do sistema gerar e propagar tensões também distorcidas a jusante do ponto de conexão comum das cargas.

A figura 6 ilustra a forma de onda distorcida da corrente e o espectro de frequências produzidas por uma fonte chaveada comum em equipamentos eletrônicos.

Figura 6 – Forma de onda e espectro de frequências harmônicas de uma fonte chaveada.



Fonte: Adaptado de *Electrical Power Systems Quality* [14].

Componentes harmônicas são frequências múltiplas da frequência fundamental e sua ordem é dada como a razão entre sua frequência e a frequência fundamental, que em nosso sistema é de 60 Hz. Fontes chaveadas, por exemplo, costumam produzir grande quantidade de harmônicas de 3<sup>a</sup> ordem, ou seja,  $3 \times 60\text{Hz} = 180\text{Hz}$  [14].

A presença de componentes harmônicas nas instalações elétricas pode causar diversas consequências que degradam a QEE como redução do fator de potência, aumento da quantidade de correntes no condutor neutro, sobreaquecimento de equipamentos com consequente redução de sua vida útil, atuação intempestiva de dispositivos de proteção,

sobreaquecimento dos condutores com consequente aumento das perdas Joule, ruído audível ( $\approx 3\text{kHz}$ ), vibração de equipamentos e interferência em sistemas telefônicos.

O PRODIST define os valores de referência relativos à presença de distorções harmônicas nas instalações com foco na QEE. A distorção harmônica individual de tensão ( $DIT_h$ ) é definida através da razão entre a componente harmônica em uma determinada frequência ( $V_h$ ) pela sua correspondente fundamental ( $V_1$ ) (equação 8). A distorção harmônica total de tensão ( $DTT$ ) é definida através da razão entre o valor médio quadrático de todas as componentes existentes e sua correspondente fundamental (equação 9).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (9)$$

O valor de referência para as distorções harmônicas totais em porcentagem de tensão fundamental para tensão nominal  $V_N \leq 1\text{kV}$  é de 10%. Também devem ser observados os limites para as distorções harmônicas individuais conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em percentagem da tensão fundamental.  $V_N \leq 1\text{kV}$

<b>Grupo</b>	<b>Ordem</b>	<b>Distorção harmônica individual de tensão (%)</b>
Ímpares não múltiplas de 3	5 7 11 13 17 19 23 25 $>25$	7,5 6,5 4,5 4 2,5 2 2 2 1,5
Ímpares múltiplas de 3	3 9 15 21 $>21$	6,5 2 1 1 1
Pares	2 4 6 8 10 12 $>12$	2,5 1,5 1 1 1 1 1

Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 [9].

### 2.3.4 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é um fenômeno de QEE de natureza permanente que está associado com a distribuição inadequada de cargas monofásicas ou bifásicas em uma instalação trifásica, fazendo com que as três fases apresentem diferentes valores no módulo da tensão ou defasagem diferente de 120° elétricos [15].

Quando no sistema de distribuição existem cargas monofásicas distribuídas de forma inadequada poderão surgir no circuito tensões de sequência negativa. O problema se agrava quando os consumidores com instalações trifásicas também possuem uma má distribuição em seus circuitos, com assimetria entre as impedâncias, fazendo surgir correntes desequilibradas no circuito da distribuidora, dessa forma, o PRODIST estabelece metodologia para medição do fator de desequilíbrio a ser adotado pela distribuidora.

Outros problemas causados pelo desequilíbrio de tensão são o surgimento de harmônicas de 3<sup>a</sup> ordem e seus múltiplos além do impacto na vida útil de motores de indução trifásicos e máquinas assíncronas [16].

A operação simétrica do circuito através de uma melhor distribuição das cargas e a instalação de dispositivos de compensação são ações de correção do problema e o PRODIST estipula como referência para o fator de desequilíbrio um valor igual ou inferior a 2%.

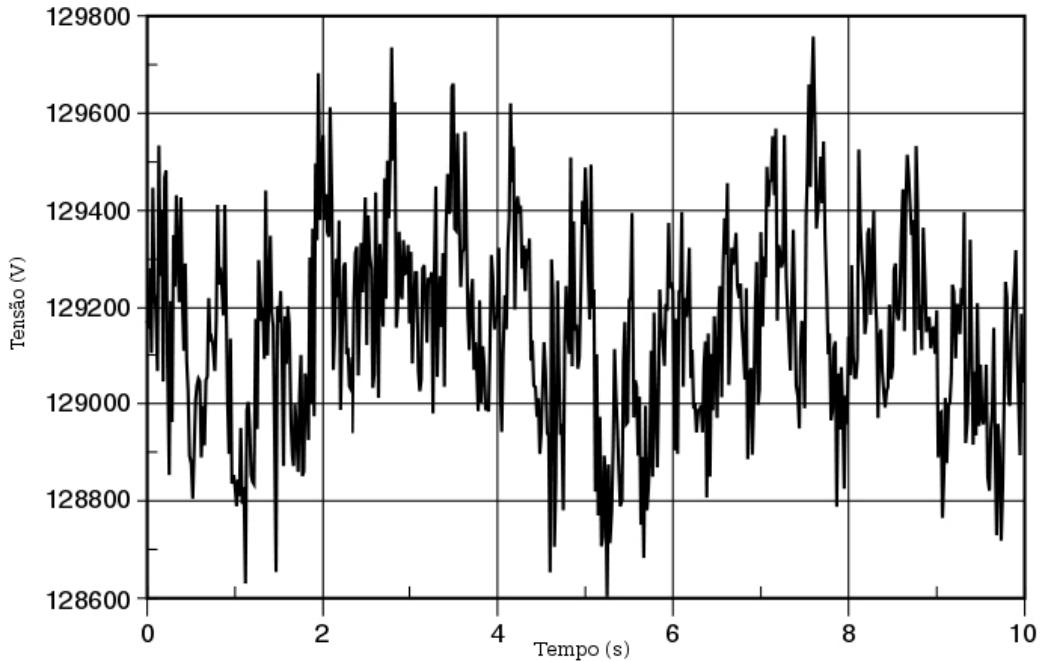
### 2.3.5 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno intermitente caracterizado por variações aleatórias no valor eficaz da tensão com magnitudes que normalmente não excedem a faixa compreendida entre 0,9 pu e 1,1 pu [14].

Algumas cargas como fornos a arco podem apresentar variações rápidas na magnitude da corrente demandada, causando consequentemente variações na tensão que são conhecidas como cintilação luminosa ou *flicker*, esse termo advém do efeito causado pela cintilação ao ser percebida pelo olho humano e um dos objetivos na análise deste fenômeno de QEE é minimizar o incômodo causado na visão pela sua presença na instalação. A flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético enquanto a cintilação luminosa é o resultado da flutuação em algumas cargas.

Cargas industriais como fornos a arco, laminadoras e máquinas de solda são grandes responsáveis pelas flutuações de tensão nos sistemas de transmissão e distribuição e além da cintilação podem causar outros efeitos como oscilações de potência e torque em motores elétricos, interferências em equipamentos de instrumentação eletrônica e eletroeletrônicos residenciais como televisores e computadores. A figura 7 apresenta um exemplo da forma de onda da tensão produzida por um forno a arco responsável pela introdução de flutuações de tensão.

Figura 7 – Flutuação de tensão causada pela operação de forno a arco.



Fonte: Adaptado de *Electrical Power Systems Quality* [14].

A flutuação de tensão é definida pela sua magnitude em RMS expressa como um percentual da fundamental. Tipicamente magnitudes de 0,5% podem resultar em uma cintilação perceptível para o olho humano se estiverem dentro de uma faixa de frequência de 6 Hz a 8 Hz. A norma IEC 61000-4-15 [17] define a metodologia e especifica a instrumentação para medição de cintilações luminosas.

A metodologia simula a interação lâmpada-olho-cérebro modelada através de uma função de transferência que produz uma métrica que permite quantificar essa interação, chamada de *short-term flicker sensation*, identificada no PRODIST como severidade de curta duração (Pst). Esse valor representa o nível da flutuação de tensão necessária para causa a percepção da cintilação luminosa em 50% das pessoas observadas. Outra medida, chamada de *long-term flicker sensation*, identificada no PRODIST como severidade de longa duração (Plt), verifica a severidade do distúrbio durante ciclos longos.

As amostras de Pst são geralmente reportadas em intervalos de 10 minutos enquanto o valor de Plt é produzido para conjuntos de 2 horas de valores de Pst [14]. De acordo com o PRODIST, os índices de severidade de curta duração e longa duração são calculados através das equações 10 e 11, respectivamente.

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

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (11)$$

Onde  $P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$  e  $P_{50}$  representam os níveis exercidos durante os períodos de observação em 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50%, respectivamente. Esses valores foram definidos através de metodologia estatística proposta pela União Internacional de Eletrotermia (UIE), e levam em consideração a característica aleatória do fenômeno de cintilação luminosa, correlacionando os níveis de flutuação em pu com as porcentagens de tempo de duração [18].

São consideradas pelo PRODIST três faixas de referência para avaliação da QEE quanto às flutuações de tensão: precária, adequada e crítica, conforme a tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Valores de referência para avaliação da flutuação de tensão.

<b>Valor de referência</b>	<b>PstD95%</b>	<b>PltS95%</b>
Adequado	< 1pu/FT	< 0,8pu/FT
Precário	1pu – 2pu/FT	0,8pu – 1,6/FT
Crítico	> 2pu/FT	> 1,6pu/FT

Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 [9].

O fator de transferência (FT) deve ser calculado pela relação entre o PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o PltS95% do barramento secundário de baixa tensão de distribuição mais próximo. Caso os valores de FT não sejam conhecidos, a tabela 7 fornece valores típicos que podem ser utilizados na avaliação.

Tabela 7 – Fatores de transferência típicos para avaliação da flutuação de tensão.

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

Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 [9].

O indicador PstD95% será obtido ao longo de 24 horas de medição e o PltS95% ao longo de uma semana de medição e ambos representam os valores de Pst e Plt que foram superados em apenas 5% dos registros medidos nos seus respectivos períodos. Caso esses indicadores se apresentem fora da faixa adequada deverão ser acompanhados pelos agentes responsáveis e medidas como a aplicação de sistemas estáticos de compensação de reativos e capacitores em série podem ser adotados para correção.

### 2.3.6 Variação de Tensão de Curta Duração

Variações de tensão de curta duração são definidas como desvios significativos no valor eficaz da tensão em relação a tensão de referência durante curtos intervalos de

tempo. Sua classificação quanto à duração segundo o PRODIST pode ser momentânea, variando de 1 ciclo até 3 segundos ou temporária, superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos. A literatura também especifica a variação instantânea de tensão, cuja duração é superior a meio ciclo e inferior a 30 ciclos. Variações de tensão menores que meio ciclo são consideradas como transientes pois não podem ser efetivamente caracterizados por uma mudança no valor eficaz da tensão bem como da frequência fundamental [9][14].

As variações no valor eficaz em relação a tensão de referência são classificadas como interrupção quando a amplitude da tensão eficaz é inferior a 0,1 pu, afundamento, *sag*, ou ainda *dip*, quando a tensão eficaz é superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu ou elevação ou *swell*, caracterizada por um aumento do valor eficaz superior a 1,1 pu.

Estes desvios podem ser causados por condições de falta no sistema, energização de grandes cargas que demandam altas correntes de partida ou ainda perda de conexão intermitente de cabos no sistema. Dependendo da localização do evento de falta e das condições de operação do sistema, a falta poderá ocasionar tanto um afundamento quando uma elevação na tensão ou ainda uma interrupção. Esteja próxima ou distante do ponto de interesse, o impacto na tensão durante a condição de falta será uma variação de curta duração até que os dispositivos de proteção atuem para restabelecer a condição do sistema.

Essas condições de falta nos sistemas de transmissão e distribuição geralmente estão associadas a descargas atmosféricas, vendavais e também contatos acidentais, falhas nos isoladores e outros eventos. Devido a complexidade e grande extensão dos sistemas de transmissão e distribuição, as eventuais faltas são as grandes responsáveis pelas interrupções, afundamentos e elevações bem como curtos-circuitos.

Os sistemas de distribuição possuem geralmente configuração radial e dessa forma a ocorrência de curtos-circuitos nos ramais de uma subestação dificilmente causarão afundamentos de tensão em outra subestação, afetando somente as unidades consumidoras dos ramais adjacentes [19].

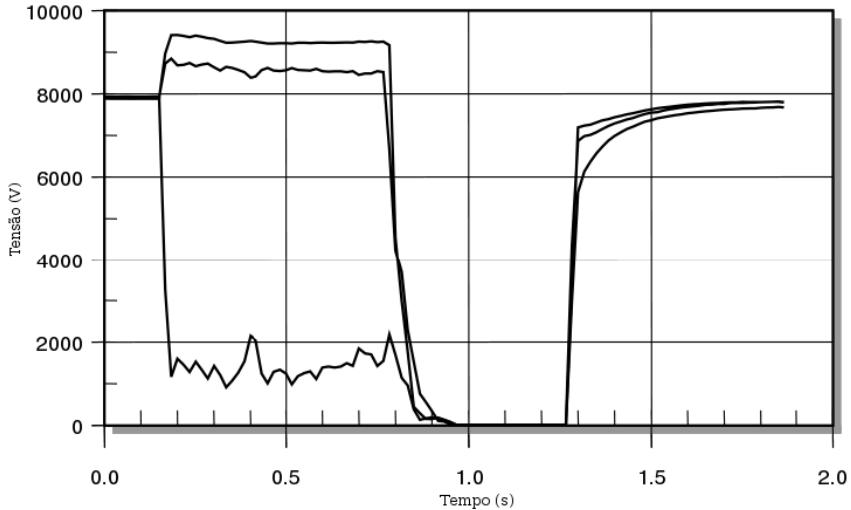
Interrupções momentâneas ou temporárias podem ser resultado de uma condição de falta bem como falhas em equipamentos ou ainda mal funcionamento de controles. Nesses casos, a duração da interrupção será determinada pelo tempo de atuação dos dispositivos de proteção, onde dispositivos instantâneos geralmente limitam a interrupção a 30 ciclos e dispositivos com retardo poderão prolongar a interrupção. No caso de interrupção por mal funcionamento ou perda de conexão dos cabos a duração da interrupção será irregular.

Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão, também provocadas por conta de faltas no sistema onde ocorrerá o afundamento no período entre o início da falta e o início da atuação do dispositivo de proteção.

A figura 8 apresenta uma interrupção momentânea na qual ocorre um afundamento de tensão de 20% em uma das fases durante 3 ciclos até a interrupção que tem duração

de 1,8 segundos, quando a atuação do dispositivo de proteção retorna o sistema a sua condição normal.

Figura 8 – Interrupção momentânea de tensão precedida por afundamento.



Fonte: Adaptado de *Electrical Power Systems Quality* [14].

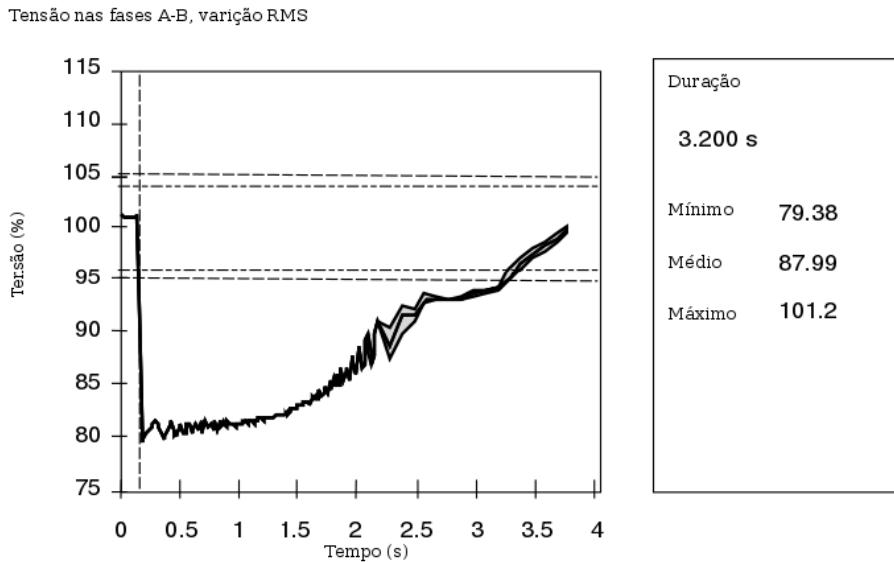
Afundamentos momentâneos ou temporários, assim como as interrupções, podem estar associados a condições de falta no sistema mas podem ter relação também com a energização de grandes cargas ou partida de grandes motores. Um motor de indução pode drenar mais de seis vezes sua corrente durante a partida resultando em um afundamento de tensão significativo. A figura 9 apresenta o efeito do afundamento causado pela partida de um motor onde é possível constatar que o restabelecimento da tensão é gradual e dura cerca de 3 segundos até retornar ao valor nominal.

Consumidores industriais podem adotar medidas para reduzir a corrente de partida nos motores minimizando o impacto no sistema.

Elevações momentâneas ou temporárias de tensão não são tão comuns apesar de estarem associadas a condições de falta como os afundamentos, e estão associadas geralmente a elevações temporárias de tensão causadas pela queda em uma das fases do sistema. Também podem ocorrer como consequência do desligamento de uma carga de grande porte ou energização de um banco de capacitores.

A severidade da elevação de tensão durante uma condição de falta no sistema será função da localização da falta, impedância do sistema ou ainda aterramento. Em um sistema sem aterramento e com impedância de sequência zero infinita, a elevação pode chegar a 1,73 pu durante a condição de falta enquanto próximo a uma subestação com sistema de aterramento haverá elevação mínima ou nula na tensão durante a falta, uma vez que o transformador da subestação é geralmente conectado em delta-estrela, fornecendo um caminho de baixa impedância para a corrente de falta.

Figura 9 – Afundamento temporário de tensão causado pela partida de motor.



Fonte: Adaptado de *Electrical Power Systems Quality* [14].

A ocorrência de variações de tensão de curta duração impacta diretamente no funcionamento de equipamentos eletroeletrônicos existentes nas residências, causando por exemplo perdas de dados em computadores, perda de programação e configuração em relógios digitais de televisores fornos micro-ondas.

Além dos parâmetros de duração e amplitude dos eventos, o PRODIST caracteriza as variações de tensão de curta duração pela frequência de ocorrência, agrupando-as por faixas de amplitude e duração onde eventos consecutivos em um período de 3 minutos são tratados como um único evento. Apesar disso, não são estabelecidos padrões de desempenho para estes fenômenos sendo obrigação da distribuidora somente disponibilizar para a ANEEL dados anuais com informações de desempenho dos barramentos de distribuição monitorados.

### 2.3.7 Variação de Frequência

Variações na frequência fundamental do sistema elétrico são caracterizadas pelo PRODIST como um fenômeno de QEE uma vez que em condições normais de operação as instalações de geração e distribuição conectadas ao sistema devem operar dentro dos limites entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

A frequência do sistema está diretamente relacionada com a velocidade de rotação dos geradores e pequenas variações na frequência podem ocorrer como resultado do balanceamento dinâmico entre as cargas e o sistema. Variações de frequência fora dos limites aceitáveis poderão ocorrer como resultado de faltas no sistema de transmissão,

disconexão de um grande bloco de cargas ou de uma grande fonte geradora. Entretanto, a ocorrência de variações significativas na frequência é rara nos modernos sistemas elétricos interconectados, sendo mais comum em sistemas isolados como em casos de geração própria em algumas indústrias.

O PRODIST estabelece ainda que em caso de variações que excedam os limites estabelecidos, os mesmos devem ser retomados 30 segundos após o início do evento e que em condições extremas como no corte de geração ou de carga para reequilibrar a relação carga-geração, a variação na frequência não pode exceder a faixa entre 56,5 Hz e 66 Hz, permanecendo acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos, ou ainda abaixo de 58,6 Hz por não mais que 10 segundos ou abaixo de 57,5 Hz por não mais que 5 segundos [9].

## 2.4 QUALIDADE DO SERVIÇO

A qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores também é caracterizada como um dos aspectos da QEE pelo PRODIST e através da apuração de indicadores de continuidade é possível oferecer aos consumidores parâmetros para avaliação do mesmo. Através desses indicadores pode-se estabelecer uma relação mais transparente entre os consumidores e as concessionárias do serviço de distribuição além de servir como base de informações para planos de melhorias e expansão da infraestrutura do sistema.

### 2.4.1 Indicadores de Continuidade

Através do registro e controle das interrupções as distribuidoras devem elaborar indicadores de continuidade para que a ANEEL e os consumidores possam avaliar o desempenho do sistema e a qualidade do serviço prestado. A continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica é apurada através da análise da duração bem como da frequência das interrupções ocorridas para períodos mensais, trimestrais e anuais, composto por indicadores individuais para cada unidade consumidora como também indicadores agrupados para conjuntos de unidades consumidoras.

O PRODIST considera como interrupção quando o valor da tensão de fornecimento for igual ou menor a 70% da tensão nominal por um período de tempo maior ou igual a 3 minutos [8].

O indicador de duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, DIC, expressa em horas e centésimos de hora o tempo decorrido de todas as interrupções ocorridas na unidade consumidora. O cálculo do DIC é feito através da equação 12.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (12)$$

A frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, FIC, expressa a quantidade de interrupções registradas para a unidade consumidora através da relação apresentada na equação 13.

$$FIC = n \quad (13)$$

A duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, DMIC, expressa em horas e centésimos de hora o maior tempo decorrido em uma única interrupção, através da relação apresentada na equação 14.

$$DMIC = t(i)_{máx} \quad (14)$$

O indicador da duração de interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão, DICRI, é expressa em horas e centésimos de horas. Entende-se por dia crítico aquele em que a quantidade de ocorrências emergenciais em um conjunto de unidades consumidoras superou a média acrescida de três desvios padrões dos valores diários. O DICRI é então calculado através da equação 15.

$$DICRI = t_{crítico} \quad (15)$$

Para todos os indicadores apresentados,  $i$  representa o índice de interrupções ocorridas no período de apuração, entre 1 e  $n$ , e  $n$  representa o número de interrupções no período de apuração.

As distribuidoras também apuram os indicadores de continuidade para conjuntos agrupados de unidades consumidoras, são eles a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, DEC, e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, FEC. Estes são calculados com base no número total de unidades faturadas no conjunto agrupado para fins de fiscalização da ANEEL.

## 2.5 QUALIDADE DE ENERGIA E OS CUSTOS

Os fenômenos de QEE se traduzem diretamente nos custos da energia elétrica pelos quais os consumidores pagam, seja através da energia consumida ou aquela que é desperdiçada seja através de perdas Joule, baixo aproveitamento nos aparelhos ou até a redução de suas vidas úteis. Consumidores residenciais não são taxados pela energia reativa.

Além disso, o atual sistema de bandeiras tarifárias aplicado por todas as concessionárias atendendo à Resolução Normativa nº 593 de 17/11/2013, reflete no valor da tarifa de energia elétrica a condição para geração de energia, pois uma vez que os níveis

dos reservatórios das usinas hidrelétricas estejam baixos é necessário recorrer a energia gerada pelas usinas termelétricas, que é mais cara. A ANEEL divulga mensalmente qual a bandeira em vigor para que os consumidores possam adaptar seu consumo. A tabela 8 apresenta a relação das bandeiras e das tarifas aplicadas.

Tabela 8 – Bandeiras tarifárias para consumidores em baixa tensão residencial.

<b>Bandeira</b>	<b>Condição de geração</b>	<b>Tarifa (sem impostos)</b>
Verde	Favorável	Normal
Amarela	Menos favorável	Acréscimo de R\$ 0,015 / kWh
Vermelha	Desfavorável	Patamar 1: acréscimo de R\$ 0,030 / kWh Patamar 2: acréscimo de R\$ 0,045 / kWh

Fonte: Tarifas Consumidores [20].

Os indicadores de qualidade do serviço também são importantes aspectos da QEE e têm impacto direto para as concessionárias do serviço de distribuição de energia elétrica, uma vez que a apuração desses indicadores é utilizada como base de cálculo para compensações aos consumidores através de créditos nas suas faturas. O cálculo para o valor das compensações para os limites de continuidade DIC, DMIC, FIC e DICRI têm como base as equações 16, 17, 18 e 19, respectivamente.

$$Valor_{DIC} = \left( \frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) DIC_p \times \frac{EUSD_{médio}}{730} \times kei \quad (16)$$

$$Valor_{DMIC} = \left( \frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) DMIC_p \times \frac{EUSD_{médio}}{730} \times kei \quad (17)$$

$$Valor_{FIC} = \left( \frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) FIC_p \times \frac{EUSD_{médio}}{730} \times kei \quad (18)$$

$$Valor_{DICRI} = \left( \frac{DICRI_v}{DICRI_p} - 1 \right) DICRI_p \times \frac{EUSD_{médio}}{730} \times kei \quad (19)$$

Onde:

$DIC_v$ : duração de interrupção por unidade consumidora verificada no período considerado e expressa em horas e centésimos de hora;

$DIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção por unidade consumidora expresso em horas e centésimos de hora;

$DMIC_v$ : duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora verificada no período considerado e expressa em horas e centésimos de hora;

$DMIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora expresso em horas e centésimos de hora;

$FIC_v$ : frequência de interrupção por unidade consumidora verificada no período considerado e expressa em horas e centésimos de hora;

$FIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora expresso em número de interrupções e centésimo do número de interrupções;

$DICRI_v$ : duração de interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora verificada no período considerado e expressa em horas e centésimos de hora;

$DICRI_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora expresso em horas e centésimos de hora;

$EUSD_{médio}$ : média aritmética dos encargos de uso do sistema de distribuição correspondentes aos meses do período de apuração do indicador;

730: número médio de horas no mês;

$kei$ : coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em 15 para unidades consumidoras atendidos em baixa tensão de distribuição.

Na apuração dos indicadores de continuidade não são consideradas as seguintes situações:

- a) Falhas nas instalações de responsabilidade do consumidor;
- b) Desligamentos de interesse exclusivo do consumidor;
- c) Desligamentos por inadimplência do consumidor;
- d) Interrupção por motivo de força maior a ser comprovado pela distribuidora;
- e) Operação para alívio de carga no sistema solicitada pelo ONS;
- f) Implementação de ampliações no sistema propostas pelo ONS e aprovados pela ANEEL;
- g) Eventos oriundos de instalações da Rede Básica;
- h) Período de até 3 minutos necessário para realizar o religamento manual de linhas de transmissão cujo religamento automático esteja desativado por solicitação da distribuidora.

A figura 10 apresenta a aplicação dos indicadores de continuidade por parte da distribuidora em uma fatura emitida para a unidade consumidora.

Figura 10 – Indicadores de continuidade apurados na fatura do consumidor pela distribuidora Light Serviços de Eletricidade SA.

TENSÃO NOMINAL EM VOLTS				
Disponível: 127 Limites mínimo: 117      Limites máximo: 133				
INDICADORES DE QUALIDADE				
Mês de referência: Novembro/2015 Conjunto: CACHAMBI AEREO				
Indicadores	Apurado Mensal	Meta Mensal	Meta Trimestral	Meta Anual
DIC	0,00	4,71	9,43	18,86
FIC	0,00	3,11	6,22	12,45
DMIC	0,00	2,60		
DIC - Duração de interrupção individual FIC - Frequência de interrupção individual DMIC - Duração máxima de interrupção contínua DICRI - Duração da interrupção individual em dia crítico				
VALOR DO ENCARGO DE USO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO:				
R\$	58,32			
O cliente tem o direito de solicitar a qualquer tempo a apuração dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI e também receber uma compensação, caso sejam violadas as metas de continuidade individuais – mensal, trimestral e anual – relativos à unidade consumidora de sua responsabilidade.				

Os limites para os indicadores de continuidade individuais DIC, FIC e DMIC para as unidades consumidoras são estabelecidos de acordo com a tabela 9.

Tabela 9 – Limites de continuidade por unidade consumidora em área urbana e tensão contratada  $TC \leq 1kV$ .

Faixa de variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Unidades Consumidoras com Tensão Contratada $\leq 1 kV$ situadas em áreas urbanas						
	DIC (horas)			FIC (interrupções)			DMIC (horas)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
1	16,00	8,00	4,00	11,20	5,60	2,80	2,09
2	16,47	8,23	4,11	11,45	5,72	2,86	2,18
3	16,95	8,47	4,23	11,70	5,85	2,92	2,26
4	17,43	8,71	4,35	11,95	5,97	2,98	2,35
5	17,91	8,95	4,47	12,20	6,10	3,05	2,43
6	18,38	9,19	4,59	12,45	6,22	3,11	2,52
7	18,86	9,43	4,71	12,70	6,35	3,17	2,60
8	19,34	9,67	4,83	12,95	6,47	3,23	2,69
9	19,82	9,91	4,95	13,20	6,60	3,30	2,77
10	20,30	10,15	5,07	13,45	6,72	3,36	2,86
11	20,77	10,38	5,19	13,70	6,85	3,42	2,94
12	21,25	10,62	5,31	13,95	6,97	3,48	3,03
13	21,73	10,86	5,43	14,20	7,10	3,55	3,11
14	22,21	11,10	5,55	14,45	7,22	3,61	3,20
15	22,69	11,34	5,67	14,70	7,35	3,67	3,29
16	23,16	11,58	5,79	14,95	7,47	3,73	3,37
17	23,64	11,82	5,91	15,20	7,60	3,80	3,46
18	24,12	12,06	6,03	15,45	7,72	3,86	3,54
19	24,60	12,30	6,15	15,70	7,85	3,92	3,63
20	25,08	12,54	6,27	15,96	7,98	3,99	3,71
>20 e $\leq 22$	25,89	12,94	6,47	16,47	8,23	4,11	3,80
>22 e $\leq 24$	27,48	13,74	6,87	17,42	8,71	4,35	3,97
>24 e $\leq 26$	29,06	14,53	7,26	18,37	9,18	4,59	4,14
>26 e $\leq 28$	30,65	15,32	7,66	19,32	9,66	4,83	4,31
>28 e $\leq 30$	32,23	16,11	8,05	20,28	10,14	5,07	4,48
>30 e $\leq 32$	33,82	16,91	8,45	21,23	10,61	5,30	4,65
>32 e $\leq 34$	35,40	17,70	8,85	22,18	11,09	5,54	4,82
>34 e $\leq 36$	36,99	18,49	9,24	23,13	11,56	5,78	4,99
>36 e $\leq 38$	38,57	19,28	9,64	24,08	12,04	6,02	5,16
>38 e $\leq 40$	40,16	20,08	10,04	25,04	12,52	6,26	5,33
>40 e $\leq 45$	42,93	21,46	10,73	26,70	13,35	6,67	5,63
>45 e $\leq 50$	46,89	23,44	11,72	29,08	14,54	7,27	6,05
>50 e $\leq 55$	50,86	25,43	12,71	31,46	15,73	7,86	6,48
>55 e $\leq 60$	54,82	27,41	13,70	33,84	16,92	8,46	6,90
>60 e $\leq 65$	58,78	29,39	14,69	36,22	18,11	9,05	7,33
>65 e $\leq 70$	62,74	31,37	15,68	38,60	19,30	9,65	7,75
>70 e $\leq 80$	68,68	34,34	17,17	42,17	21,08	10,54	8,39
>80 e $\leq 90$	76,61	38,30	19,15	46,93	23,46	11,73	9,24
>90 e $\leq 100$	84,53	42,26	21,13	51,69	25,84	12,92	10,09
>100 e $\leq 110$	92,46	46,23	23,11	56,45	28,22	14,11	10,94
>110 e $\leq 120$	100,38	50,19	25,09	61,21	30,60	15,30	11,80
>120	104,34	52,17	26,08	63,59	31,79	15,89	12,22

Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 [9].

### 3 SISTEMAS EMBARCADOS

Sistemas embarcados são sistemas nos quais seus componentes, sejam *hardware* ou *software*, possuem um propósito especial e dedicado [21]. Entretanto, podemos detalhar melhor esse conceito através da sua contextualização.

#### 3.1 DESCRIÇÃO GERAL

A palavra embarcado remete ao fato de que geralmente os principais componentes do sistema não estão acessíveis para o usuário, sendo parte de um produto ou sistema maior com o qual o usuário interage diretamente. Já a palavra sistema designa a existência de diversos componentes que trabalham em conjunto para um propósito comum.

Sistemas embarcados possuem componentes elétricos e eletrônicos que desempenham tarefas computacionais, mas ao contrário dos computadores de uso geral, seu *hardware* e *software* são dedicados ao uso para o qual foram concebidos fazendo com que o usuário não possa alterar seu comportamento ou programação. Outra grande diferença com relação aos sistemas de uso geral é que geralmente sistemas embarcados são baseados em microcontroladores que são compostos por processador, memória de acesso aleatório (*Random Access Memory, RAM*), memória somente para leitura (*Read Only Memory, ROM*) e portas de entrada e saída (E/S), encapsulados em um único componente, enquanto computadores de uso geral possuem estes mesmos dispostos individualmente.

Em geral existem cinco tipos principais de tarefas que são executadas em sistemas embarcados: operações matemáticas e de processamento de dados, manipulação e gestão de tempo como entrada do sistema (medindo período) ou saída (gerando formas de onda), operações de entrada e saída em tempo real para medição e controle, processamento digital de sinais e comunicação [21].

Os sistemas embarcados vêm ganhando cada vez mais espaço ao passo que também se tornam cada vez mais complexos. Muitos deles são executados em tempo real, o que significa a garantia de um determinado tempo de resposta para o processamento da informação, e sua capacidade de se comunicar com o mundo real através de diversas interfaces faz com que sejam utilizados em várias áreas como: médica, automobilística, aeroespacial, medição e controle industrial, e hoje, com as diversas tecnologias se tornando mais acessíveis também estão presentes nos produtos para consumo e uso pessoal diário, que trouxe o advento da Internet das coisas (*Internet of Things, IoT*).

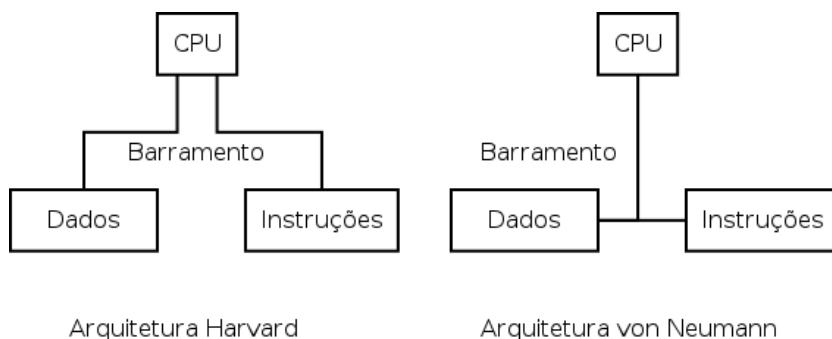
Dentro desse contexto é possível destacar como as principais propriedades dos sistemas embarcados:

- a) Geralmente baseados em microcontroladores;
- b) Propósito dedicado;
- c) Executado em tempo real;
- d) Operações de entrada e saída são importantes;
- e) Produzidos em alto volume e baixo custo;
- f) Estáveis e confiáveis;
- g) Baixo consumo de energia;
- h) Dimensões e peso reduzidos.

### 3.2 MICROCONTROLADORES

Computadores são compostos por uma unidade central de processamento (*Central Processing Unit, CPU*), memória RAM, memória ROM e dispositivos de entrada e saída. Todos esses componentes se comunicam através de um conjunto de trilhas ou fios chamados de barramento (*bus*) que podem ser destinados a troca de dados, acesso aos dispositivos ou controle. Na arquitetura de computadores *von Neumann* o sistema compartilha no mesmo barramento a transmissão de dados e instruções, enquanto na arquitetura *Harvard* existem barramentos separados e dedicados para dados e instruções (figura 11).

Figura 11 – Arquiteturas de computadores *Harvard* e *von Neumann*.

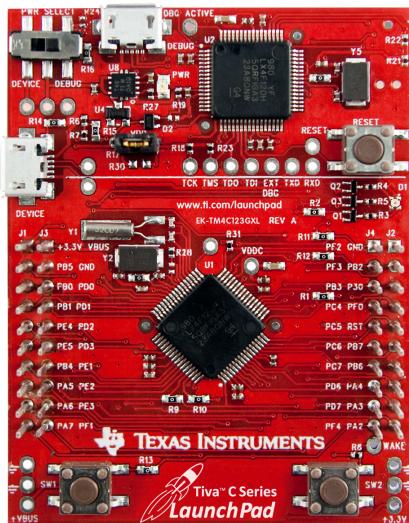


Fonte: Próprio autor.

Microcontroladores possuem os mesmos componentes de um computador de uso geral encapsulados dentro de um único *microchip*. São exemplos de microcontroladores: PIC18F4520 da empresa *Microchip*, ATMega 328P da empresa *Atmel*, MSP430 e TM4C123GH6PM ambos da empresa *Texas Instruments*. O projeto para o sistema embarcado apresentado neste trabalho se baseia no microcontrolador TM4C123GH6PM, também chamado de TM4C123.

O TM4C123 (figura 12) é baseado na arquitetura *Harvard* onde as instruções (*opcode*) são acessadas na memória ROM pelo processador através do barramento *ICode*, as constantes são acessadas na memória ROM através do barramento *DCode* e a troca de dados com a memória RAM e os dispositivos de E/S é realizada através do barramento de sistema (*System Bus*).

Figura 12 – Tiva C Series TM4C123G LaunchPad.



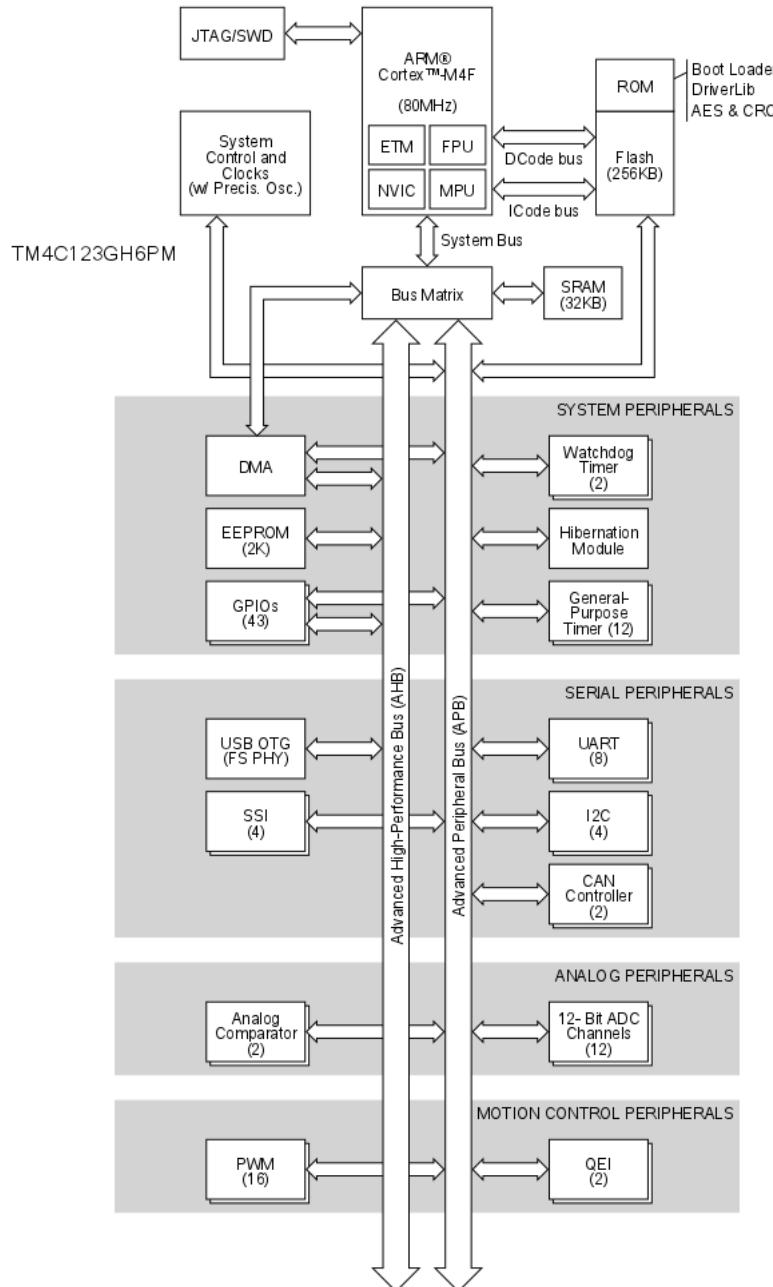
Fonte: *ARM Cortex LaunchPad Evaluation Kit* [22].

O TM4C123 possui um processador de 32 bits, 256 KiB de memória *Flash* ROM, 32 KiB de memória RAM e 43 portas de E/S. Possui ainda interfaces paralelas, seriais, analógicas, digitais e de tempo que estão disponíveis através de diversos periféricos como:

- a) Temporizadores para interrupções periódicas;
  - b) Conversores analógicos-digitais (*Analog to Digital Converter, ADC*);
  - c) *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART*;
  - d) *Synchronous Serial Interface, SSI*;
  - e) *Inter-Integrated Circuit, I<sup>2</sup>C*;
  - f) Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*);
  - g) *Universal Serial Bus, USB*;

A figura 13 apresenta o diagrama de blocos do microcontrolador TM4C123GH6PM.

Figura 13 – Diagrama de blocos do microcontrolador TM4C123GH6PM.



Fonte: *Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller Data Sheet [23]*.

### 3.3 A FAMÍLIA ARM CORTEX

O processador utilizado no microcontrolador TM4C123 é o Cortex-M4 desenvolvido pela empresa ARM. A família Cortex possui três ramificações sendo o Cortex-A dedicado a aplicações interagindo com grandes quantidades de memória a uma velocidade relativamente alta como por exemplo celulares e *tablets*. O Cortex-R é dedicado para aplicações em tempo

real determinísticas, onde confiabilidade e disponibilidade são essenciais. Já os processadores Cortex-M são dedicados aos microcontroladores e possuem menor velocidade, quantidade de memória e consumo de energia, sendo muito empregados em sistemas embarcados [24][25].

### 3.4 RASPBERRY PI

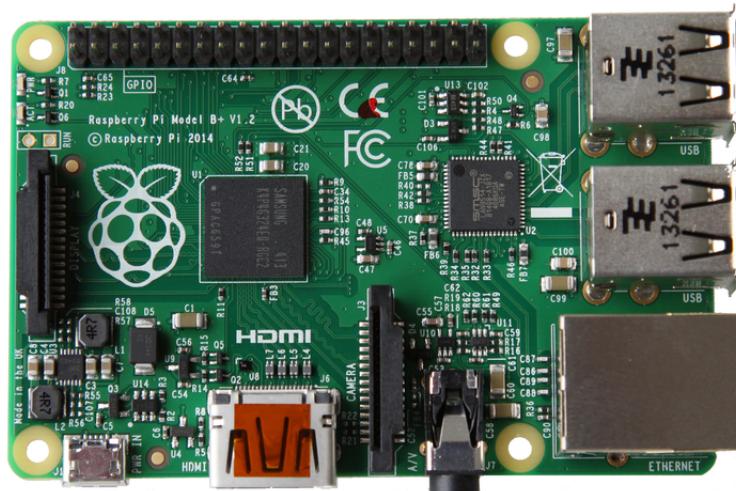
O Raspberry Pi (figura 14) é um computador do tipo SBC (*Single Board Computer*) desenvolvido pela Fundação Raspberry Pi no Reino Unido com o objetivo inicial voltado para aplicação na área educacional.

Seu tamanho reduzido de cerca de 8x6 cm, baixo custo, em torno de US\$ 25 e grande versatilidade fizeram com que se popularizasse sendo então adotado em diversas áreas como no desenvolvimento de sistemas embarcados.

O Raspberry Pi é baseado no SoC (*System on a Chip*) desenvolvido pela empresa Broadcom e vem embarcado com processador ARM além de diversos periféricos como processador gráfico, interfaces GPIO (*General Purpose Input Output*), Ethernet, USB, UART, I<sup>2</sup>C e SPI (*Serial Peripheral Interface*), além de saídas de áudio e vídeo [26].

Os modelos dos processadores, quantidade de memória, portas USB e consumo elétrico variam entre as diversas versões disponíveis, entretanto, todos podem facilmente receber sistemas operacionais completos como o Linux, executando inclusive aplicações baseadas em interfaces gráficas.

Figura 14 – Raspberry Pi.



Fonte: *RPi Hardware History* [27].



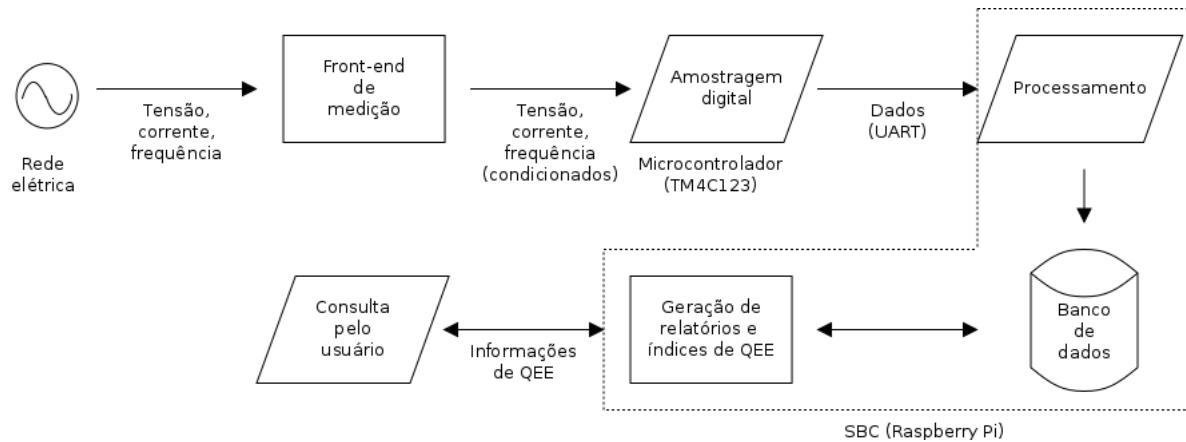
## 4 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

Com o objetivo de monitorar os diversos parâmetros que impactam na QEE em uma instalação elétrica residencial, construiu-se o sistema embarcado que será detalhado a seguir com seus respectivos componentes e tecnologias empregadas.

### 4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Para atender os objetivos específicos apresentados, o sistema para monitoramento e caracterização da QEE foi dividido em três estágios de acordo com suas funcionalidades: condicionamento e medição de sinais, aquisição de dados e conversão analógico-digital e processamento e visualização de informações. O diagrama da figura 15 apresenta a arquitetura geral com fluxo de dados ao longo do sistema.

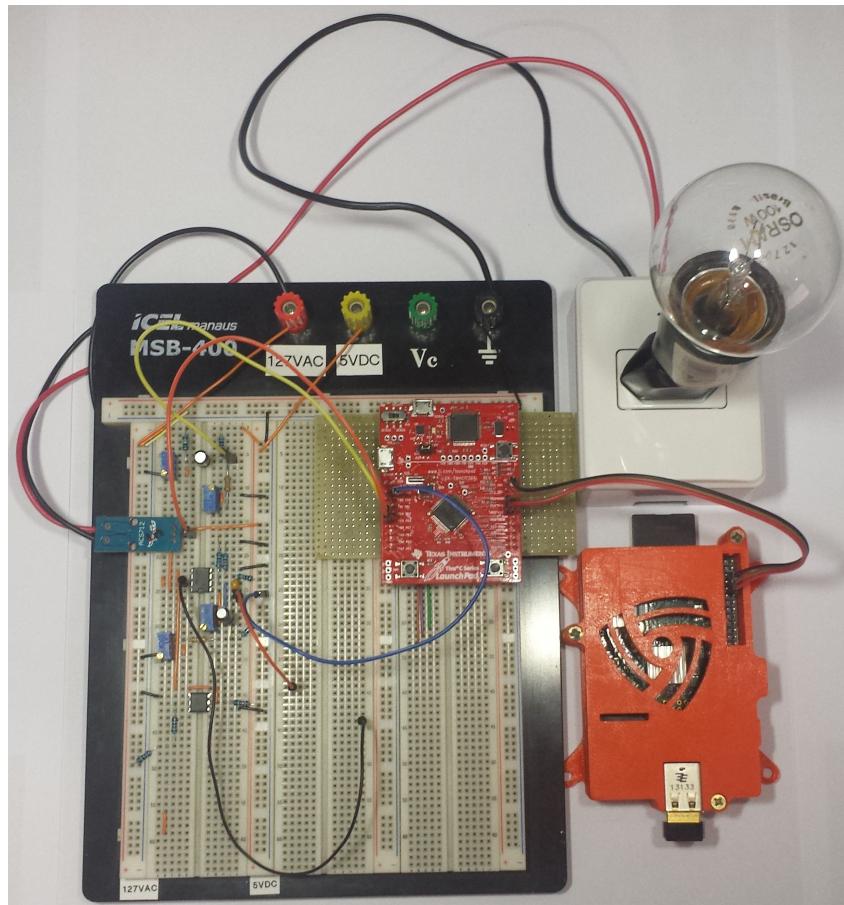
Figura 15 – Arquitetura geral do sistema.



Fonte: Próprio autor.

A figura 16 apresenta o protótipo que foi construído para o projeto do sistema.

Figura 16 – Protótipo do sistema.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA MEDIÇÃO

A caracterização da QEE se inicia com a medição das principais grandezas presentes em um circuito elétrico, são elas: tensão (representada pela unidade volt no SI), corrente (representada pela unidade ampère no SI) e frequência (representada pela unidade hertz no SI).

A medição dessas grandezas é o primeiro estágio do sistema, chamado de *front-end*, e é responsável não somente pela correta medição como também pelo condicionamento destes sinais para que possam ser lidos nos estágios seguintes. Esse condicionamento compreende a adequação desses sinais quanto às suas amplitudes conforme será apresentado. Apesar de haver acoplamento direto entre o circuito de medição e a rede elétrica, um transformador isolador foi empregado como estágio de desacoplamento, fornecendo maior segurança e proteção nas medições.

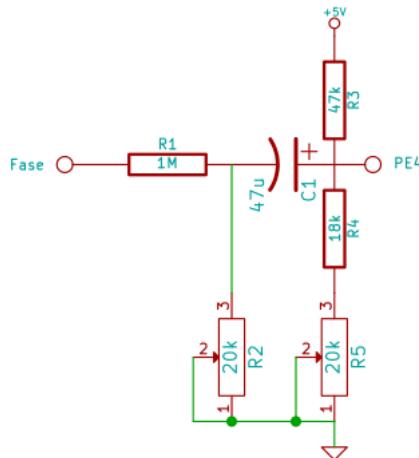
#### 4.2.1 *Front-end* para Medição de Tensão

O sistema foi concebido e projetado para o monitoramento de uma instalação elétrica residencial monofásica cuja tensão nominal de atendimento é de  $127V_{RMS}$  entre os condutores fase e neutro e frequência de 60 Hz, representados pelo grupo B e subgrupo B1 no PRODIST.

O sinal de saída na conexão do *front-end* de medição com o segundo estágio, de aquisição, deve estar dentro de uma faixa compatível com o mesmo, permitindo o correto funcionamento para o processo de amostragem da tensão que será realizado pelo conversor analógico-digital.

O diagrama esquemático da figura 17 apresenta o circuito de condicionamento para medição do sinal da tensão na instalação elétrica, o objetivo desde circuito é medir o valor instantâneo da tensão na linha que varia nominalmente entre 179,6 V e -179,6 V, sendo seu valor eficaz de  $127V_{RMS}$ .

Figura 17 – *Front-end* para medição de tensão.



Fontes: *Application Note AVR 465* [28], *REA10291 Portable Power Quality Meter* [29].

A tensão na linha é inicialmente reduzida através do divisor de tensão R1 e R2, passando em seguida pelo capacitor de acoplamento C1 que também é responsável por filtrar qualquer sinal CC proveniente da fonte  $5V_{CC}$ . Esta fonte tem o papel de polarizar positivamente o sinal de entrada para que sejam lidos somente valores positivos pelo conversor A/D durante a amostragem. O divisor de tensão composto por R3, R4 e R5 é responsável por adequar o sinal à faixa de operação do conversor A/D, sendo R2 e R5 resistores variáveis para um melhor ajuste na calibração do sistema.

A faixa de tensão de operação do conversor A/D varia entre  $0V_{CC}$  e  $3,3V_{CC}$ , dessa forma, o sistema foi calibrado com o auxílio de um transformador variável, *variac*, para que o valor máximo da faixa do conversor A/D ( $3,3V_{CC}$ ) corresponda a  $212V_{CA}$ , que representa

18% a mais da tensão nominal de  $180V_{CA}$ , permitindo ao conversor A/D trabalhar com alguma folga evitando sua saturação.

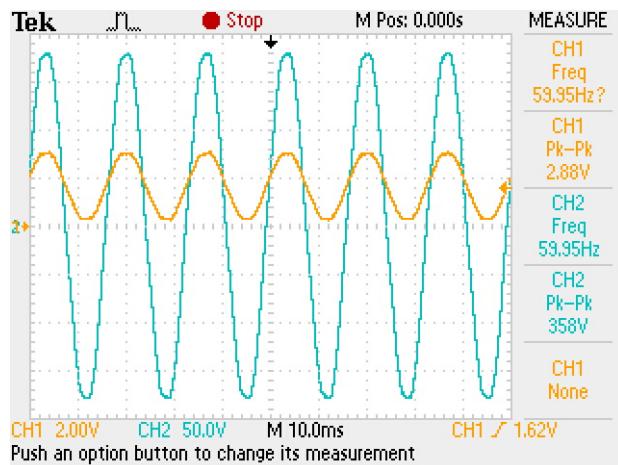
Após a polarização pela fonte CC (figura 18), teremos a relação apresentada na tabela 10 entre tensão instantânea, faixa de tensão e valor de saída no conversor A/D, levando em consideração 12 bits de precisão.

Tabela 10 – Relação de medição do circuito *front-end* de tensão.

Valor da tensão instantânea	Tensão na saída do circuito	Valor de saída do conversor A/D
$212,13V_{CA}$	$3,3V_{CC}$	4095
$0V_{CA}$	$1,65V_{CC}$	2047
$-212,13V_{CA}$	$0V_{CC}$	0

Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Sinal de tensão condicionado para o processo de amostragem.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma a resolução do circuito de medição, que representa a variação mínima no valor da tensão que altera o valor na saída do conversor A/D, será dada pela equação 20.

$$\Delta V = \frac{212,13V_{pp}}{4096} = 0,1V \quad (20)$$

#### 4.2.2 *Front-end* para Medição de Corrente

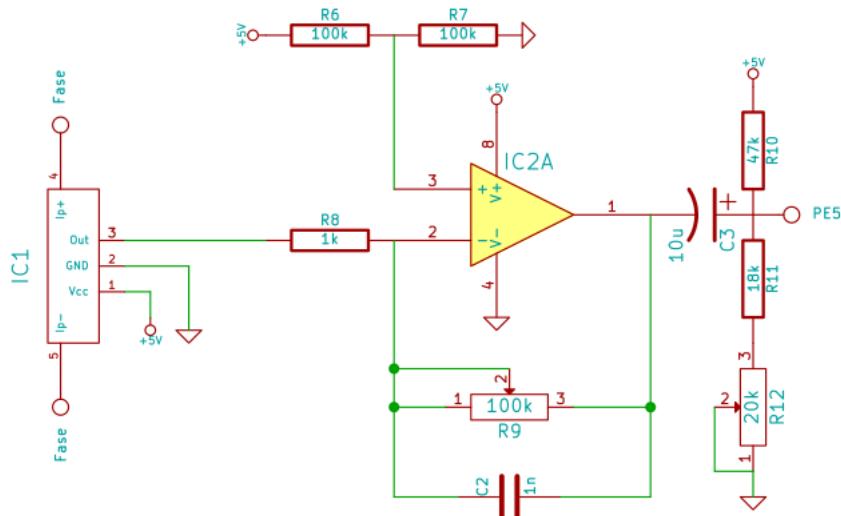
A corrente que flui através do circuito para uma carga conectada no sistema é medida utilizando o sensor de efeito Hall ACS712, IC1. Este sensor é do tipo invasivo pois há necessidade de interromper o circuito entre a fonte e a carga para a medição da corrente. O sensor utilizado mede correntes entre -5 A e 5 A com uma resolução de 0,185 mV/A de acordo com a folha de dados do fabricante [30]. Para aumentar a resolução do

circuito de medição, a saída do sensor é enviada para um estágio de amplificação, IC2A, que permite o ajuste do ganho através do resistor R9 (figura 20). O ganho no amplificador operacional com realimentação negativa é dado através da relação apresentada na equação 21.

$$A = 1 + \frac{R9}{R8} \quad (21)$$

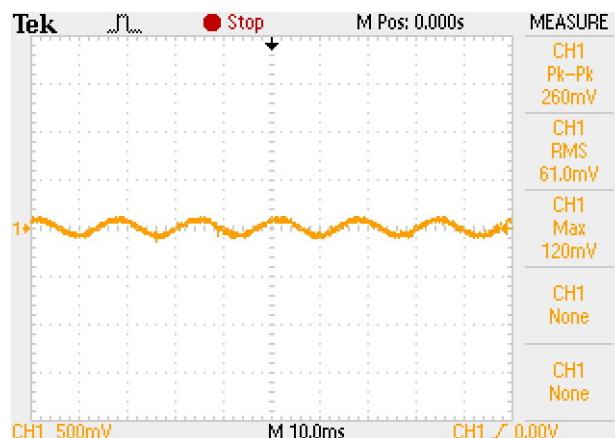
Após a amplificação do sinal, o capacitor de acoplamento C3 filtra sinais CC e sua saída é polarizada através da fonte 5V<sub>CC</sub>, sendo ajustado para a faixa de operação adequada ao conversor A/D através do resistor variável R12 (figura 19).

Figura 19 – *Front-end* para medição de corrente.



Fonte: *REA10291 Portable Power Quality Meter* [29].

Figura 20 – Sinal de corrente condicionado para o processo de amostragem.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.3 *Front-end* para Medição de Frequência

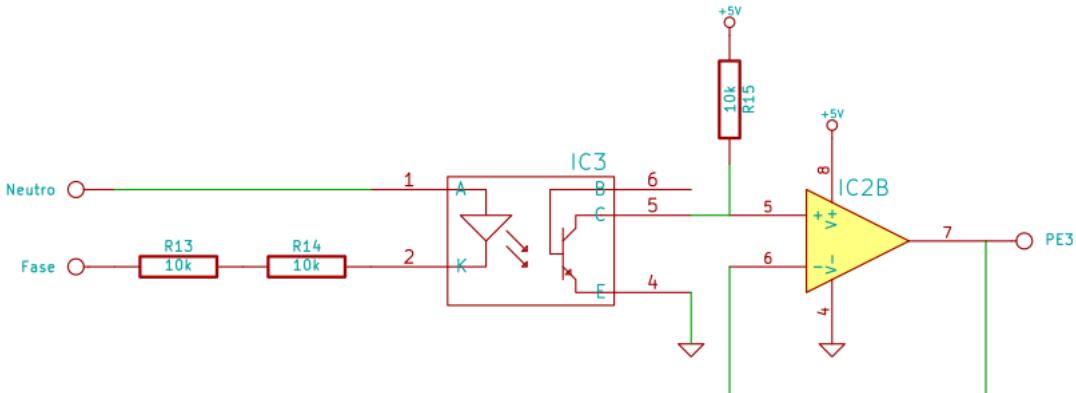
A medição da frequência na rede é realizada através da detecção da passagem do sinal senoidal da tensão por zero.

O sinal da tensão na rede tem sua amplitude reduzida através dos resistores R13 e R14 antes de ser conectado ao acoplador óptico, IC3. Este acoplador é composto por um foto-diodo emissor e um foto-transistor receptor (figura 21).

No semi-ciclo positivo da tensão senoidal, o diodo estará diretamente polarizado e portanto conduzindo o sinal para o foto-transistor, já durante o semi-ciclo negativo, o foto-diodo estará inversamente polarizado, não conduzindo o sinal.

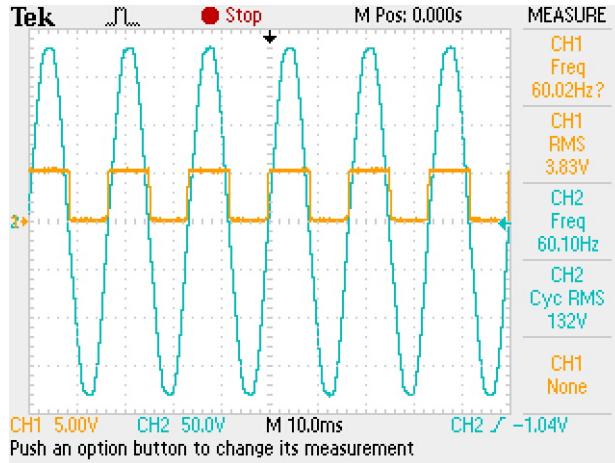
O resultado na saída do acoplador óptico será uma onda quadrada na qual suas bordas de subida e descida correspondem a passagem do sinal senoidal da tensão pelo zero (figura 22). Essa saída é então conectada a um amplificador operacional, IC2B, configurado como um seguidor de tensão (*buffer*) antes de ser enviado para o sistema de aquisição.

Figura 21 – *Front-end* para medição de frequência.



Fonte: *REA10291 Portable Power Quality Meter* [29].

Figura 22 – Sinal de saída da detecção da passagem por zero.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.3 SISTEMA EMBARCADO PARA AQUISIÇÃO E CONVERSÃO DE SINAIS

A instrumentação e metodologia de medição para QEE é estabelecida pelo PRODIST na seção 8.1, capítulo 2.6. Define-se que os equipamentos de medição devem operar segundo o princípio da amostragem digital com taxa amostral mínima de 16 amostras por ciclo, conversor analógico-digital de sinal de tensão de 12 bits e precisão de até 1% da leitura. Esses equipamentos devem permitir a apuração dos valores calculados dos indicadores individuais de QEE, tabela de medição e histograma de tensão [9].

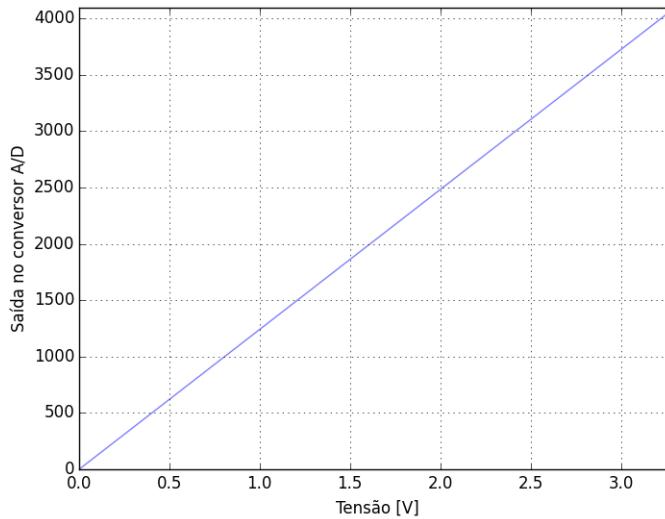
O microcontrolador TM4C123 apresentado anteriormente possui um processador de 32 bits e dois módulos conversores A/D com 12 canais cada, 12 bits de resolução com uma taxa máxima de amostragem de 1 MHz, atendendo portanto os requisitos estabelecidos.

O processo de amostragem consiste na leitura do valor do sinal analógico de tensão na saída do circuito *front-end* de medição e posterior conversão para o seu equivalente digital. Essa conversão é realizada com base na resolução do conversor A/D, que está diretamente relacionada com a faixa de tensão de referência do conversor A/D bem como com sua precisão. Um conversor A/D de 12 bits poderá medir  $2^{12} = 4096$  valores distintos. Utilizando como tensão de referência uma faixa de 0 V à 3,3 V, sua resolução será dada pela equação 22.

$$\Delta V = \frac{3,3 - 0}{4096} = 8,056640625 \times 10^{-4} \approx 0,81mV \quad (22)$$

Essa relação entre a faixa de tensão do conversor A/D e sua precisão é linear e ressalta a importância da tensão de referência do conversor A/D, conforme apresentado na figura 23.

Figura 23 – Relação de tensão do conversor A/D.



Fonte: Próprio autor.

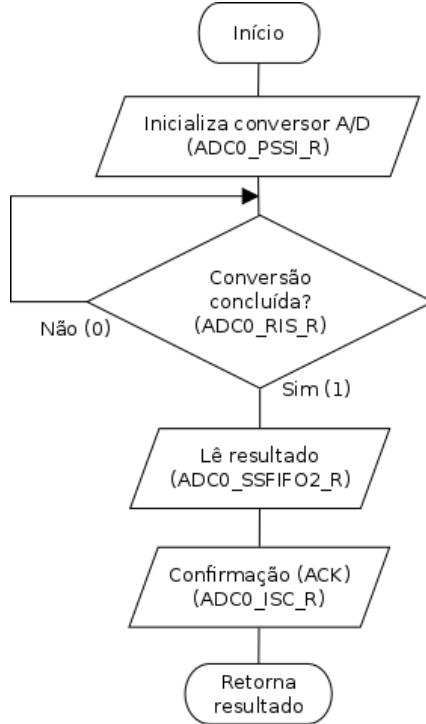
A função responsável pelo processo de amostragem e conversão A/D do sistema embarcado para aquisição de dados, chamado DAS (*Data Acquisition System*), é apresentada através do diagrama de fluxo de dados a seguir. Esta função foi implementada utilizando um algoritmo *busy-wait* apresentado na figura 24, que aguarda pelo resultado a conversão antes de prosseguir.

Essa função é executada pelo sistema a cada 1 ms, assim, a frequência de amostragem do sistema será de 1000 Hz, conforme a equação 23.

$$0,001 = \frac{1}{f_s} \rightarrow f_s = 1000 \text{ Hz} \quad (23)$$

Essa frequência de amostragem não somente atende aos requisitos do PRODIST quanto à taxa de amostragem como também ao Teorema da Amostragem, que estabelece uma frequência de amostragem de pelo menos duas vezes a maior frequência do sinal amostrado para que não ocorra o *aliasing*. Neste caso, o sinal amostrado possui 60 Hz, logo  $2f = 120$  Hz.

Figura 24 – Diagrama de fluxo de dados da conversão A/D.



Fonte: Próprio autor.

A amostragem e conversão A/D fornece ao sistema embarcado de aquisição de dados o valor digital correspondente aos sinais instantâneos de tensão, corrente e frequência medidos pelos circuitos de *front-end* apresentados. Com esses valores o sistema procede com o cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente, potências aparente, ativa, reativa e fator de potência, estes relativos à carga conectada ao sistema.

O cálculo dos valores médios quadráticos para tensão e corrente com base nos valores instantâneos amostrados é feito conforme a equação 24.

$$V_{RMS}, I_{RMS} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (24)$$

Onde  $n$  é o número total de amostras e  $x$  o valor instantâneo amostrado para tensão e corrente. O valor eficaz ou RMS representa o valor do sinal alternado equivalente ao valor do sinal contínuo no efeito de aquecimento de um resistor.

A potência ativa é calculada através da média dos valores das potências instantâneas amostradas conforme a equação 25.

$$P = V \times I \quad (25)$$

A potência aparente será o produto da tensão eficaz pela corrente eficaz conforme a equação 26.

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS} \quad (26)$$

A potência reativa será calculada através da relação estabelecida pelo triângulo de potências (figura 5), representada na equação 27.

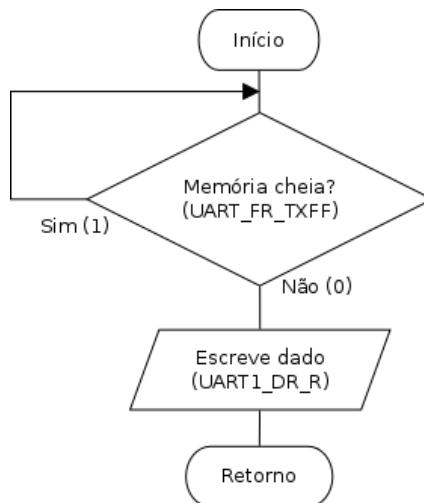
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (27)$$

Assim como o fator de potência, apresentado na equação 28.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (28)$$

Após o cálculo do conjunto total de amostras definidos, o sistema inicia a transmissão de dados para o próximo estágio, de processamento, através de uma conexão serial assíncrona (UART). A transmissão de dados serial também é implementada através de um algoritmo *busy-wait*, que verifica o estado da FIFO de transmissão antes de escrever o dado no registrador. Antes de ser enviado, este dado será convertido do tipo *int* para o seu equivalente *char* com sua representação na tabela ASCII. O diagrama na figura 25 apresenta o fluxo de dados para a transmissão serial.

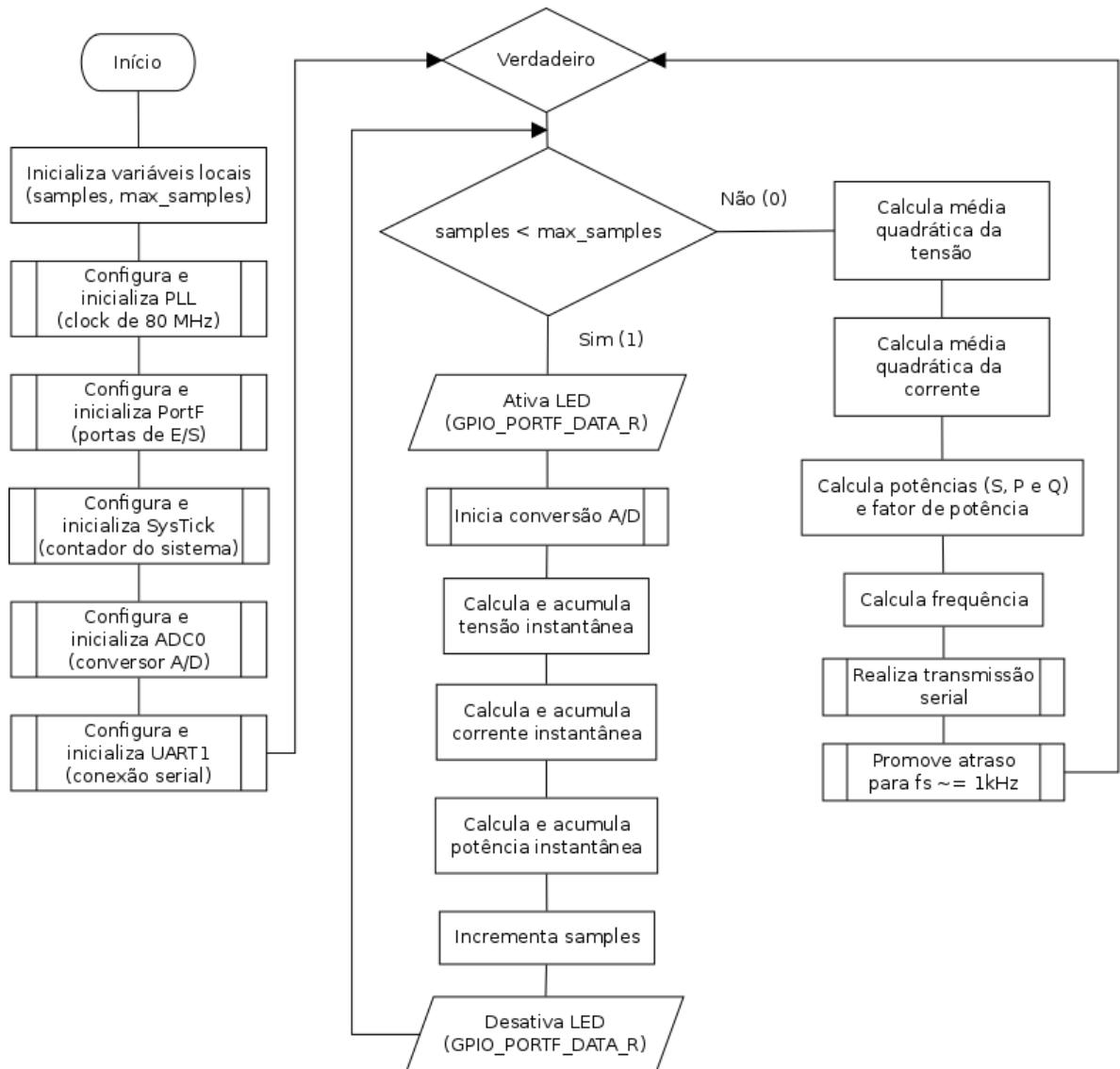
Figura 25 – Diagrama de fluxo de dados da transmissão serial.



Fonte: Próprio autor.

O diagrama de fluxo de dados de todo processo executado pelo sistema embarcado microcontrolado responsável pela aquisição, conversão A/D e transmissão serial pode ser visto na figura 26.

Figura 26 – Diagrama de fluxo de dados para o software de aquisição, conversão A/D e transmissão serial.



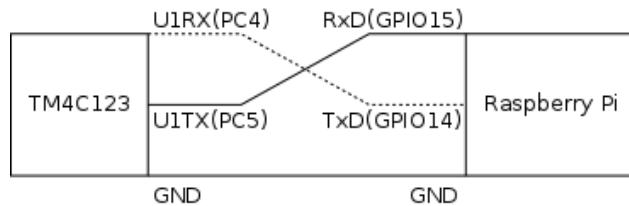
Fonte: Próprio autor.

#### 4.4 SISTEMA EMBARCADO PARA PROCESSAMENTO DE DADOS E APRESENTAÇÃO

Uma vez amostrados e transmitidos, os valores para tensão e corrente eficaz, potências, fator de potência e frequência são armazenados em banco de dados e então processados para a geração de relatórios e índices sobre a qualidade de energia na instalação elétrica.

Esse processamento, armazenamento e apresentação para o usuário demandam maior capacidade computacional e por este motivo optou-se por utilizar o SBC Raspberry Pi modelo B com um processador ARM de 700 MHz e 512 MiB de memória RAM. Utilizou-se uma versão customizada da distribuição Linux Raspbian juntamente com a linguagem de programação Python para implementar a comunicação serial (figura 27) para recebimento dos dados amostrados no estágio anterior, processamento e armazenagem em banco de dados, além de permitir acesso pelos usuários através de uma interface Web.

Figura 27 – Comunicação serial (UART) entre o TM4C123 e Raspberry Pi.

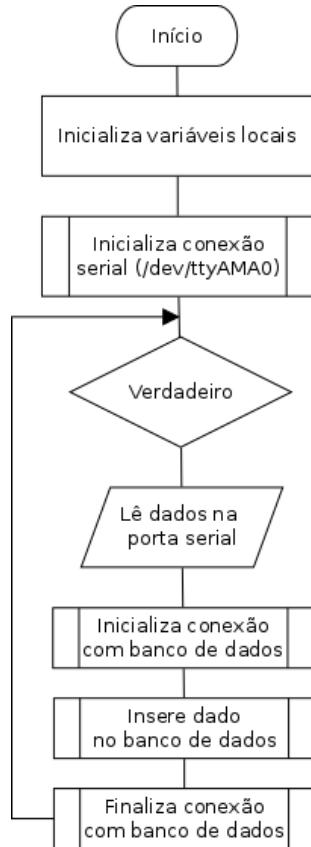


Fonte: Próprio autor.

O software *das.py* (figura 28) escrito em Python roda constantemente em segundo plano no sistema operacional recebendo dados na porta serial e gravando no sistema de banco de dados SQLite. Essa tarefa é realizada com auxílio dos módulos *uart.py* e *database.py* que gerenciam as conexões seriais e com banco de dados utilizando as bibliotecas Python PySerial [31] e suporte nativo da linguagem SQLite [32].

Essa arquitetura foi implementada com objetivo de desacoplar as diversas camadas de software definindo os escopos das responsabilidades de cada parte do software, chamadas de módulos.

Figura 28 – Diagrama de fluxo de dados para o software das.py para leitura de dados na porta serial e gravação no banco de dados.



Fonte: Próprio autor.

Os diagramas de classe a seguir (figura 29) descrevem na linguagem UML a estrutura estática dos módulos que dão suporte no gerenciamento e operações das conexões seriais e de banco de dados.

Figura 29 – Diagrama de classes UML dos módulos *database.py* e *uart.py*.

<b>database.py</b>	<b>uart.py</b>
<pre>+connect() +disconnect(connection:SQLite.connection) +create_samples(connection:SQLite.connection,                samples:Tuple) +read_samples_by_id(connection:SQLite.connection) +read_voltages_by_date(connection:SQLite.connection,                        date:Date) +read_voltages_last_hour(connection:SQLite.connection) +read_voltage_1minute_interval(connection:SQLite.connection,                                  datetime:Timestamp) -unit_test()</pre>	<pre>+connect(port:String=/dev/ttyAMA0,baudrate:String=19200,          timeout:Integer=1) +disconnect(connection:serial.Serial) -unit_test()</pre>

Fonte: Próprio autor.

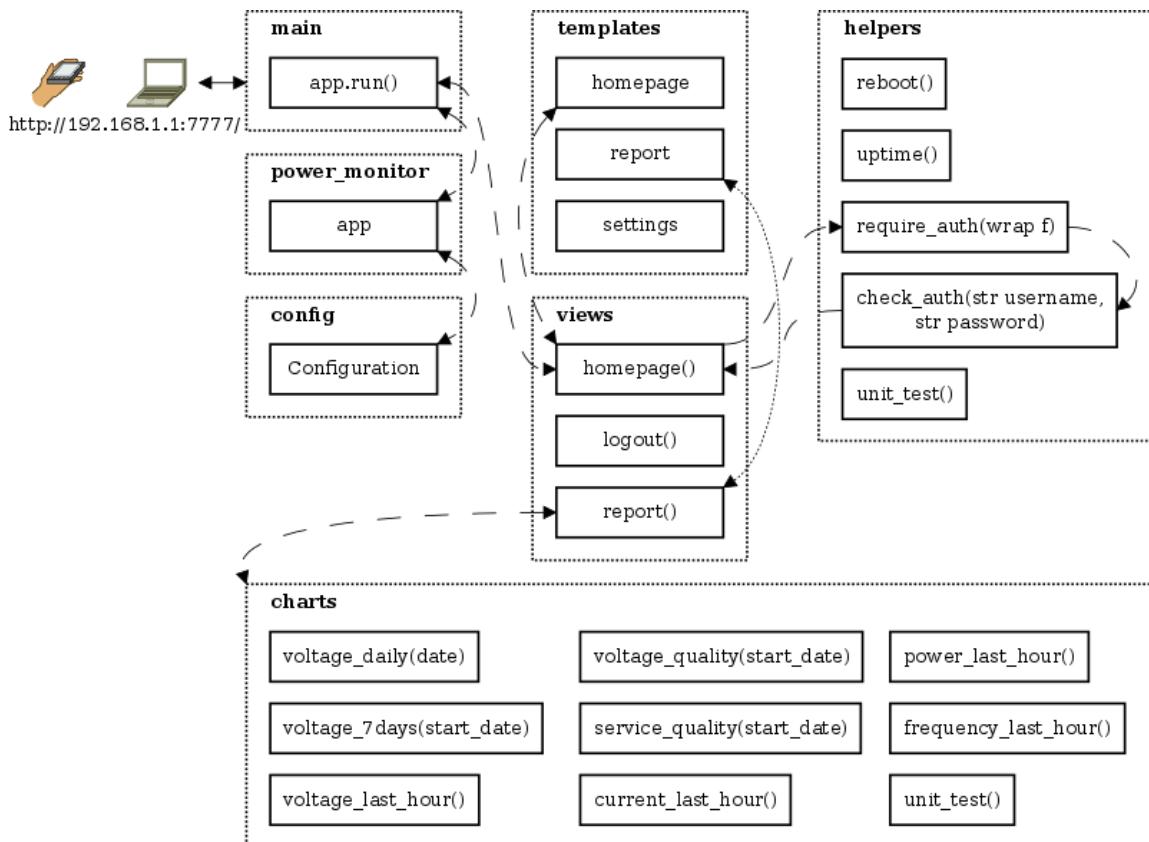
Com o uso de bibliotecas Python para processamento matemático, estatístico e de geração de gráficos [33] [34], foi desenvolvida a parte do software responsável por processar os dados, agora salvos no banco de dados, transformando-os em informações que traduzem os índices de QEE conforme descrito pelo PRODIST.

Essas informações são disponibilizadas para o usuário através de um sistema Web. Esse sistema provê uma interface para que o usuário realize consultas de forma amigável, visualizando gráficos de informações em tempo real ou consultando histogramas que consolidam os dados das medições ao longo do tempo.

Utilizou-se o *framework* Web Flask [35] para dar suporte as principais funcionalidades necessárias em uma aplicação Web: interface entre servidor e aplicação Web (WSGI), tratamento de requisições utilizando o servidor uWSGI [36], suporte para conexão com banco de dados, autenticação, *cookies* e uso de *templates* [37].

A figura 30 apresenta a arquitetura geral do sistema Web, responsável por fornecer ao usuário as informações de QEE. Esse sistema pode ser acessado através de um computador, celular ou *tablet* uma vez que o Raspberry Pi esteja conectado na mesma rede local através de uma conexão com ou sem fios.

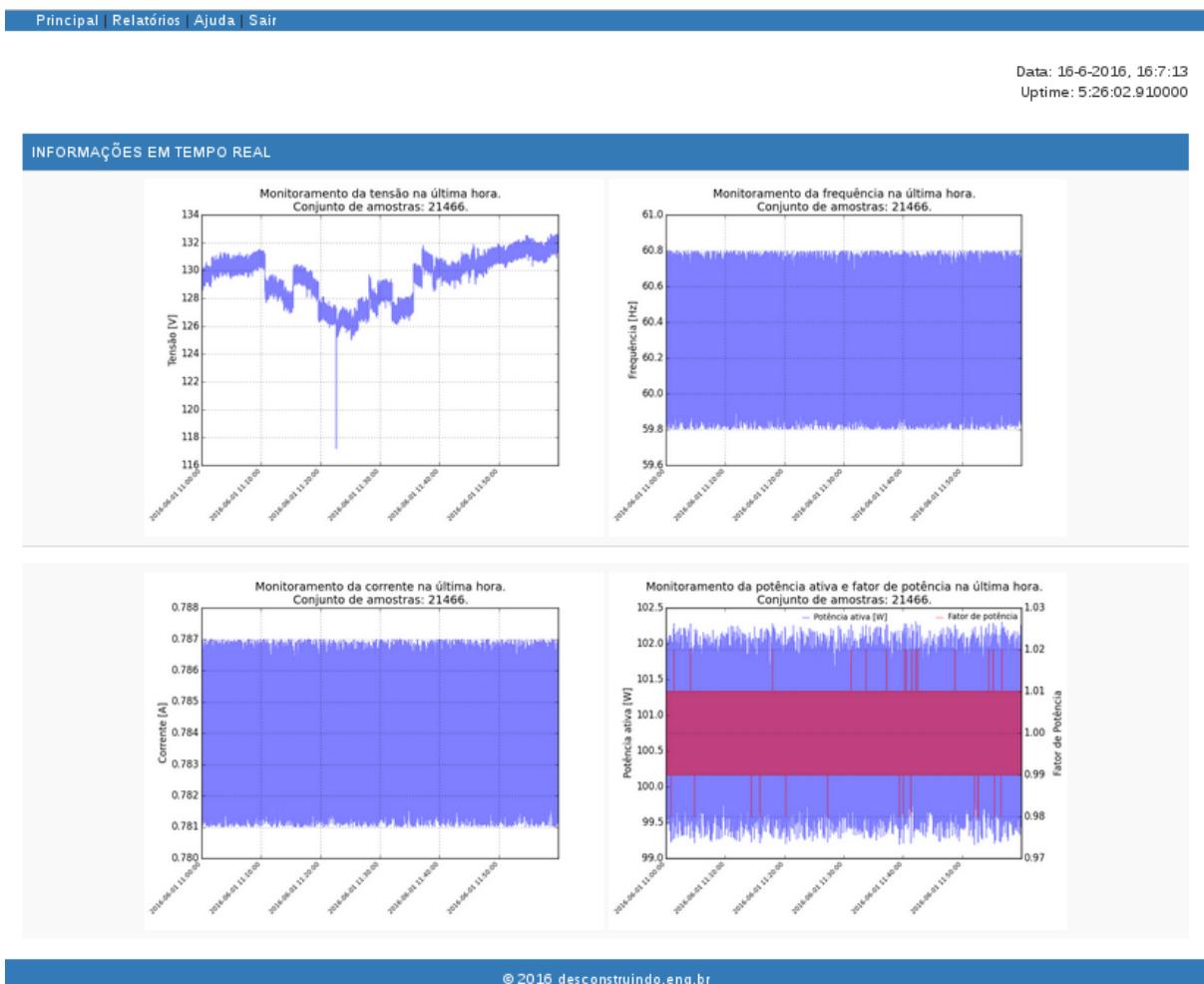
Figura 30 – Arquitetura geral do sistema Web.



Fonte: Próprio autor.

Ao acessar o sistema o usuário é apresentado a um pedido de autenticação. A página principal (figura 31) exibe informações em tempo real para a última hora medida através de gráficos de tensão e frequência na rede, além da corrente, potência e fator de potência caso exista carga conectada no *front-end* de medição. São exibidas ainda informações básicas do estado do sistema (data e hora e tempo de execução) e pequenos textos informativos de ajuda ao usuário.

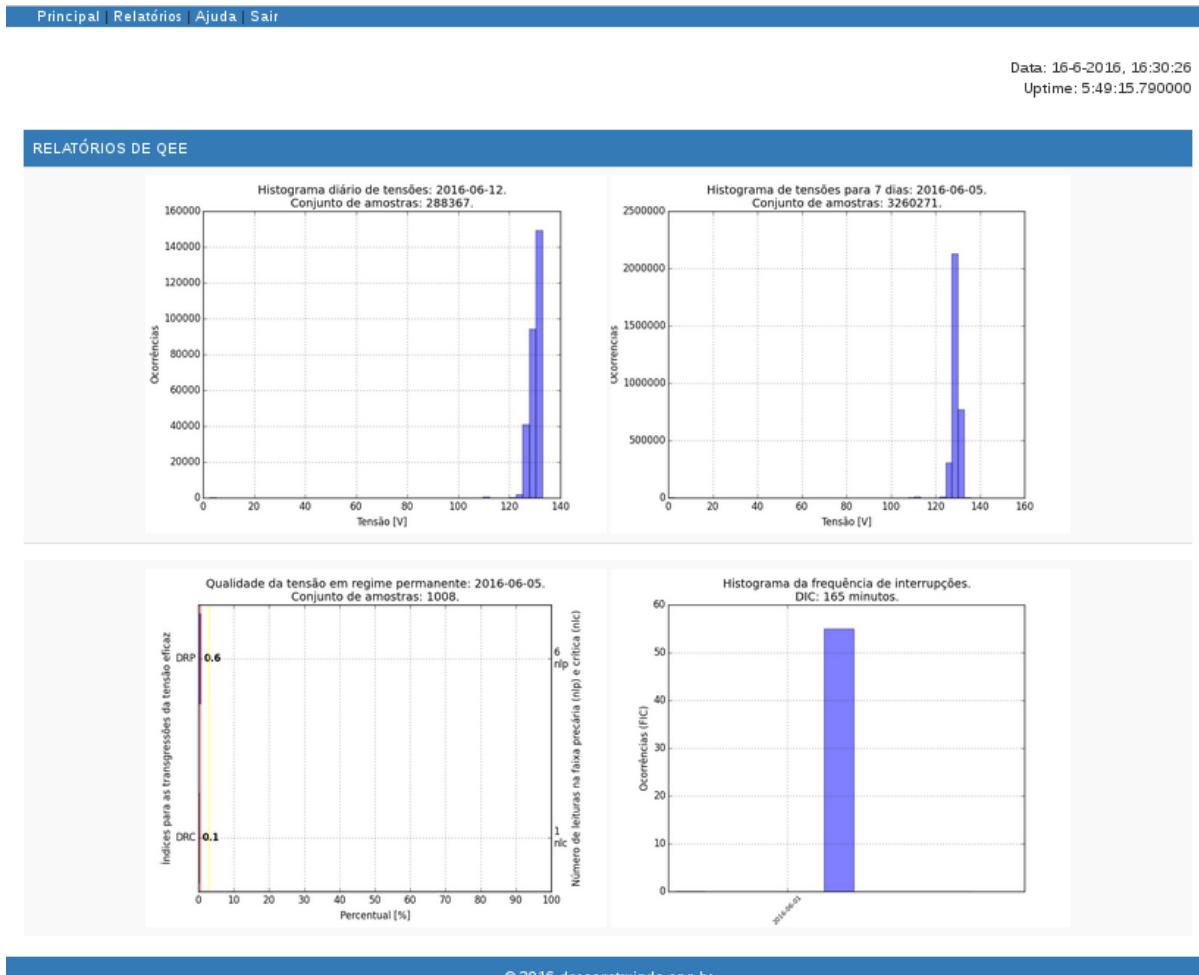
Figura 31 – Página principal do sistema de monitoramento de QEE.



Fonte: Próprio autor.

A página de relatórios (figura 32) permite ao usuário consultar e visualizar as informações de QEE referentes a qualidade do produto através do histograma de tensões, assim como a qualidade do serviço a partir dos indicadores individuais de QEE e histograma de interrupções.

Figura 32 – Página de relatórios do sistema de monitoramento de QEE.



Fonte: Próprio autor.

## 5 RESULTADOS

Dentre os diversos fenômenos de QEE caracterizados pelo PRODIST, o sistema desenvolvido neste trabalho objetiva analisar aqueles relacionados com o fornecimento de tensão em regime permanente que determinam a qualidade do produto, além do monitoramento em tempo real da tensão, corrente, potências e fator de potência para uma carga conectada, permitindo ao usuário acompanhar o desempenho de sua instalação elétrica. Já através da qualidade do serviço é possível apurar os indicadores de continuidade, que permitem ao usuário uma análise do serviço prestado pela distribuidora.

### 5.1 QUALIDADE DO PRODUTO

A análise da qualidade do produto no âmbito do PRODIST foi realizada utilizando como ferramentas o histograma de tensões e os gráficos para a visualização dos índices para as transgressões dos níveis de tensão precário e crítico.

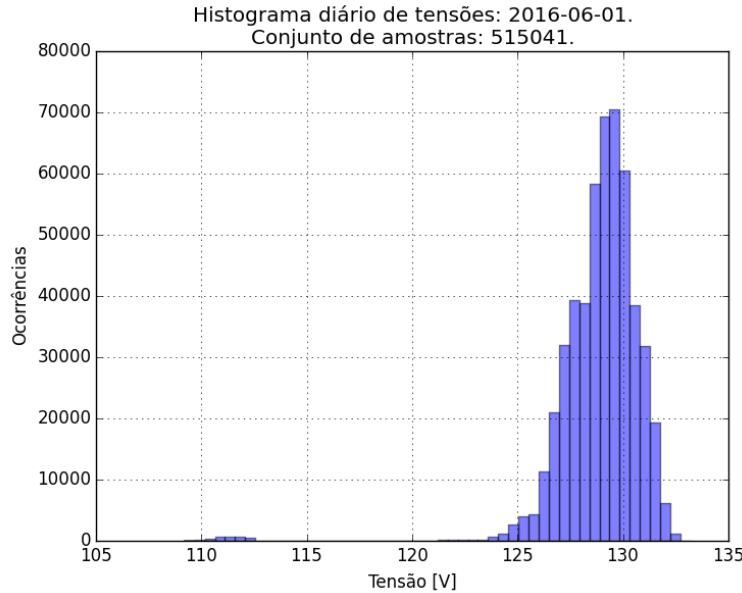
#### 5.1.1 Histograma de Tensões

O histograma de tensões é uma importante ferramenta pois através da análise da distribuição dos valores da tensão eficaz é possível não somente identificar não conformidades no valor da tensão fornecida pela distribuidora mas também eventuais problemas na instalação elétrica, como por exemplo uma queda de tensão na fase maior que a admissível de acordo com a norma ABNT NBR 5410 para instalações elétricas de baixa tensão [11].

A operação de cargas como chuveiro elétrico, forno micro-ondas e aparelho de ar condicionado em uma instalação elétrica mal dimensionada ou antiga poderá apresentar quedas de tensão acima do limite de 4% estabelecido pela norma ABNT NBR 5410 para o ponto mais afastado do quadro de distribuição. Essa não conformidade contribui ainda para a redução da vida útil dos demais equipamentos na instalação elétrica por ao operar com uma tensão muito baixa e em instalações antigas representa risco à segurança, uma vez que aqueles condutores estarão submetidos a um regime de trabalho que poderá causar sobreaquecimento.

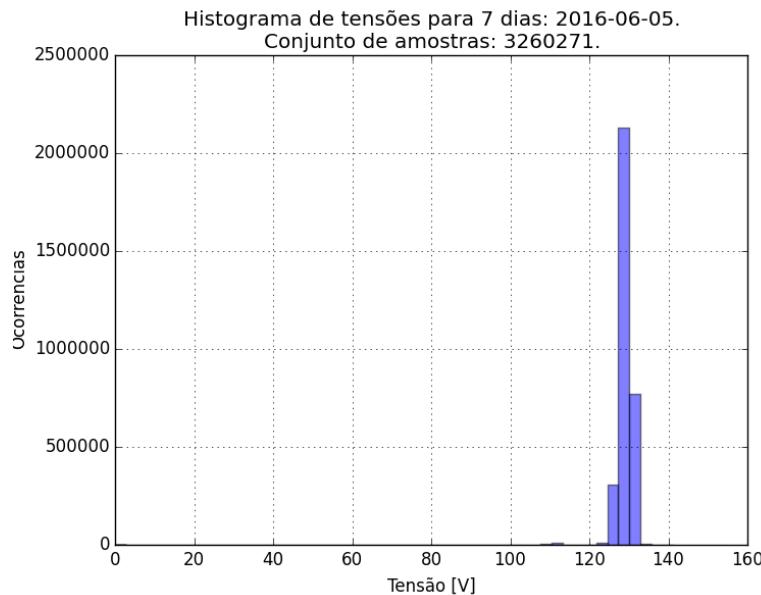
As figuras 33 e 34 apresentam os histogramas de tensões gerados pelo sistema para os períodos de 1 dia (24 horas) e 7 dias (168 horas), respectivamente.

Figura 33 – Histograma de tensões para 24 horas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Histograma de tensões para 168 horas.



Fonte: Próprio autor.

Para o histograma de 24 horas (figura 34) é possível observar que a maior distribuição dos valores da tensão eficaz se encontra na faixa entre 127 V e 129 V, dentro da faixa adequada para o fornecimento de tensão em regime permanente de acordo com o PRODIST. Algumas medições se encontram próximas a faixa do limite superior da tensão precária de 133 V.

Observa-se que para o limite inferior, um pequeno número de amostras se encontram na região entre 110 V e 113 V, o que de acordo com o PRODIST será analisado como transgressão do limite precário. Entretanto, observou-se que esses valores são consequência da utilização de um chuveiro elétrico de 7500 W de potência na residência monitorada. Essa queda de tensão caracteriza um problema de QEE e uma violação da norma ABNT NBR 5410, causada pela instalação elétrica antiga que utiliza condutores rígidos de  $6mm^2$  para fase e neutro vindos do ponto de conexão da distribuidora, onde se encontra o equipamento de medição, até o quadro de distribuição na residência.

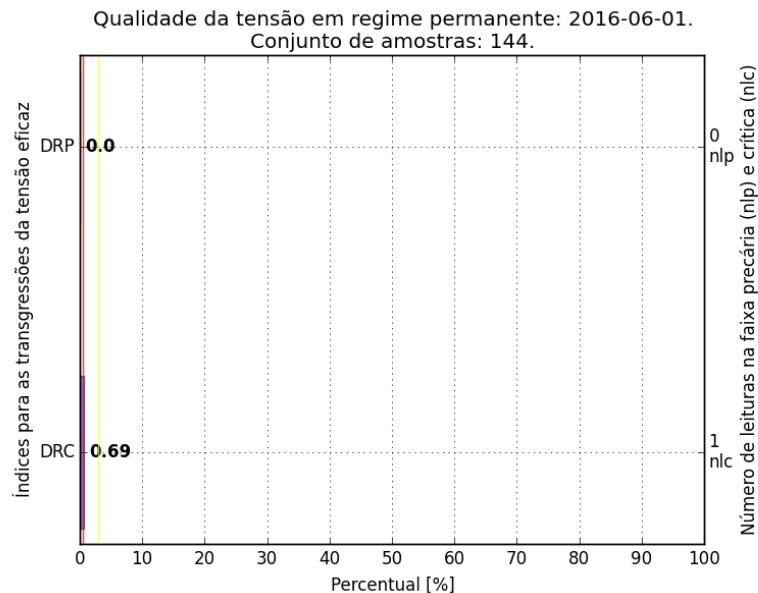
A precisão das leituras realizadas foi verificada através da comparação com os valores medidos utilizando o analisador de energia *Kill A Watt* modelo P4400 [38] e um osciloscópio de 60 MHz. A comparação se mostrou dentro do limite de 1% determinado pelo PRODIST, apresentando diferenças menores que 0,01 entre os valores medidos com o sistema embarcado, o aparelho analisador e o osciloscópio.

### 5.1.2 Indicadores Individuais de QEE

Os indicadores individuais de QEE para tensão em regime permanente são obtidos a partir da base de dados das medições armazenadas pelo sistema. O PRODIST determina que o cálculo dos índices precário e crítico para as transgressões no valor da tensão eficaz é realizado com base no conjunto de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, ou seja, 1 leitura a cada 10 minutos até completar 1008 leituras, um período total de 10.008 minutos ou 168 horas de medição. Caso ocorram variações temporárias ( $3s < t \leq 60s$ ) no valor da tensão ( $1,1pu \leq V < 0,1pu$ ) ou interrupções de longa duração ( $t > 180s$ ), este conjunto de leituras deve ser descartado e substituído por um novo.

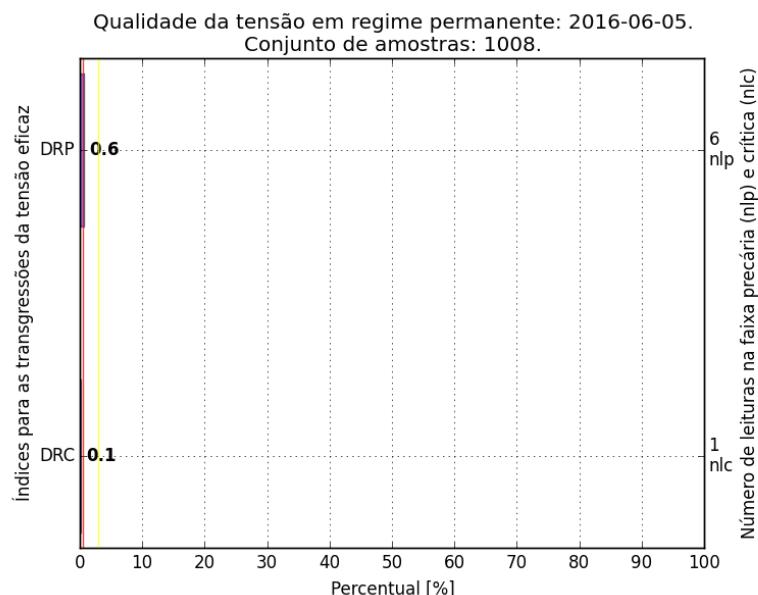
Com base no método estabelecido para o cálculo dos indicadores individuais DRP (duração relativa da transgressão para a tensão precária) e DRC (duração relativa da transgressão para tensão crítica), o sistema apresenta ao usuário o gráfico com os índices para qualidade de tensão em regime permanente para o conjunto de 1008 leituras válidas (correspondentes a 168 horas ou 7 dias de medição) e também 144 leituras válidas (correspondentes a 24 horas de medições), conforme pode ser visto nas figuras 35 e 36.

Figura 35 – Índices para as transgressões da tensão eficaz em 24 horas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Índices para as transgressões da tensão eficaz em 168 horas.



Fonte: Próprio autor.

Apesar do PRODIST não prever a geração dos indicadores individuais para o período de 24 horas (figura 35), esse nível de detalhamento diário permite ao usuário um melhor acompanhamento para o monitoramento. Os gráficos para os indicadores individuais também sinalizam para o usuário quando estes índices ultrapassam os limites

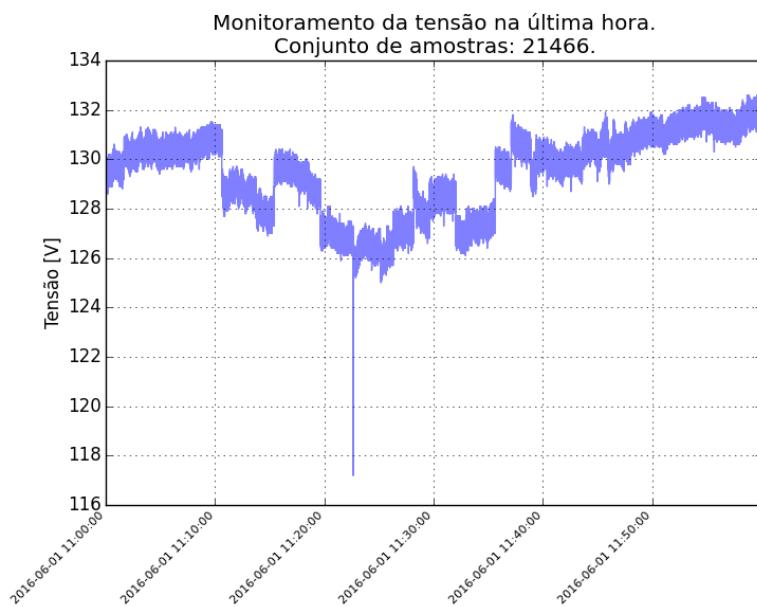
estabelecidos pelo PRODIST, que são de 3% para o DRP e 0,5% para o DRC, e obrigam a distribuidora a compensar o consumidor.

### 5.1.3 Monitoramento em Tempo Real

Os gráficos de monitoramento em tempo real tem por objetivo fornecer ao usuário uma visão mais detalhada da instalação elétrica, uma vez que o histograma de tensões e os indicadores individuais fornecem informações consolidadas ao longo de um intervalo de tempo maior.

Através do gráfico na figura 37 é possível monitorar e visualizar fenômenos de QEE como flutuações de tensão que causam cintilações luminosas (*flicker*) e variações de tensão de curta duração que causam afundamentos (*sag*) ou elevações (*swell*). A partir da detecção desses fenômenos através do monitoramento em tempo real o usuário poderá acompanhar seu reflexo no histograma de tensões.

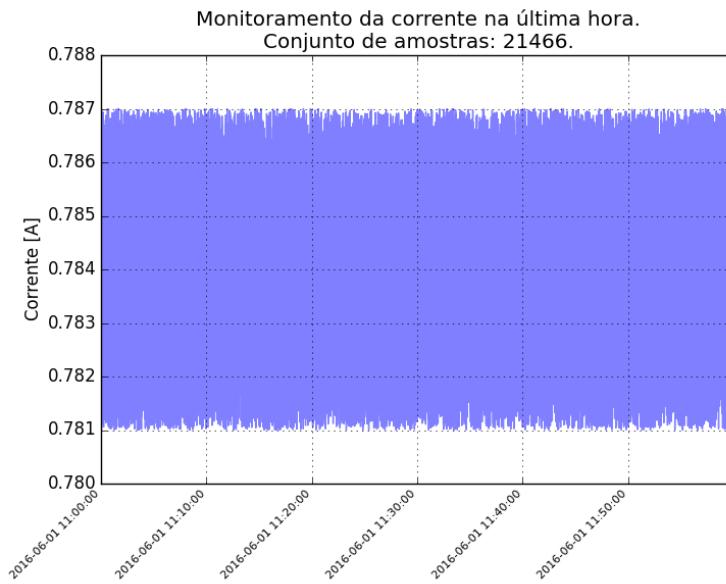
Figura 37 – Monitoramento em tempo real da tensão.



Fonte: Próprio autor.

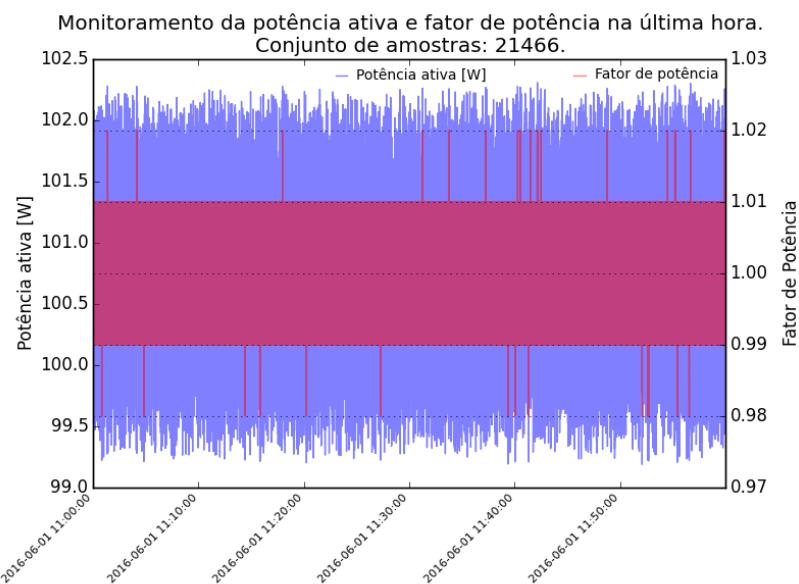
Da mesma forma o sistema permite ao usuário acompanhar em tempo real os valores da corrente (figura 38), potência e fator de potência (figura 39) caso exista uma carga conectada. Esse monitoramento tem por objetivo demonstrar o comportamento da instalação elétrica para os diferentes tipos de carga.

Figura 38 – Monitoramento em tempo real da corrente.



Fonte: Próprio autor.

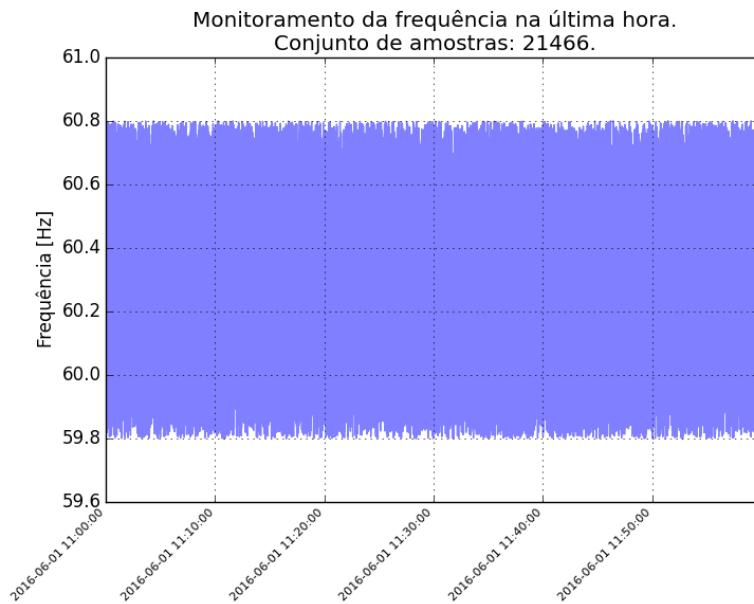
Figura 39 – Monitoramento em tempo real da potência e fator de potência.



Fonte: Próprio autor.

O limite de operação para a frequência fundamental é definido pelo PRODIST entre 59,5 Hz e 60,1 Hz. O gráfico em tempo real da variação de frequência (figura 40) oferece ao usuário uma visualização intuitiva para o acompanhamento dessas variações, apesar de raros os eventos com variações significativas.

Figura 40 – Monitoramento em tempo real da frequência.



Fonte: Próprio autor.

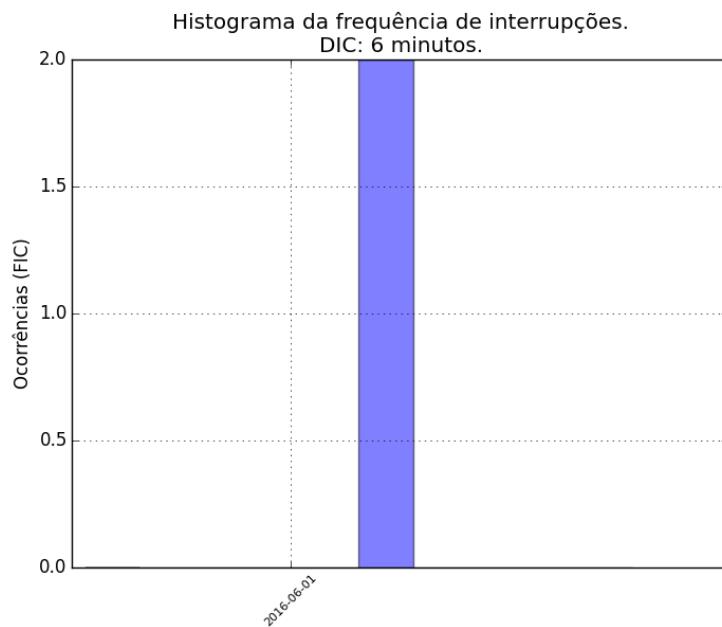
A precisão do monitoramento em tempo real também foi verificada através da comparação com o analisador de energia *Kill A Watt*, apresentando diferenças menores que 0,01 para cada grandeza.

## 5.2 QUALIDADE DO SERVIÇO

Através da apuração dos indicadores de continuidade o usuário pode verificar a qualidade do serviço prestado pela distribuidora. A frequência das interrupções no fornecimento é caracterizada pelo PRODIST como um aspecto da QEE, sendo considerada como interrupção uma queda no valor nominal da tensão eficaz maior que 30% por um período maior que 3 segundos. O somatório da duração de todas as interrupções ocorridas na unidade consumidora também é analisado.

A figura 41 apresenta os indicadores FIC e DIC para o período de 168 horas.

Figura 41 – Indicadores de continuidade para a qualidade do serviço.



Fonte: Próprio autor.

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema proposto atingiu os objetivos específicos com a caracterização da QEE na instalação elétrica monitorada para posterior consolidação na forma de indicadores da qualidade do produto e do serviço prestado pela distribuidora, de acordo com os parâmetros do PRODIST. Foi possível observar os diversos fenômenos que impactam no desempenho de uma instalação elétrica, principalmente àqueles relacionados ao comportamento da tensão em regime permanente.

Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é um conceito que relaciona a condição e o comportamento do sinal de entrada (tensão e corrente) na interação com as cargas presentes na instalação elétrica. Essa interação se reflete no consumo de energia elétrica e também no desempenho e vida útil dos equipamentos e instalações.

Observou-se além de fenômenos como flutuações no valor da tensão eficaz, que são responsáveis pelas cintilações luminosas (*flicker*) que causam desconforto visual ao ser humano, quedas na ordem de 0,8 pu que representam cerca de 14% do valor nominal e estão além dos 4% admissíveis estipulados pela norma ABNT NBR 5410 para instalações elétricas de baixa tensão, consequência de uma instalação antiga e mal dimensionada para as cargas atualmente instaladas, causando não somente diminuição na vida útil dos equipamentos elétricos mas representando também risco para a segurança das pessoas.

Os indicadores individuais para tensão em regime permanente se mantiveram dentro dos valores estabelecidos pelo PRODIST e apresentaram 0,6% para a transgressão precária (DRP), cujo limite é de 3%, e 0,1% para a transgressão crítica (DRC), onde o limite é de 0,5%.

Foi possível também caracterizar a qualidade do serviço prestado pela concessionária distribuidora, através da apuração dos indicadores de continuidade que relaciona a frequência das interrupções no fornecimento de energia elétrica como um fenômeno de QEE. Para o período de medição de 168 horas foram registrados 2 eventos de interrupção (FIC) que totalizaram 6 minutos de duração (DIC).

A instrumentação eletrônica e o sistema de aquisição e monitoramento desenvolvidos permitem a análise de outros fenômenos de QEE descritos no PRODIST como por exemplo a análise do nível de distorções harmônicas, entretanto, estas análises estavam fora do escopo deste trabalho e podem ser desenvolvidas como uma continuação do mesmo.

Outra análise que pode ser desenvolvida no futuro é, com base nos dados coletados e armazenados em banco de dados, realizar um trabalho de caracterização do consumo na residência utilizando ferramentas como redes neurais artificiais.



## REFERÊNCIAS

- 1 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015*: Ano base 2014. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/>>. Acesso em: 09 fev. 2016. Citado na página 25.
- 2 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração - BIG*: Fontes de energia. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 27.
- 3 REIS, L. B. dos. *Geração de Energia Elétrica*. 2. ed. São Paulo: Manole, 2011. Citado na página 28.
- 4 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração - BIG*: Os 10 agentes de maior capacidade instalada no país (usinas em operação). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/agentegeracao/GraficoDezMaioresPotencia.asp>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 28.
- 5 BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Conheça o Sistema*. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 28.
- 6 BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Procedimentos de Rede*: Módulo 1: O operador nacional do sistema elétrico e os procedimentos de rede. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/>>. Acesso em: 28 fev. 2016. Citado na página 29.
- 7 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Distribuição de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=77>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 29.
- 8 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*: Módulo 1 - introdução. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 45.
- 9 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*: Módulo 8 - qualidade de energia elétrica. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado 11 vezes nas páginas 30, 32, 33, 34, 35, 38, 41, 42, 45, 50 e 63.
- 10 LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. *Harmônicos em Sistemas Elétricos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410*: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 73.

- 12 GRANDI, A. L.; SIQUEIRA, M. J. *Modelo de Relatório de Qualidade da Energia Elétrica Atendendo aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST)*. 2012. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/revista-eletronica/book/42-outubro2012/3-2012.html>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 34.
- 13 NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J. *Instalações Elétricas*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- 14 DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 37, 39, 40, 42, 43 e 44.
- 15 PAULILLO, G. *Desequilíbrios de Tensão*. 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1018-marco-de-2013.html>>. Acesso em: 14 mar. 2016. Citado na página 39.
- 16 PAULILLO, G. *Conceitos Gerais Sobre Qualidade de Energia*. 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/993-janeiro-de-2013.html>>. Acesso em: 14 mar. 2016. Citado na página 39.
- 17 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61000-4-15: Electromagnetic compatibility part 4: Testing and measurement techniques - flickermeter functional and design specifications*. [S.l.], 2003. Citado na página 40.
- 18 PAULILLO, G. *Flutuações de Tensão*. 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1063-julho-de-2013.html>>. Acesso em: 14 mar. 2016. Citado na página 41.
- 19 PAULILLO, G. *Variações de Tensão de Curta Duração Parte II*. 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1050-junho2013.html>>. Acesso em: 14 mar. 2016. Citado na página 42.
- 20 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Tarifas Consumidores*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores>>. Acesso em: 20 fev. 2016. Citado na página 47.
- 21 VALVANO, J. W. *Embedded Systems: Real-Time Operating Systems for ARM Cortex-M Microcontrollers Volume 3*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 51.
- 22 TEXAS INSTRUMENTS. *ARM Cortex LaunchPad Evaluation Kit*. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxl>>. Acesso em: 02 abr. 2016. Citado na página 53.
- 23 TEXAS INSTRUMENTS. *Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller Data Sheet*. [S.l.], 2013. Citado na página 54.
- 24 LANGBRIDGE, J. A. *Professional Embedded ARM Development*. Indianapolis: John & Wiley & Sons, 2014. Citado na página 55.
- 25 ARM. *Processors*. Disponível em: <<http://www.arm.com/products/processors>>. Acesso em: 02 abr. 2016. Citado na página 55.
- 26 GAY, W. *Mastering the Raspberry Pi*. New York: Apress, 2014. Citado na página 55.

- 27 ELINUX. *RPi Hardware History*. Disponível em: <[http://elinux.org/RPi\\_HardwareHistory](http://elinux.org/RPi_HardwareHistory)>. Acesso em: 21 abr. 2016. Citado na página 55.
- 28 ATMEL. *Application Note AVR 465: Single-Phase Power/Energy Meter with Tamper Detection*. [S.l.], 2013. Citado na página 59.
- 29 BARBOSA, A. S. *REA10291 Portable Power Quality Meter*. 2012. Citado 3 vezes nas páginas 59, 61 e 62.
- 30 ALLEGRO MICROSYSTEMS. *ACS712 Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC*. [S.l.], 2013. Citado na página 60.
- 31 PYSERIAL. *PySerial Documentation*. Disponível em: <<https://pythonhosted.org/pyserial>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 68.
- 32 PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *DB-API 2.0 Interface for SQLite Databases*. Disponível em: <<https://docs.python.org/2/library/sqlite3.html>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 68.
- 33 NUMPY. Disponível em: <<http://www.numpy.org>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 70.
- 34 MATPLOTLIB. Disponível em: <<http://matplotlib.org>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 70.
- 35 FLASK. Disponível em: <<http://flask.pocoo.org>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 70.
- 36 UWsgi. Disponível em: <<https://uwsgi-docs.readthedocs.io>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 70.
- 37 WEB Applications. Disponível em: <<http://docs.python-guide.org/en/latest/scenarios/web>>. Acesso em: 05 mai. 2016. Citado na página 70.
- 38 KILL A Watt Meter. Disponível em: <<http://www.p3international.com/products/p4400.html>>. Acesso em: 01 jun. 2016. Citado na página 75.