

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO MARCHESE

MEDIDOR DE ENERGIA BASEADO NA NORMA IEEE 1459-2010

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2013

RICARDO MARCHESE

**MEDIDOR DE ENERGIA BASEADO NA NORMA
IEEE 1459-2010**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica–COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Cardoso

PATO BRANCO

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Medidor de energia baseado na norma IEEE 1459-2010**”, foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata de defesa nº **021** de **2013**.

Fizeram parte da banca os Professores

RAFAEL CARDOSO (ORIENTADOR)
FABIO LUIZ BERTOTTI
KLEITON DE MORAES SOUSA

DEDICATÓRIA

Ricardo Marchese

À família:

Nédio Antônio Marchese (Pai)

Maria Aparecida Marchese (Mãe)

Liziane Marchese (Irmã)

Bruna Romanini Basso (Namorada)

AGRADECIMENTOS

Os parágrafos que compõem esta página jamais poderiam conter todas as pessoas que me apoiaram e me ajudaram durante este percurso de cinco anos para cumprir mais um objetivo de minha vida. Portanto, peço desculpas àquelas que não forem citadas nos mesmos.

Aos meus pais, Nédio Antonio Marchese e Maria Aparecida Marchese, que foram a base de tudo pra mim, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança, amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.

À minha irmã Liziane Marchese, que além de minha irmã, é minha grande amiga, para todas as horas.

À minha namorada Bruna Romanini Basso, por sempre me apoiar e estar ao meu lado nos momentos e decisões importantes da minha vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Rafael Cardoso, pela dedicação e ajuda em todos os momentos nos quais necessitei.

Ao meu amigo Newton Carlos Will, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho, estando sempre presente quando precisei.

Aos meus colegas de curso Everton Fornari Marin e Leandro Deon pela convivência, amizade e companheirismo. Desejo a eles muito sucesso.

Aos meus amigos da turma da Segunda-Feira, em especial Luis Gustavo Fumagalli, por tornarem este trabalho possível, me aconselhando e auxiliando durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos meus amigos, por sempre estarem presente e me apoiando quando precisei. Esses sim são amigos de verdade.

E, por fim, mas não menos importante, agradeço muito a Deus, por me guiar sempre pelo caminho correto, me abençoando e me dando força nas horas mais difíceis da vida.

RESUMO

MARCHESE, Ricardo. **Medidor de energia baseado na norma IEEE 1459 - 2010**. 2013. 86 f. Trabalho para Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um medidor de energia baseado na norma IEEE 1459-2010 que é capaz de mensurar energia elétrica para sistemas senoidais, não-senoidais, monofásicos e trifásicos equilibrados e desequilibrados. O sistema utiliza um filtro de Kalman com objetivo de separar a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente. Tais sinais são necessários para a aplicação dos equacionamentos contidos na norma. O algoritmo base do medidor foi implantado em um *software* para PC e portado para um processador digital de sinais da *Texas Instruments* (TMS320F28335).

Palavras-chave: Instrumentação, Medição de energia elétrica, Norma IEEE 1459-2010, Harmônicas, Filtro de Kalman.

ABSTRACT

MARCHESE, Ricardo. **Power meter based on IEEE 1459-2010**. 2013. 86 f. Monograph (Undergraduation in Electrical Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

This work presents the development of a power meter based on the IEEE 1459-2010 standard. This meter can measure electrical energy in systems with sinusoidal and non-sinusoidal waveforms. It can be used for single-phase or three-phase balanced or unbalanced systems. The power meter uses a Kalman filter to decompose the fundamental components of the voltage and current signals. These signals are used in the algorithm that implements the standard. It was develop a PC software for the implementation of the power meter. In addition, the software was ported to run in a digital signal processor from Texas Instruments (TMS320F28335)

Key words: Instrumentation, Power meter, IEEE 1459-2010 standard, Harmonics, Kalman filter.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FTDI	<i>Future Technology Devices International Limited</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Denominação de norma da ABNT
PC	<i>Personal Computer</i>
TDH	Taxa de Distorção Harmônica
TI	<i>Texas Instruments</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{n_k}	Amplitude da n-ésima componente harmônica, no instante k.
θ	Ângulo de fase entre corrente e tensão.
I_e	Corrente eficaz.
I_1	Corrente fundamental rms.
I_H	Corrente harmônica rms.
i	Corrente instantânea.
i_1	Corrente instantânea fundamental.
i_H	Corrente instantânea harmônica.
I	Corrente rms.
I_a	Corrente rms na fase a.
I_b	Corrente rms na fase b.
I_c	Corrente rms na fase c.
$x_1, x_2, \dots, x_{2n-1}, x_{2n}$	Estados de um sistema dinâmico linear, no instante k.
$\hat{x}_{k-1 k}$	Estimativa predita do vetor de estados x_k , obtida no instante k-1.
$\hat{x}_{k+1 k}$	Estimativa predita do vetor de estados $x_{k+1 k}$, obtida no instante k.
θ_{i_k}	Fase da componente fundamental, no instante k.
β	Fase de corrente.
α	Fase de tensão.
FP	Fator de potência.
ω	Frequência angular.
ω_k	Frequência angular fundamental, no instante k.
δ_{ij}	Função Delta de Kronecker.
K_k	Ganho do filtro de Kalman, no instante k.
$P_{k k-1}$	Matriz de covariância do erro de estimação de x_k , obtida no instante k-1.
$P_{k k+1}$	Matriz de covariância do erro de estimação de x_{k+1} , obtida no instante k.
Q_i	Matriz de covariância do vetor de ruído de estado, no instante i.
R_i	Matriz de covariância do vetor de ruído de medida, no

	instante i .
Γ_k	Matriz de ganho do ruído de estado, no instante k .
M_n	Matriz de rotação da n -ésima componente harmônica.
Φ_k	Matriz de transição no instante k .
F_k	Matriz do modelo de medidas, no instante k .
$E\{\cdot\}$	Operador esperança.
T_s	Período de amostragem.
S	Potência aparente.
S_e	Potência aparente eficaz.
S_N	Potência aparente não fundamental.
P	Potência ativa.
P_1	Potência ativa fundamental.
P_H	Potência ativa harmônica.
D	Potência de distorção.
S_{U1}	Potência fundamental desbalanceada.
N	Potência não ativa.
Q	Potência reativa.
Q_1	Potência reativa fundamental.
$y_1, y_2, \dots, y_{2n-1}, y_{2n}$	Ruídos de estado, no instante k .
S_k	Sinal a ser medido, no instante k .
t	Tempo.
V_{ab}	Tensão de fase entre a e b .
V_{bc}	Tensão de fase entre b e c .
V_{ca}	Tensão de fase entre c e a .
V_e	Tensão eficaz.
V_{e1}	Tensão eficaz fundamental.
V_{eH}	Tensão eficaz harmônica.
V_{ab1}	Tensão fundamental de fase entre a e b .
V_{abH}	Tensão fundamental de fase entre a e b .
V_{bc1}	Tensão fundamental de fase entre b e c .
V_{bcH}	Tensão fundamental de fase entre b e c .
V_{ca1}	Tensão fundamental de fase entre c e a .
V_{caH}	Tensão fundamental de fase entre c e a .
V_1	Tensão fundamental rms.
V_H	Tensão harmônica rms.
v	Tensão instantânea.

v_1	Tensão instantânea fundamental.
v_H	Tensão instantânea harmônica.
V	Tensão rms.
V_a	Tensão rms na fase a.
V_b	Tensão rms na fase b.
V_c	Tensão rms na fase c.
THD	<i>Total harmonic distortion.</i>
t_k	Valor do tempo, no instante k.
x_k	Vetor de estados, no instante k.
x_{k+1}	Vetor de estados, no instante k+ 1.
y_k	Vetor de medidas, no instante k.
Υ_k	Vetor de ruídos de estado, no instante k.
v_k	Vetor de ruídos de medida, no instante k.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de sinais	33
Figura 2 - Diagrama de blocos para o sistema embarcado	33
Figura 3 - Sensor de efeito hall LA 55P - LEM	34
Figura 4 - Sensor de efeito hall LV 25-600 - LEM	34
Figura 5 - Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinal	35
Figura 6 - Mini Modulo FT2232H	35
Figura 7 - Kit de desenvolvimento eZdspTMF28335	36
Figura 8 - Qt Creator	38
Figura 9 - Circuito RLC monofásico	41
Figura 10 - Circuito RLC trifásico 3 fios	42
Figura 11 - Circuito RLC trifásico 4 fios	43
Figura 12 - Software - Carga RLC monofásica - 5 minutos	46
Figura 13 - Software - Carga RLC trifásica 3 fios - 5 minutos	47
Figura 14 - <i>Software</i> - Carga RLC trifásica 4 fios - 4 minutos	49
Figura 15 - Circuito monofásico - Carga R	51
Figura 16 - Circuito monofásico - Carga RL	52
Figura 17 - Circuito monofásico - Carga não linear	53
Figura 18 - Circuito trifásico 3 fios - Carga R	54
Figura 19 - Circuito trifásico 3 fios - Carga não linear	55
Figura 20 - Circuito trifásico 4 fios - Carga R	56
Figura 21 - Circuito trifásico 4 fios - Carga RLC	57
Figura 22 - Potências e Energias - Monofásico - Carga R - FLUKE	67
Figura 23 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga R - FLUKE	68
Figura 24 - THDi - Monofásico - Carga R - FLUKE	68
Figura 25 - THDv - Monofásico - Carga R - FLUKE	69
Figura 26 - Potências e Energias - Monofásico - Carga RL - FLUKE	71
Figura 27 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga RL - FLUKE	71
Figura 28 - Potências e Energias - Monofásico - Carga não linear - FLUKE	73
Figura 29 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga não linear - FLUKE	73
Figura 30 - THDi - Monofásico - Carga não linear - FLUKE	74
Figura 31 - Potências e Energias - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE	76
Figura 32 - Tensões e Correntes - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE	76

Figura 33 - THDv - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE	77
Figura 34 - Potências e Energias - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE.....	79
Figura 35 - Tensões e Correntes - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE	79
Figura 36 - THDi - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE	80
Figura 37 - Potências e Energias - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE.....	82
Figura 38 - Tensões e Correntes - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE	82
Figura 39 - THDv - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE	83
Figura 40 - Potências e Energias - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE	85
Figura 41 - Tensões e Correntes - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE.....	85
Figura 42 - THDi - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disposição dos conectores	36
Tabela 2 - Especificações de hardware do eZdspTMF28335	37
Tabela 3 - Resultados circuito monofásico.....	41
Tabela 4 - Resultados circuito trifásico 3 fios	42
Tabela 5 - Resultados circuito trifásico 4 fios	43
Tabela 6 - Resultados circuito monofásico.....	44
Tabela 7 - Resultados circuito monofásico.....	45
Tabela 8 - Resultados circuito monofásico.....	47
Tabela 9 - Resultados circuito monofásico.....	48
Tabela 10 - Resultados Monofásico - Carga R.....	51
Tabela 11 - Resultados Monofásico - Carga RL.....	52
Tabela 12 - Resultados Monofásico - Carga Não Linear.....	53
Tabela 13 - Resultados trifásico 3 fios - Carga R.....	54
Tabela 14 - Resultados trifásico 3 fios - Carga não linear.....	55
Tabela 15 - Resultados trifásico 4 fios - Carga R.....	56
Tabela 16 - Resultados trifásico 4 fios - Carga RLC	57
Tabela 17 - Resultados circuito monofásico.....	62
Tabela 18 - Resultados circuito trifásico a três fios	63
Tabela 19 - Resultados circuito trifásico a quatro fios	64
Tabela 20 - Resultados Monofásico - Carga R.....	66
Tabela 21 - Resultados Monofásico - Carga RL.....	69
Tabela 22 - Resultados Monofásico - Carga Não Linear.....	72
Tabela 23 - Resultados trifásico 3 fios - Carga R.....	74
Tabela 24 - Resultados trifásico 3 fios - Carga não linear.....	77
Tabela 25 - Resultados trifásico 4 fios - Carga R.....	80
Tabela 26 - Resultados trifásico 4 fios - Carga RLC	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	19
1.2 OBJETIVO GERAL	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 NORMA IEEE 1459 - 2010.....	21
2.1.1 Implementação das Equações para um Sistema Monofásico	21
2.1.1.1 Cálculo dos Valores RMS das Tensões e Correntes.....	21
2.1.1.2 Potências Ativas.....	22
2.1.1.3 Potência Reativa	23
2.1.1.4 Potências Aparentes	23
2.1.1.5 Potência Não Ativa	24
2.1.1.6 Fatores de Potência	24
2.1.1.7 Taxa de Distorção Harmônica	25
2.1.2 Implementação das Equações para um Sistema Trifásico.....	25
2.1.2.1 Potência Ativa	25
2.1.2.2 Potência Reativa	26
2.1.2.3 Potência Efetiva	27
2.1.2.4 Potência Não Ativa.....	28
2.1.2.5 Taxas de Distorção Harmônicas	28
2.1.2.6 Fatores de Potência	29
2.2 FILTRO DE KALMAN.....	29
3. IMPLEMENTAÇÃO DO MEDIDOR	32
3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	32
3.1.2 Sensores de Efeito <i>Hall</i>	33

3.1.3 Condicionamento de Sinal.....	34
3.1.4 Conexão USB.....	35
3.1.5 Kit de Desenvolvimento eZdspTMF28335.....	36
3.2 FRAMEWORK QT.....	37
3.3 ALGORITMO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	40
4.1.1 Circuito Monofásico.....	40
4.1.2 Circuito Trifásico a 3 Fios.....	42
4.1.3 Circuito Trifásico a 4 Fios.....	43
4.1.4 Resultados Obtidos com o <i>Software</i> no PC.....	44
4.1.5 Circuito Monofásico.....	44
4.1.6 Circuito Trifásico a 3 Fios.....	46
4.1.7 Circuito Trifásico a 4 Fios.....	48
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS BASEADOS NO SISTEMA EMBARCADO ..	49
4.2.1 Circuito Monofásico.....	51
4.2.1.1 Carga R.....	51
4.2.1.2 Carga RL.....	52
4.2.1.3 Carga Não Linear.....	53
4.2.2 Circuito Trifásico a 3 Fios.....	54
4.2.2.1 Carga R.....	54
4.2.2.2 Carga Não Linear.....	55
4.2.3 Circuito trifásico a 4 fios.....	56
4.2.3.1 Carga R.....	56
4.2.3.2 Carga RLC.....	57
5. CONCLUSÕES.....	59
APÊNDICE A - Resultados de Simulação.....	62

Resultados para o Sistema Monofásico	62
Resultados Sistema Trifásico a Três Fios	63
Resultados Sistema Trifásico a Quatro Fios	64
APÊNDICE B - Resultados Experimentais do Sistema Embarcado Desenvolvido ...	66
Resultados Sistema Monofásico com Carga R	66
Resultados Sistema Monofásico com Carga RL	69
Resultados Sistema Monofásico com Carga Não Linear	72
Resultados do Sistema Trifásico a Três Fios com Carga R	74
Resultados do Sistema Trifásico a Três Fios com Carga Não Linear	77
Resultados do Sistema Trifásico a Quatro Fios com Carga R	80
Resultados do Sistema Trifásico a Quatro Fios com Carga RLC.....	83

1. INTRODUÇÃO

O medidor de energia elétrica é um instrumento de medida muito utilizado, que possibilita que a concessionária fornecedora de energia elétrica obtenha a quantidade de energia elétrica consumida por cada unidade consumidora. Esta ferramenta também é muito utilizada em equipamentos industriais, para controle interno. O equipamento deve seguir os padrões técnicos utilizados pelos órgãos oficiais de metrologia, Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (Lima, 2007; Filho, 1976).

Estes padrões técnicos utilizam como referência normas de alguns órgãos nacionais e internacionais. Dentre estes órgãos, destaca-se a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que disponibiliza as normas técnicas NBR-14.519 - *Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Especificação* e NBR-14.520 - *Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Método de Ensaio*, ambas com sua atualização em 2011 com o projeto 03:013.01-034.

Além das normas nacionais citadas anteriormente, existem as normas IEC 62053:2003-21 - *Part 21: Static Meters for active energy (classes 1 and 2)*, IEC 62053:2003-22 - *Part 21: Static Meters for active energy (classes 0,2 S and 0,5 S)*, IEC 62053:2003-23 - *Part 21: Static Meters for reactive energy (classes 2 and 3)* (INMETRO, 2007).

Existem dois tipos de medidores de energia elétrica. O primeiro é o medidor eletromecânico, onde o princípio de funcionamento é a indução magnética. Normalmente é do tipo 2, que significa que possui um erro máximo de $\pm 2\%$. O segundo tipo é o medidor eletrônico, que consiste na implementação de um algoritmo que calcule o valor das potências instantâneas do circuito que se deseja medir, integrando no tempo os resultados. O medidor eletrônico trabalha com precisão de 0,1% a 0,2% (Rizzi, 1980; Lima, 2007).

As definições de potência para regime senoidal são conhecidas e encontradas em diversos trabalhos. Por outro lado, para sistemas não-senoidais ou, no caso de sistemas trifásicos desequilibrados, estas definições não são mais válidas. Para isto, foi publicada no ano de 2010, a norma IEEE 1459, onde constam

definições de potências para sistemas monofásicos e trifásicos senoidais, não senoidais e, no caso dos trifásicos, equilibrados e desequilibrados. Porém, para que se possa utilizar as definições de potência dessa norma, se faz necessária a separação da componente fundamental das formas de onda de tensão e corrente (WILLEMS, 2010), (IEEE, 2010), (Cardoso, 2008).

Para a separação das componentes fundamentais das ondas de corrente e tensão, muitos trabalhos utilizam o filtro de *notch* ou a Transformada Discreta de Fourier (DFT), que são formas simples e eficientes para este fim, Porém, estes métodos, quando aplicados diretamente, fornecem resultados errôneos caso o sistema sofra variações de frequência. Um possível método para a decomposição dos sinais em suas componentes harmônicas foi proposto por Cardoso (2008) e utiliza o filtro de Kalman para esse fim. Este método considera possíveis variações de frequência e fornece sinais instantâneos que são úteis para o cálculo de potências instantâneas e, conseqüentemente, da energia de um sistema.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Devido a crescente instalação de cargas não lineares na rede elétrica, como fontes chaveadas e inversores, observa-se um aumento nos problemas com as taxas de distorção harmônica (TDH) na rede elétrica. Esta distorção é oriunda de correntes não senoidais (harmônicas) que por sua vez, quanto interagem com as impedâncias do sistema, podem causar distorções de tensão. Tipicamente, os sistemas de medição de energia não estão preparados para este cenário, uma vez que foram projetados para sistemas senoidais. Com isso, a eficiência da medição de energia em equipamentos não projetados para este cenário fica comprometida (Rodrigues, 2009). Para que a energia elétrica seja corretamente medida, devem ser considerados os efeitos dos harmônicos em seu cálculo. Como mostra a norma IEEE 1459-2010, os desequilíbrios também influenciam na mensuração das potências em sistemas trifásicos. Dessa forma, surge a necessidade da utilização de medidores de energia que sejam capazes de mensurar energia, em sistemas sujeitos a formas de onda não senoidais e/ou desequilíbrios, com precisão.

1.2 OBJETIVO GERAL

Expandir as funcionalidades do sistema de aquisição e processamento de dados desenvolvido em (Santolin, 2011) para incorporar a medição de energia elétrica tomando como base as definições de potência apresentadas na norma IEEE 1459 – 2010 para regime senoidal e não senoidal e para sistemas monofásicos e trifásicos equilibrados e desequilibrados. Por fim, portar o algoritmo desenvolvido para um DSC (*Digital Signal Controller*) para a operação sem a necessidade de conexão com um computador.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Readequar a atual placa de conexão entre um mini módulo de conversão SERIAL-USB (*Universal Serial Bus*) com o DSC, para utilizar apenas um cabo.
2. Avaliar quais informações necessitam ser calculadas para exibição.
3. Inserir o algoritmo de medição de energia elétrica no aplicativo para computador desenvolvido por (Santolin, 2011).
4. Portar o algoritmo de medição de energia elétrica para o DSC (*Digital Signal Controller*) TMS320F28335.
5. Realizar testes experimentais de funcionamento para validação do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 NORMA IEEE 1459 - 2010

Nos últimos 50 anos ocorreram mudanças importantes ocasionadas pela crescente instalação de cargas não lineares. Assim, surge a necessidade em adaptar ao novo ambiente os conceitos de energia ativa, reativa, aparente e também de fator de potência utilizados em algoritmos de medição. Para a solução deste problema, a Comissão de Instrumentação e Medida de Sistemas de Potência, da Sociedade de Energia e Potência IEEE, publicou, como uso experimental, no ano de 2000, a norma IEEE 1459 - *IEEE Standard Definitions for the Measurement Of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. Seu uso como padrão completo deu-se em 2002. Esta norma foi revisada e publicada em 2010. A norma não tem como objetivo propor quais e como as medições devem ser feitas, mas propor conceitos e definições que podem ser úteis para a avaliação da qualidade de energia elétrica (WILLEMS, 2010; IEEE, 2010).

2.1.1 Implementação das Equações para um Sistema Monofásico

2.1.1.1 Cálculo dos Valores RMS das Tensões e Correntes

Os valores instantâneos dos sinais de tensão v e corrente i são compostos pela soma das componentes fundamentais, v_1 e i_1 , com as componentes harmônicas, v_h e i_h . Assim,

$$v_k = v_1 + v_h, \quad (1)$$

$$i_k = i_1 + i_h. \quad (2)$$

Os valores instantâneos (1) e (2) são utilizados para o cálculo dos valores RMS da tensão e corrente, conforme definido pelas equações (3) e (4),

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_k^2 T_s}, \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} i_k^2 T_s}, \quad (4)$$

onde τ é o instante inicial, T o intervalo medido e T_s o período de amostragem.

Os valores RMS da componente fundamental de tensão (5) e de corrente (6) são obtidos através do somatório dos valores instantâneos da componente fundamental,

$$V_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{1k}^2 T_s}, \quad (5)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} i_{1k}^2 T_s}. \quad (6)$$

Com base nas relações (7) e (8) pode-se determinar os valores RMS das parcelas harmônicas para a tensão (V_h) e para a corrente (I_h),

$$V^2 = V_1^2 + V_h^2, \quad (7)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_h^2. \quad (8)$$

2.1.1.2 Potências Ativas

O cálculo das potências ativas se dá através de (9) e (10) e, como se pode observar, é realizado a partir do somatório do produto da tensão e corrente

instantânea durante o período T do sinal analisado. A grandeza P corresponde à potência ativa total do sistema enquanto P_1 corresponde à potência ativa devido a componente fundamental do sistema.

$$P = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_k i_k T_s, \quad (9)$$

$$P_1 = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{1k} i_{1k} T_s. \quad (10)$$

Para se encontrar o valor da potência ativa da componente harmônica P_h utiliza-se (11),

$$P = P_1 + P_h. \quad (11)$$

2.1.1.3 Potência Reativa

Para o cálculo da potência reativa fundamental, são utilizados os valores instantâneos das componentes fundamentais da corrente e da tensão em quadratura, conforme (12),

$$Q_1 = \frac{\omega}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} i_{1k} \left(\frac{v_{1k}^\perp}{\omega} \right) T_s, \quad (12)$$

onde v_k^\perp é o valor da tensão instantânea em quadratura, ω é o valor da frequência fundamental angular da rede e T é o período do sinal sob análise.

2.1.1.4 Potências Aparentes

O valor correspondente a potência aparente é obtido pelo produto entre os valores de tensão e corrente RMS conforme mostra a equação (13). Já a

potência aparente devido as componentes fundamentais é calculado pela equação (14) enquanto a potência aparente devido as componentes harmônicas é dada pela equação (15).

$$S = V I, \quad (13)$$

$$S_1 = V_1 I_1, \quad (14)$$

$$S_h = V_h I_h. \quad (15)$$

2.1.1.5 Potência Não Ativa

O cálculo de potência não ativa é realizado através da equação (16)

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (16)$$

2.1.1.6 Fatores de Potência

A partir dos valores de potência ativa e aparente, é possível se calcular o valor do fator de potência, dado por (17)

$$FP = \frac{P}{S}. \quad (17)$$

O valor do fator de potência fundamental é calculado através da equação (18)

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1}. \quad (18)$$

2.1.1.7 Taxa de Distorção Harmônica

O cálculo da taxa de distorção harmônica de tensão (19) e de corrente (20) vem da razão dos valores RMS da componente harmônica e da fundamental, isto é,

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1}, \quad (19)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1}. \quad (20)$$

2.1.2 Implementação das equações para um sistema trifásico

2.1.2.1 Potência Ativa

Para sistemas trifásicos utilizando quatro fios, o valor da potência ativa total P é a soma dos valores das potências de cada fase (21), sendo que, a potência de cada fase é calculada utilizando a equação (9). Assim,

$$P = P_a + P_b + P_c. \quad (21)$$

Porém, para sistemas trifásicos com três fios é adotada a expressão (22)

$$P = P_{ab} + P_{cb}, \quad (22)$$

onde, P_{ab} é calculada através de (23) e P_{cb} através de (24),

$$P_{ab} = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{abk} i_{ak} T_s, \quad (23)$$

$$P_{cb} = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{cbk} i_{ck} T_s. \quad (24)$$

Já a potência ativa fundamental P_1 , para um sistema trifásico utilizando quatro fios é dada por (25)

$$P_1 = P_{a_1} + P_{b_1} + P_{c_1}. \quad (25)$$

Para um sistema a três fios P_1 é calculada por

$$P_1 = P_{ab_1} + P_{cb_1}, \quad (26)$$

onde, P_{ab_1} e P_{cb_1} são dados por,

$$P_{ab_1} = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{ab_{k_1}} i_{a_{k_1}} T_s, \quad (27)$$

$$P_{cb_1} = \frac{1}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} v_{cb_{k_1}} i_{c_{k_1}} T_s. \quad (28)$$

Utilizando-se, novamente, a equação (11), pode-se calcular o valor da potência ativa oriunda das componentes harmônicas.

2.1.2.2 Potência Reativa

Para calcular os valores da potência reativa fundamental, o procedimento utilizado é semelhante aos cálculos da potência ativa fundamental para sistemas trifásicos utilizando quatro fios. O valor da potência reativa fundamental é a soma dos valores das potências de cada fase (29), sendo que, a potência de cada fase é calculada utilizando a equação (12).

Assim, para a componente fundamental, a potência reativa de um sistema trifásico utilizando quatro fios é dada por

$$Q_1 = Q_{a_1} + Q_{b_1} + Q_{c_1}. \quad (29)$$

Já para um sistema a três fios tem-se

$$Q_1 = Q_{ab_1} + Q_{cb_1}, \quad (30)$$

onde, Q_{ab_1} e Q_{cb_1} são dados por,

$$Q_{ab_1} = \frac{\omega}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} i_{a_{k_1}} \left(\frac{v_{ab_{k_1}}^\perp}{\omega} \right) T_s \quad (31)$$

$$Q_{cb_1} = \frac{\omega}{T} \sum_{k=\tau}^{\tau+T} i_{c_{k_1}} \left(\frac{v_{cb_{k_1}}^\perp}{\omega} \right) T_s \quad (32)$$

2.1.2.3 Potência Efetiva

Para sistemas trifásicos, a norma substituiu a definição de potência aparente pela definição de potência efetiva. Esta definição, quando o sistema é equilibrado e senoidal é idêntica a potência aparente clássica. Porém, para sistemas desequilibrados ou sujeitos a formas de onda distorcidas, fornece uma melhor representação do sistema. Para o cálculo da potência aparente efetiva S_e , é necessário calcular, inicialmente, os valores de tensão efetiva V_e e da corrente efetiva I_e . Assim,

$$S_e = 3V_e I_e, \quad (33)$$

onde V_e e I_e , para sistemas a quatro fios são dados por

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}}, \quad (34)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}, \quad (35)$$

Enquanto que para sistemas utilizando três fios são dadas por

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}}, \quad (36)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}. \quad (37)$$

2.1.2.4 Potência Não Ativa

O cálculo da potência não ativa para sistemas trifásicos assemelha-se ao cálculo para sistemas monofásicos e é dado por

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2}. \quad (38)$$

2.1.2.5 Taxas de Distorção Harmônicas

O cálculo da distorção harmônica de tensão e corrente é realizado através de (39) e (40),

$$THD_V = \frac{V_{eH}}{V_{e1}}, \quad (39)$$

$$THD_I = \frac{I_{eH}}{I_{e1}}. \quad (40)$$

2.1.2.6 Fatores de Potência

O cálculo dos fatores de potência é realizado por meio de (41) e (42)

$$PF = \frac{P}{S_e}, \quad (41)$$

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_{e_1}}. \quad (42)$$

2.2 FILTRO DE KALMAN

Como pode ser observado na apresentação das grandezas definidas pela norma IEEE1459-2010, é necessária a separação da componente fundamental das tensões e correntes. Deste modo, diversas formas de decomposição de sinais de tensões e correntes são propostas na literatura (Cardoso, 2008). Neste trabalho, será empregado o filtro de Kalman para realizar esta tarefa,

Sendo v e i os valores instantâneos totais de tensão e corrente lidos pelo sistema, tem-se que v_1 e i_1 correspondem aos valores estimados pelo filtro de Kalman e v_h e i_h aos valores remanescentes do sistema, obtidos a partir de (1) e (2).

O filtro de Kalman é implementado no sistema utilizando as equações apresentadas em (Cardoso, 2008). Para isso, os sinais de tensão e corrente são modelados como um sistema dinâmico discreto dado por,

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k \Upsilon_k, \quad (43)$$

$$y_k = F_k x_k + v_k, \quad (44)$$

$$\dim x_k = n \times 1, \dim y_k = r \times 1, \dim \Upsilon_k = p \times 1, \quad (45)$$

onde y_k e v_k são sequências de ruído branco gaussiano, não correlacionadas, com médias e covariâncias dadas por:

$$E\{y_i\} = 0, E\{y_i y_j^T\} = Q_i \delta_{ij}, \quad (46)$$

$$E\{v_i\} = 0, E\{v_i v_j^T\} = R_i \delta_{ij}, \quad (47)$$

$$E\{y_i v_j^T\} = 0, E\{y_i x_j^T\} = 0, E\{v_i x_j^T\} = 0, \forall i, j, \quad (48)$$

sendo $E\{\cdot\}$ o operador matemático esperança, δ_{ij} representando a função delta de Kronecker e Φ_k , Γ_k e F_k com dimensões adequadas, a equação do filtro de Kalman é representada pela equação abaixo

$$\hat{x}_{k+1|k} = \Phi_k x_{k-1|k} + K_k (y_k - F_k \hat{x}_{k-1|k}) \quad (49)$$

onde K_k é denominado ganho de Kalman e representado por

$$K_k = \Phi_k P_{k|k-1} F_k^T (F_k P_{k|k-1} F_k^T + R_k)^{-1} \quad (50)$$

e $P_{k|k+1}$ é a matriz covariância dos erros de estimação do vetor $x_{k+1|k}$,

$$P_{k|k+1} = \Phi_k P_{k|k-1} \Phi_k^T - K_k F_k P_{k|k-1} \Phi_k^T + \Gamma_k Q_k \Gamma_k^T \quad (51)$$

Para um sinal S_k com n componentes harmônicas,

$$S_k = \sum_{i=1}^n A_{i_k} \sin(i\omega_k t_k + \theta_{i_k}) \quad (52)$$

sendo A_{i_k} , $i\omega_k$ e θ_{i_k} amplitude, frequência angular e fase de cada componente harmônica i no instante de tempo t_k , o modelo (43)-(44) é dado por

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2n-1} \\ x_{2n} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2n-1} \\ x_{2n} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{2n-1} \\ y_{2n} \end{bmatrix}_k, \quad (53)$$

$$y_k = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2n-1} \\ x_{2n} \end{bmatrix}_k + v_k, \quad (54)$$

sendo

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(i\omega_k T_s) & \sin(i\omega_k T_s) \\ -\sin(i\omega_k T_s) & \cos(i\omega_k T_s) \end{bmatrix}, \quad (55)$$

onde T_s é o período de amostragem.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO MEDIDOR

3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Em (Santolin, 2011) foi desenvolvido um sistema de aquisição e condicionamento de dados com comunicação USB. Tal sistema permite a aquisição de sinais de tensão e corrente, os condiciona para níveis de tensão compatíveis com o conversor analógico-digital do processador TI-TMS320F28335 que foi usado no projeto. A partir de uma interface USB, conectada ao processador, pode-se realizar a conexão do sistema de aquisição de dados com um computador. Detalhes sobre o sistema podem ser obtidos em (Santolin, 2011). Este sistema permite que seja implementado em um computador diversos algoritmos para o tratamento dos dados oriundos do sistema de aquisição. Este sistema é a base para o desenvolvimento do medidor de energia proposto nesse trabalho.

O medidor de energia desenvolvido foi implementado em duas versões. A primeira foi desenvolvida em um *software* desenvolvido para PC. A segunda versão foi desenvolvida para o DSC TI-TMS320F28335. A figura 1

A figura 1 apresenta o diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento dos dados que foi utilizado para o desenvolvimento do medidor de energia no PC. Observa-se que o sistema é composto, primeiramente, pelos sensores encarregados por realizar a medição de correntes e tensões de maneira isolada. Para isso, foram empregados sensores de efeito Hall. Na sequência, circuitos de condicionamento de sinais recebem os sinais dos sensores de efeito *hall* e os condicionam para os níveis de entrada do ADC (*Analog to Digital Converter*) interno ao DSC. A próxima etapa consiste na aquisição dos dados pelo ADC do kit de desenvolvimento eZdspTMF28335. Os dados adquiridos podem ser tratados no próprio DSC ou serem enviados para o computador através de módulo FT2232H. A conexão USB é bidirecional e, portanto, pode também receber dados oriundos do computador.

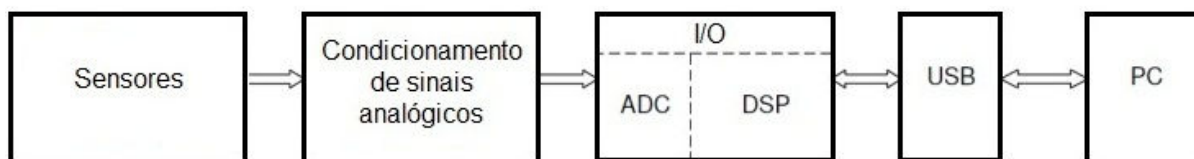


Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de sinais

Fonte: Autoria própria

O medidor implementado diretamente no DSC segue a estrutura descrita na figura 2. Observa-se que trata-se da mesma estrutura apresentada na figura 1 porém, sem a interface USB.

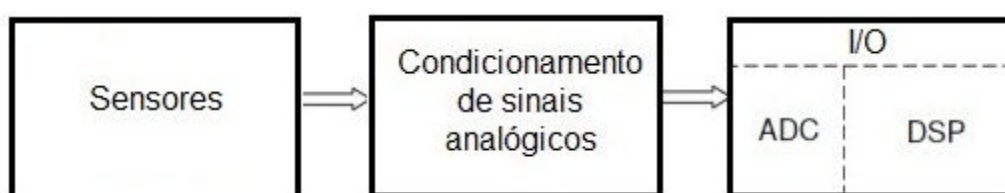


Figura 2 - Diagrama de blocos para o sistema embarcado.

Fonte: Autoria própria

Na sequência, serão detalhados os blocos apresentados nas figuras 1 e 2.

3.1.2 Sensores de Efeito *Hall*

Para realizar a aquisição dos sinais de tensão e corrente, são utilizados sensores de efeito hall, sendo eles transdutores de tensão e corrente. O transdutor é um equipamento utilizado para medir uma determinada grandeza, onde o valor da saída tem uma relação com o valor de entrada (JCGM, 2008).

O sensor utilizado para a aquisição dos valores de corrente é o LA 55P da empresa LEM. Este sensor é capaz de mensurar correntes CA e CC possuindo um isolamento galvânico entre o circuito primário e secundário apresentando um erro de linearidade menor que 0,15%. Estes sensores são alimentados com uma tensão de $\pm 12V$ até $\pm 15V$ e a relação entre o valor de entrada e de saída de 1:1000 (LEM, Datasheet - Current Transducer LA 55-P, 2013). A figura 3 exibe o sensor utilizado.

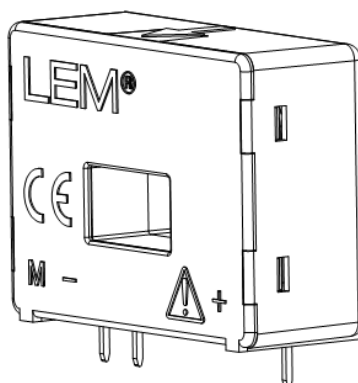


Figura 3 - Sensor de efeito hall LA 55P - LEM
 Fonte: (LEM, Datasheet - Current Transducer LA 55-P, 2013)

O transdutor utilizado para a aquisição dos valores de tensão é o LV 25-600, da empresa LEM, onde o equipamento é alimentado com uma tensão de $\pm 12V$ até $\pm 15V$ e possuindo uma relação de transformação de 600V:25mA e fornecendo linearidade menor que 0,2% (LEM, Datasheet Voltage Transducer LV 25-600, 2013). A figura 4 exibe o sensor empregado.

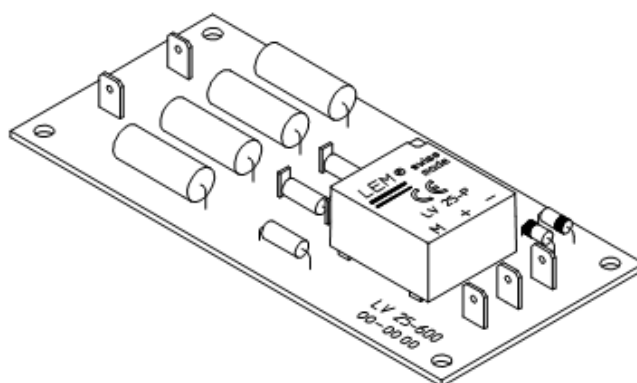


Figura 4 - Sensor de efeito hall LV 25-600 - LEM
 Fonte: (LEM, Datasheet Voltage Transducer LV 25-600, 2013)

3.1.3 Condicionamento de Sinal

Os sinais de saída dos sensores de efeito hall são enviados a uma placa de condicionamento de sinal, onde nelas o sinal será adequado aos níveis de tensão do conversor ADC do DSC, de 0V à 3V. Este circuito é composto por um conversor de corrente em tensão, pois os sensores possuem saída em corrente. Após, um amplificador de instrumentação encarrega-se de reduzir os níveis de ruído

de modo comum. Um filtro *anti-aliasing* é empregado para limitar a banda do sinal e, finalmente, um amplificador operacional *rail-to-rail* é responsável por limitar os sinais na entrada do conversor ADC entre 0V e 3V para que este não seja danificado em situações em que o sinal possa tender a ultrapassar estes limites. O diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais está ilustrado na figura 5 (Will, 2012) (INSTRUMENTS, 2008).

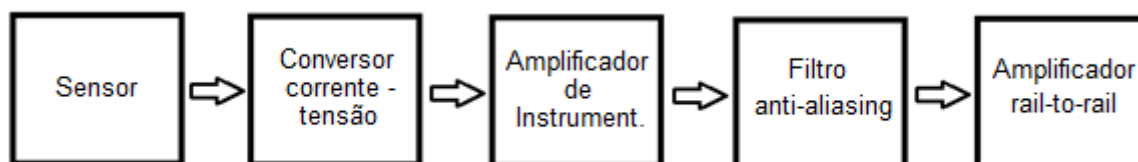


Figura 5 - Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinal
Fonte: Adaptado de (Will, 2012)

3.1.4 Conexão USB

Conforme mencionado anteriormente, a comunicação entre o sistema de aquisição e o computador é realizada através do protocolo USB. Neste trabalho, o módulo FT2232H é empregado para interfacear o DSC com o PC via o protocolo USB.

O módulo FT2232H, mostrado na figura 6, realiza a conversão bidirecional USB-UART/FIFO. O módulo possui uma interface USB de dois canais, que pode ser utilizado como entrada ou saída (FTDI, 2011; Santolin, 2011).

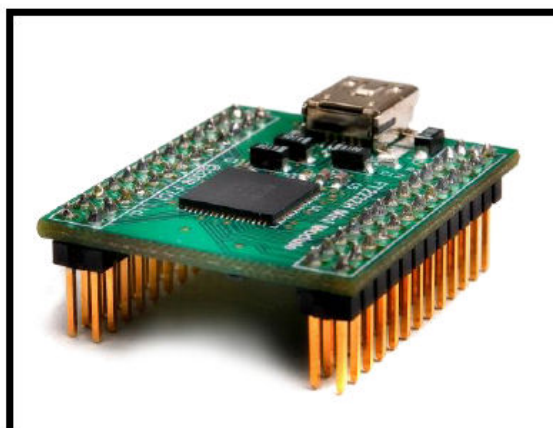


Figura 6 - Mini Módulo FT2232H
Fonte: (FTDI, 2011)

3.1.5 Kit de Desenvolvimento eZdspTMF28335.

Por ser necessário uma alta capacidade de processamento, foi escolhido o kit de desenvolvimento eZdspTMF28335, por atender plenamente as necessidades do projeto. O eZdspTMF28335 possui um DSC TMS320F28335 que possui uma velocidade de operação de 150MHz e 32 bits de ponto flutuante (INSTRUMENTS, 2008).

O kit apresenta alta flexibilidade conferida pelos vários conectores de expansão que são fornecidos, além de exemplos básicos de códigos que facilitam o entendimento do programador. Para fins de programação, possui um conector JTAG que fornece interface para emuladores, com linguagem de programação "C" de alto nível (INSTRUMENTS, 2008).

O kit baseia-se no DSC TMS320F28335 e permite fácil acesso aos seus periféricos, através de alguns conectores como se pode observar na figura 7 e a especificação dos conectores na tabela 1.

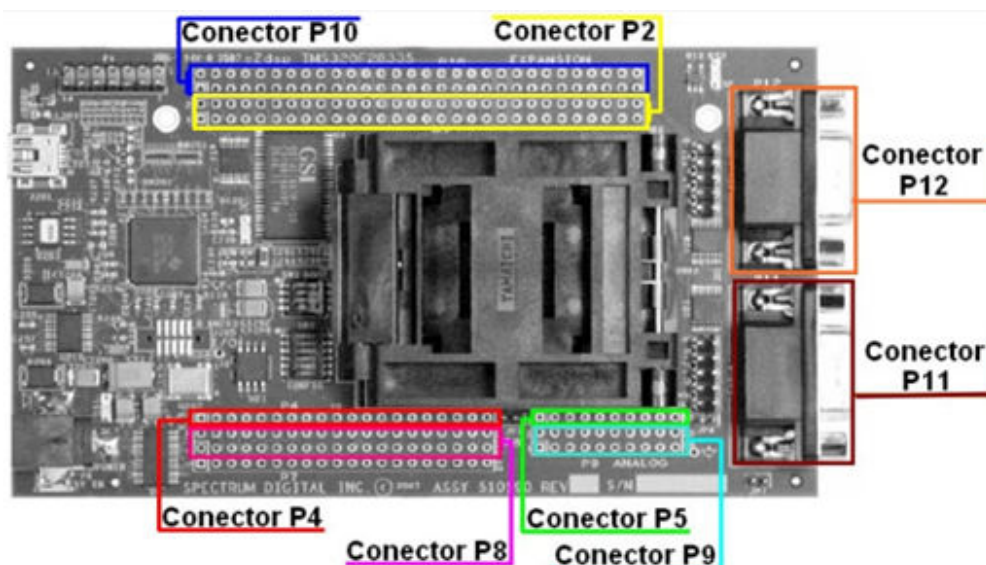


Figura 7 - Kit de desenvolvimento eZdspTMF28335.
Fonte: (Santolin, 2011).

Tabela 1 - Disposição dos conectores:

CONECTOR	FUNÇÃO
P5 - P9	Conversor Analógico Digital
P11 - P12	CAN-A E SCI-A
P2 - P10	I/O
P4 - P8	PWM E I/O

Fonte: (INSTRUMENTS, 2008)

A tabela 2 apresenta as especificações de hardware do kit de desenvolvimento eZdspTMF28335.

Tabela 2 - Especificações de hardware do eZdspTMF28335:

N°	ESPECIFICAÇÃO
1	Controlador Digital de Sinais TMS320F28335
2	Velocidade de operação de 150MHz
3	32 bits de ponto flutuante
4	68K <i>bits</i> de memória RAM
5	512K <i>bits</i> de memória FLASH
6	256K <i>bits</i> de memória SRAM
7	12 <i>bits</i> no A/D e 16 canais
8	30MHz de <i>Clock</i> interno
9	RS-232 com <i>driver</i> de linha
10	CAN 2.0 interface com <i>driver</i> de linha e conector
11	Vários conectores de expansão
12	USB JTAG Controller
13	5 volts operação com alimentado por uma fonte CA
14	IEEE 1149.1 JTAG conector de simulação;

Fonte: (INSTRUMENTS, 2008)

3.2 FRAMEWORK QT

O algoritmo responsável pela medição de energia elétrica foi adicionado no *software* desenvolvido por (Will, 2012). Por questão de redução de custos de implementação, optou-se por utilizar este *software* que foi desenvolvido no *framework* QT, que se caracteriza por ser uma plataforma livre de desenvolvimento.

O *framework* QT é uma aplicação multi-plataforma para desenvolvimento de aplicações na linguagem C⁺⁺, fornecendo aos desenvolvedores toda a funcionalidade necessária para a construção de interfaces gráficas. A aplicação é totalmente orientada a objetos e facilmente extensível (Nokia, 2011). A figura 8 ilustra o ambiente de desenvolvimento do *framework* QT.

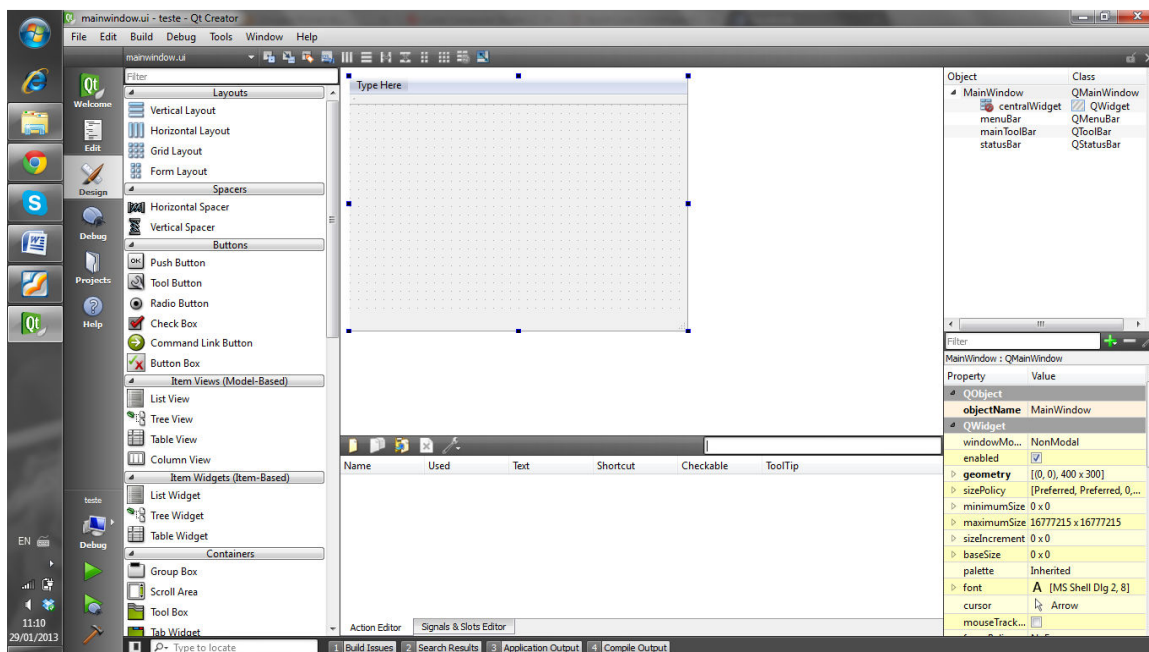


Figura 8 - Qt Creator
Fonte: Autoria própria

Dentre suas funcionalidades, há que se ressaltar a possibilidade do programador em compilar seus aplicativos em várias plataformas, dentre elas *Windows*[®], *Mac OS*[®] e *Linux*[®] além de permitir a compilação para sistemas de dispositivos móveis ou embarcados, como *Windows CE/Mobile*[®], *Symbian*[®], *MeeGo*[®] e *Linux Embedded*[®] (Santolin, 2011).

3.3 ALGORITMO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O algoritmo para medir a energia elétrica baseia-se na grandezas de potência definidas norma IEEE-1459-2010, descrita na seção 2.1. A partir destas grandezas os valores são integrados no tempo para fornecerem os valores de energia associados. Porém, como visto anteriormente, para estas grandezas serem calculadas é necessária a separação da componente fundamental do sinal de corrente e tensão.

Para a separação da componente fundamental, o algoritmo utiliza a proposta de Cardoso (2008), onde é utilizado o filtro de Kalman, descrito na seção 2.2, para este fim, O filtro fornece, instantaneamente, os valores fundamentais de tensão e corrente. Neste trabalho, considerou-se a frequência de rede constante em 60 Hz. Sabe-se porém, que na prática esse valor pode ser variável. Neste caso, em

(Cardoso, 2008) é proposto um algoritmo para a identificação da frequência da rede nas equações do filtro de Kalman.

A partir da norma e do filtro de Kalman, é possível o cálculo do valor da energia ativa e reativa consumida pela carga, sendo estas dadas pela integral da potência ativa e reativa com respeito ao tempo, respectivamente.

Por fim é calculada a demanda, que tem como definição a carga média durante um intervalo de tempo especificado (EEI, 2002). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi adotado o tempo de um minuto para o cálculo da demanda, devido a algumas limitações laboratoriais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a validação do sistema de medição proposto, foram realizadas simulações utilizando o *software* MATLAB[®]. Para isto foram criadas situações utilizando o SIMULINK[®] com cargas resistivas, indutivas e capacitivas submetidas à uma fonte contendo componentes harmônicos. O algoritmo foi simulado para os sistemas, monofásico, trifásico a três fios e trifásico a quatro fios.

Para a simulação foi utilizada uma taxa de amostragem de 128 pontos por ciclo, e um tempo de um segundo de simulação. O sistema foi programado para ser capaz de detectar até a 51^ª harmônica através do filtro de Kalman.

Os resultados de simulação que serão apresentados foram comparados com os valores teóricos esperados para os circuitos que seguem. Os valores obtidos através do *software* proposto foram coerentes com os valores teóricos.

4.1.1 Circuito Monofásico

Para a simulação, foi considerada uma carga RLC alimentada por uma fonte contendo componentes harmônicas. A alimentação é composta por uma fonte V1 com amplitude de 180V em 60Hz, V2 com amplitude de 30V em 180Hz, V3 com amplitude de 15V em 300Hz e V4 com amplitude de 5V em 540Hz. A carga RLC é composta por um resistor de 25 Ω , um indutor de 27mH e um capacitor de 450 μ F, conforme exposto na figura 9.

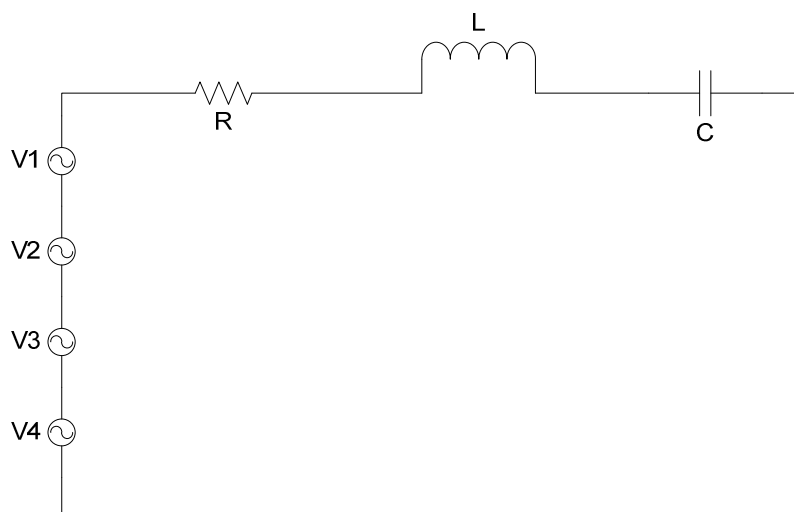


Figura 9 - Circuito RLC monofásico
Fonte: Autoria própria

Os dados fornecidos pela simulação foram processados por um algoritmo implementado em Matlab para o cálculo das grandezas descritas na norma IEEE 1459-2010. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 17 do apêndice A.

A medição da energia foi feita para 12 ciclos de onda para uma frequência de 60Hz, atendendo a norma IEC 61000-4-30 - *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. Na tabela 3 são apresentados os resultados referentes as potências e as energias calculadas na simulação. Os valores referentes as energias foram transformados para um tempo de um minuto para efeito de comparação com os resultados do sistema via software.

Tabela 3 - Resultados circuito monofásico

Variável	Simulação
Potência ativa	635,4055 W
Potência reativa	118,5141VAr
Potência aparente	651,6492VA
Fator de potência	0,9751
Energia ativa	10,59 Wh
Energia reativa	1,92 VArh

Fonte: Autoria própria

Os valores de energia ativa e energia reativa correspondente ao tempo de 0,2s (12 ciclos de onda) foram de 0,0353 Wh e 0,00656 VArh.

4.1.2 Circuito Trifásico a 3 Fios

O circuito trifásico a 3 fios, apresentado na figura 10, foi simulado considerando-se a componente fundamental e três componentes harmônicas de tensão. As fontes A1, B1 e C1 possuem amplitude de 180V em 60 Hz, A2, B2 e C2 possuem amplitude de 30V em 180Hz, A3, B3 e C3 possuem amplitude de 15V em 300Hz e A4, B4 e C4 têm amplitude de 5V em 540Hz. Na fase A foi utilizada uma carga resistiva de 25Ω , na fase B uma carga resistiva e indutiva, com os valores de 25Ω e 27mH , respectivamente, e na fase C uma carga resistiva e capacitiva, com os valores de 25Ω e $450\mu\text{F}$, respectivamente. Os resultados obtidos a partir da simulação são apresentados na tabela 18 do apêndice A. A tabela 4 sintetiza os valores referentes as energias e potências ativa, reativa e aparente do sistema. Nesta tabela, os valores de energia ativa e reativa foram transformados para um tempo de um minuto.

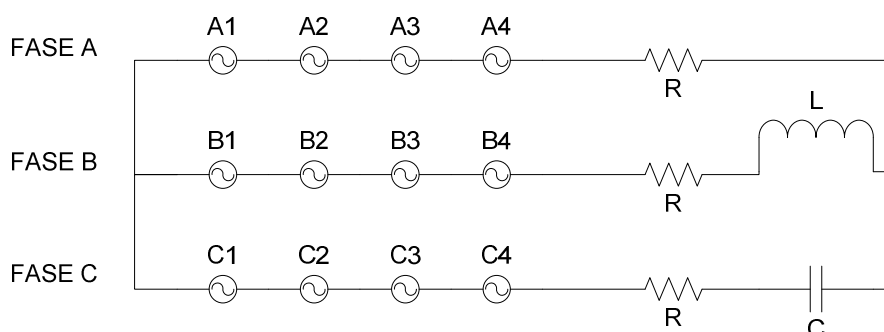


Figura 10 - Circuito RLC trifásico 3 fios
Fonte: A autoria própria

Tabela 4 - Resultados circuito trifásico 3 fios

Variável	Simulação
Potência ativa	1879,5546W
Potência reativa	102,9002VAr
Potência aparente	1914,1695VA
Fator de potência	0,98035
Energia ativa	31,29 Wh
Energia reativa	1,71 VArh

Fonte: A autoria própria

A medição de energia para 12 ciclos de onda forneceu 0,1043 Wh de energia ativa e 0,0057 VARh de energia reativa.

4.1.3 Circuito Trifásico a 4 Fios

O circuito utilizado para esta simulação é idêntico ao do sistema trifásico 3 fios, mas com a adição do neutro no sistema. A figura 11 apresenta a configuração do circuito e a tabela 5 apresenta os valores das potências ativa, reativa, a aparente e os resultados das energias ativa e reativa. A tabela 19 presente no apêndice A contém todas as grandezas calculadas na simulação.

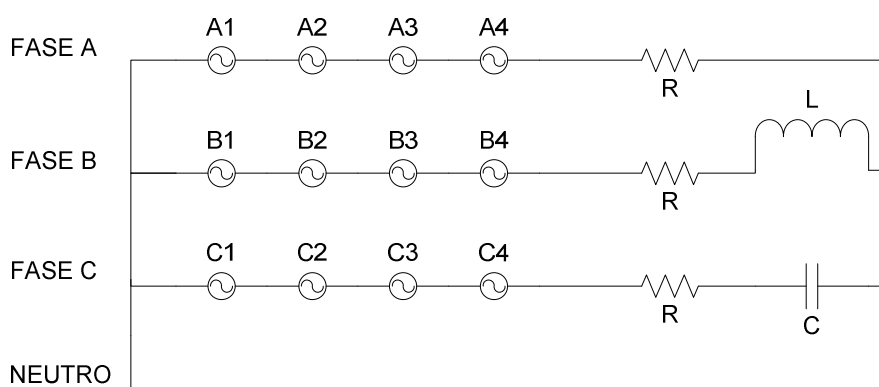


Figura 11 - Circuito RLC trifásico 4 fios
Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Resultados circuito trifásico 4 fios

Variável	Simulação
Potência ativa	1866,5789W
Potência reativa	90,0954VAr
Potência aparente	2089,7117VA
Fator de potência	0,8932
Energia ativa	31,08 Wh
Energia reativa	1,500 VARh

Fonte: Autoria própria

Do mesmo modo que se procedeu para as demais simulações, a fim de atender a norma IEC 61000-4-30, realizou-se uma medição de energia para 12 ciclos de onda onde obteve-se o valor de 0,1036 Wh de energia ativa e 0,0050 VARh

de energia reativa, sendo esses valores de energia ativa e reativa, contidos na tabela 5, transformados para o tempo de um minuto para uma melhor comparação com os resultados do sistema via *software*.

4.1.4 Resultados Obtidos com o *Software* no PC

O algoritmo para cálculo das energias do sistema foi implementado no *software* desenvolvido por Lucas Santolin em seu trabalho de conclusão de curso (Santolin, 2011), de forma a expandir sua capacidade de análise integrando mais esta funcionalidade ao mesmo. O *software* foi desenvolvido para a análise de qualidade de energia, utilizando ferramentas livres, para redução de custos de desenvolvimento.

Para uma aquisição mais precisa dos resultados, foram geradas ondas no Matlab®, com tempos exatos de simulação. Por motivos de comparação, as ondas são referentes aos circuitos utilizados na simulação em Matlab®.

4.1.5 Circuito Monofásico

O circuito monofásico utilizado é o mesmo da seção 4.1.1 e descrito na figura 9.

Utilizando as formas de onda geradas via Matlab®, estas foram enviadas para o PC, e os valores de energia ativa, energia reativa, demanda de energia foram calculados. Estes valores estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados circuito monofásico

Tempo(s)	Energia Ativa (Wh)	Energia Reativa (VArh)	Demanda (W)
60	10,52	1,92	-
120	21,11	3,931	635,408
180	31,7	5,903	635,411
240	42,291	7,875	635,416
300	52,881	9,847	635,419

Fonte: Autoria própria

Observando a tabela 6, percebe-se, primeiramente, que, durante o primeiro minuto, o valor de demanda não está disponível. Isto ocorre devido ao modo como o sistema foi programado. Neste sistema, para se garantir a correta inicialização dos sinais dentro do *software* os valores calculados no primeiro minuto não são utilizados para o cômputo da demanda.

O sistema leva em torno de 0,4s estabilizar os sinais. Isto pode ser observado na tabela 7, onde apresenta os valores para os 5 primeiros segundos em que o sistema é simulado.

Tabela 7 - Resultados circuito monofásico

Tempo(s)	Energia Ativa (Wh)	Energia Reativa (VArh)	Demanda (W)
1	0,106	0,02	-
2	0,283	0,053	-
3	0,459	0,086	-
4	0,636	0,119	-
5	0,812	0,152	-

Fonte: Autoria própria

Calculando a diferença dos valores dos instantes 2s e 3s, observa-se que o valor da energia para este segundo é de 0,176W, e entre os instantes 3s e 4s o valor da energia para este segundo é de 0,177W. Com estes valores, devido ao sistema ter uma precisão de 3 casas após a virgula, é determinado o valor de energia igual a 0,1765W para um intervalo de tempo de um segundo. Com isto, fazendo a diferença entre o valor do intervalo de tempo de um segundo, 0,1765W e o valor do primeiro instante medido no sistema, obtêm-se uma diferença de 0,0765W, sendo este valor, equivalente aos 0,4s que o *software* utiliza para estabilizar o sistema.

A figura 12 apresenta os valores medidos para 5 minutos exibido no *software* desenvolvido para PC.

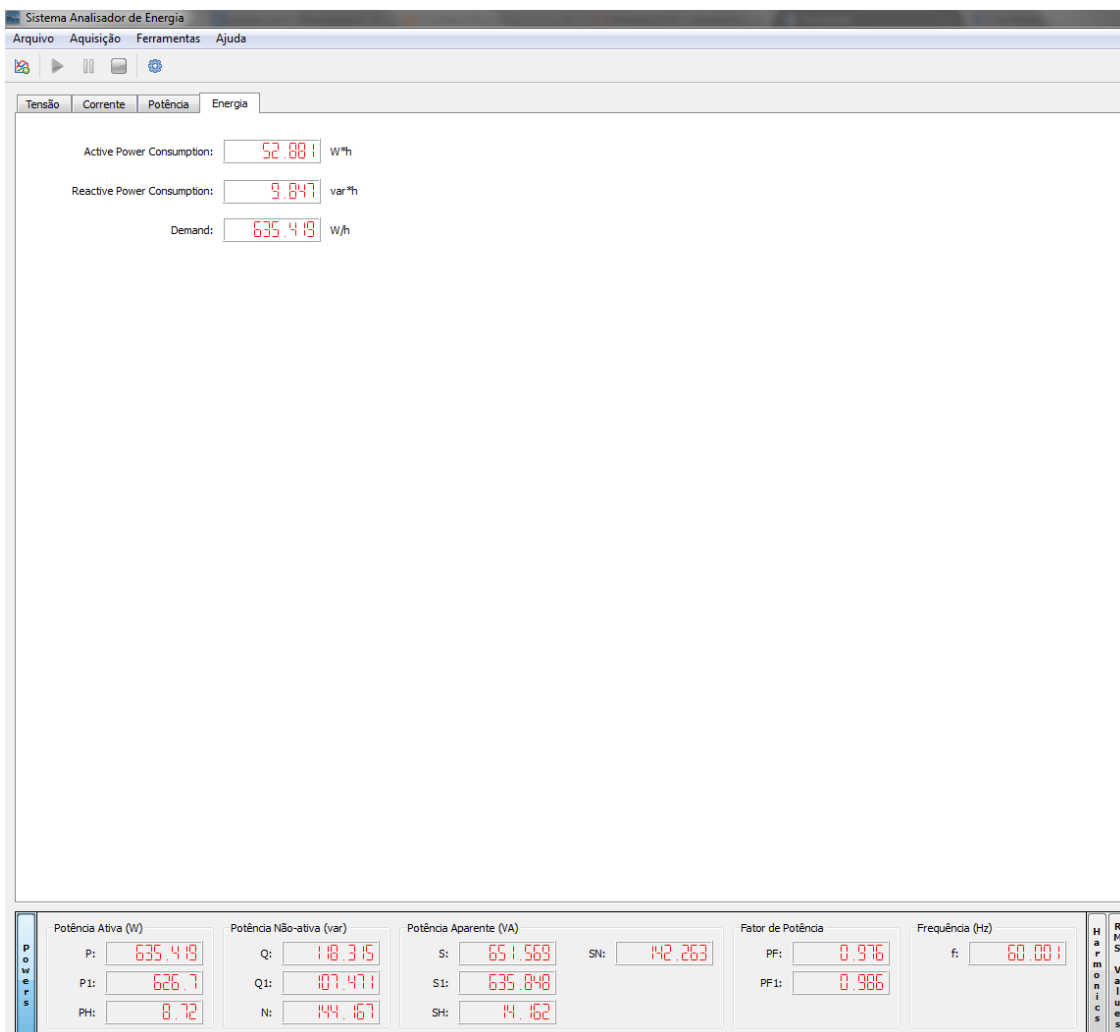


Figura 12 - Software - Carga RLC monofásica - 5 minutos
Fonte: Autoria própria

4.1.6 Circuito Trifásico a 3 Fios

O circuito trifásico a 3 fios, utilizado para o teste do *software* desenvolvido é o mesmo apresentado na seção 4.1.2 exibido na figura 10. A tabela 8 apresenta os valores de energia ativa, energia reativa e demanda correspondente para cada intervalo de tempo considerado.

Tabela 8 - Resultados circuito monofásico

Tempo(s)	Energia Ativa (Wh)	Energia Reativa (VArh)	Demanda (W)
60	31,064	1,69	-
120	62,335	3,392	1876,300
180	93,607	5,093	1876,304
240	124,878	6,794	1876,302
300	156,15	8,496	1876,294

Fonte: Autoria própria

Como observado para o sistema monofásico, para o tempo de 1 minuto, não se tem o valor da demanda, pois o valor será calculado no próximo minuto. A figura 13 apresenta os valores obtidos com o *software* para a carga analisada para um intervalo de tempo de 5 minutos.

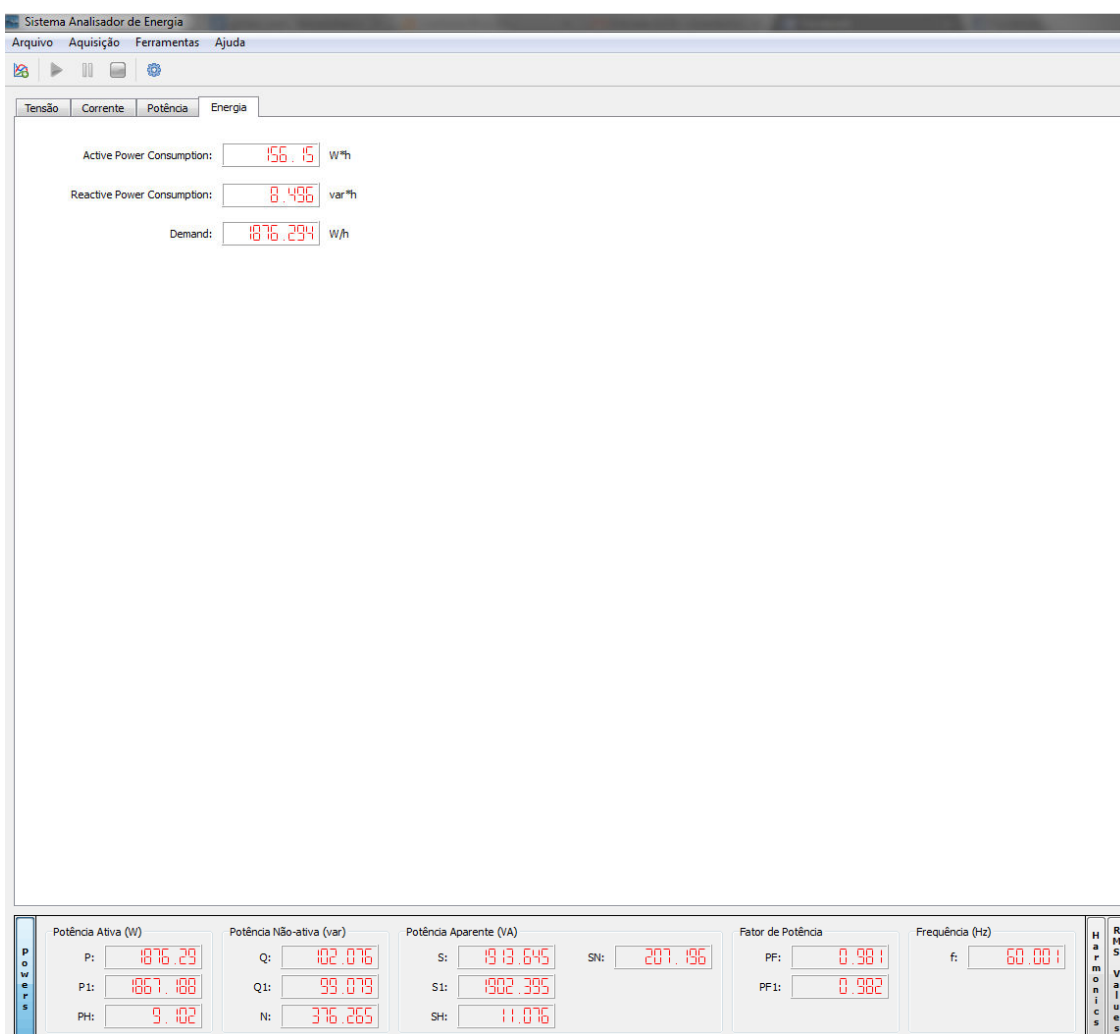


Figura 13 - Software - Carga RLC trifásica 3 fios - 5 minutos

Fonte: Autoria própria

4.1.7 Circuito Trifásico a 4 Fios

No sistema trifásico a 4 fios, foi utilizado o circuito da figura 11, onde o sistema apresenta a mesma configuração do circuito trifásico utilizando 3 fios, porém, foi adicionado o condutor de neutro. A tabela 9 apresenta os valores obtidos de energia ativa, energia reativa e demanda referente ao circuito durante os diferentes intervalos de tempo analisados.

Tabela 9 - Resultados circuito monofásico

Tempo(s)	Energia Ativa (Wh)	Energia Reativa (VArh)	Demanda (W)
60	30,832	1,481	-
120	61,938	2,976	1866,360
180	93,044	4,471	1866,365
240	124,15	5,966	1866,363

Fonte: Autoria própria

Pelos mesmos motivos anteriormente explicados, a demanda não é calculada no primeiro minuto. Adicionalmente, devido ao tamanho dos vetores de dados, somente foi possível a análise para um período de tempo de 4 minutos. A figura 14 exhibe os resultados para um tempo de 4 minutos.

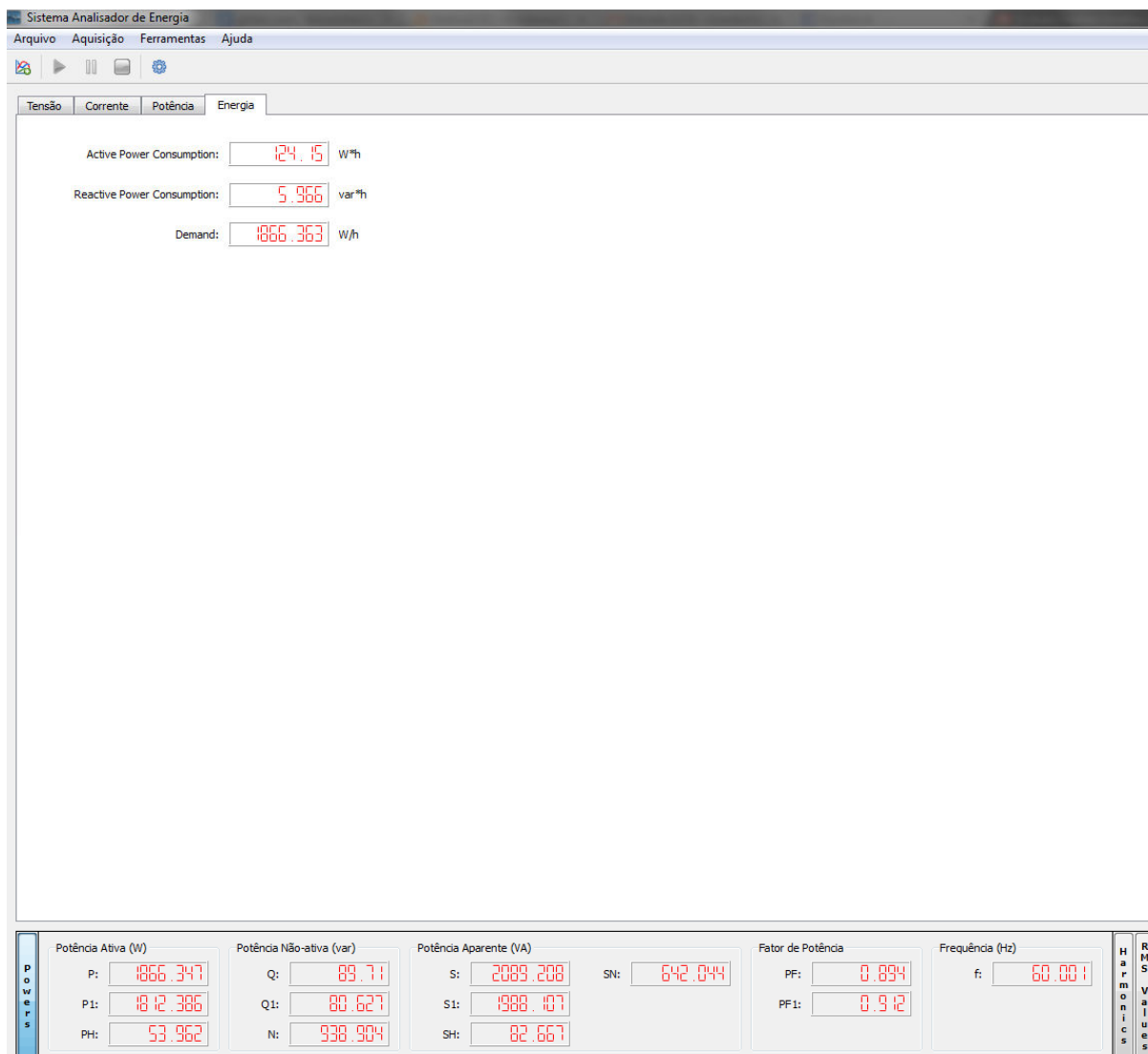


Figura 14 - Software - Carga RLC trifásica 4 fios - 4 minutos
Fonte: Autoria própria

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS BASEADOS NO SISTEMA EMBARCADO

O algoritmo desenvolvido foi portado para o DSC TMS320F28335. O sistema foi programado para as 3 situações anteriormente analisadas, isto é, sistema monofásico, trifásico a 3 fios e trifásico a 4 fios. Foi utilizada uma taxa de amostragem de 128 pontos por ciclo, sendo que esta foi limitada devido a alta quantidade de cálculos realizados. Levando em consideração a aquisição mínima de cinco pontos por ciclo, foi necessário reduzir a quantidade de harmônicas. Assim, o sistema identificará até a 25ª harmônica, conforme mostra a equação (56)

$$PPC_h = \frac{PPC}{h} \quad (56)$$

sendo PPC_h o número de pontos por ciclo da harmônica, PPC o número de pontos por ciclo da componente fundamental em 60Hz e h a ordem da componente harmônica.

Devido ao fato do sistema embarcado ser uma etapa importante do trabalho, foram realizados sete ensaios diferentes, sendo eles:

- Monofásico - Carga R;
- Monofásico - Carga RL;
- Monofásico - Carga não linear;
- Trifásico 3 fios - Carga R;
- Trifásico 3 fios - Carga não linear;
- Trifásico 4 fios - Carga R;
- Trifásico 4 fios - Carga RLC.

Os ensaios foram realizados utilizando a rede de energia elétrica local, por não haver disponível uma fonte CA programável capaz de alimentar as cargas. Assim, as tensões de alimentação possuem uma flutuação de tensão, presença de harmônicos e fases desbalanceadas.

Para a comparação dos resultados, foi utilizado o analisador de energia Fluke, modelo 434, por possuir uma função para o cálculo de consumo de energia. Destaca-se que o equipamento utiliza a teoria clássica para o cálculo das potências ao invés das definições recentes apresentadas na norma IEEE 1459-2010. Os resultados, com todas as grandezas calculadas, serão apresentados no apêndice B. Neste capítulo serão apresentados apenas os valores referentes a potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, energia ativa, energia reativa e demanda.

4.3.1 Circuito Monofásico

4.3.1.1 Carga R

Para este ensaio se utilizou quatro resistores de carga de 100Ω e $200W$ em paralelo, resultando em uma carga de 25Ω . A figura 15 apresenta o circuito utilizado.

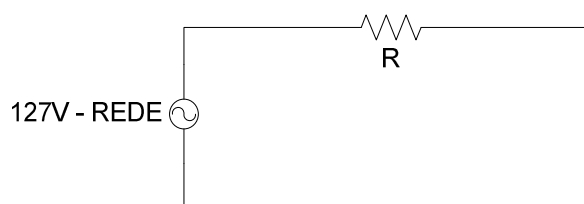


Figura 15 - Circuito monofásico - Carga R
Fonte: Autoria própria

A tabela 10 apresenta os resultados obtidos, para um tempo de ensaio de um minuto. O tempo reduzido se deve ao aquecimento das cargas, para evitar possíveis danos a estas. Segue, na tabela 10, os resultados obtidos.

Tabela 10 - Resultados Monofásico - Carga R

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	663,8652W	0,67KW
Potência reativa	1,5431VAr	0,01KVAr
Potência aparente	664,91VA	0,67KVA
Fator de potência	0,9984	1,00
Energia ativa	11,3009 Wh	0,011KWh
Energia reativa	0,1572 VArh	0,000KVArh

Fonte: Autoria própria

Comparando os resultados obtidos com o sistema embarcado e com o Fluke, observa-se que os resultados foram próximos. Os valores de THDv e THDi obtidos com o sistema embarcado, apresentados no apêndice B na tabela 20, ficaram acima do valor obtido com o Fluke. O valor de energia reativa fornecido pelo analisador proposto está próximo de zero, como esperado, e o pequeno valor

indicado deve-se aos ruídos remanescentes encontrados nos sinais filtrados, que impactam no algoritmo.

4.3.1.2 Carga RL

Para o ensaio com carga RL, foi utilizada a mesma carga resistiva anterior com a adição de uma carga indutiva em paralelo. Este indutor possui uma indutância de 15mH. A figura 16 exibe o circuito utilizado.

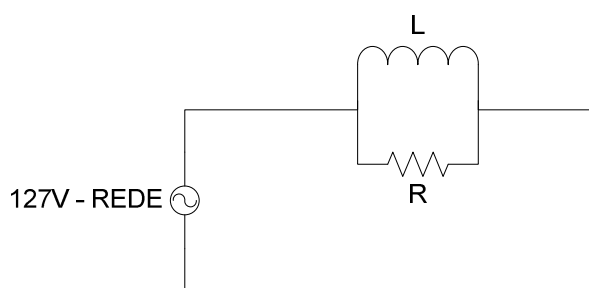


Figura 16 - Circuito monofásico - Carga RL
Fonte: Autoria própria

Com base nesse circuito, foram obtidos os resultados, para um ensaio de um minuto, conforme a tabela 11.

Tabela 11 - Resultados Monofásico - Carga RL

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	1326,67W	1,36KW
Potência reativa	2518,82VAr	2,31KVAr
Potência aparente	2656,736VA	2,68KVA
Fator de potência	0,499	0,51
Energia ativa	21,2748 Wh	0,023KWh
Energia reativa	42,2757 VArh	0,039KVArh

Fonte: Autoria própria

Com este ensaio foi possível comparar a energia reativa absorvida pelo sistema, a diferença se refere a flutuação de tensão presente na rede de energia elétrica.

4.3.1.3 Carga Não Linear

Para gerar altas quantidades de harmônicos, foi empregada uma carga não linear, utilizando uma ponte retificadora monofásica, da marca Semikron, modelo SKB 72/12. Na saída CC desta fonte foi adicionada uma capacitância de 156,77 μ F em paralelo com uma carga resistiva de 25 Ω . . A figura 17 apresenta o circuito utilizado.

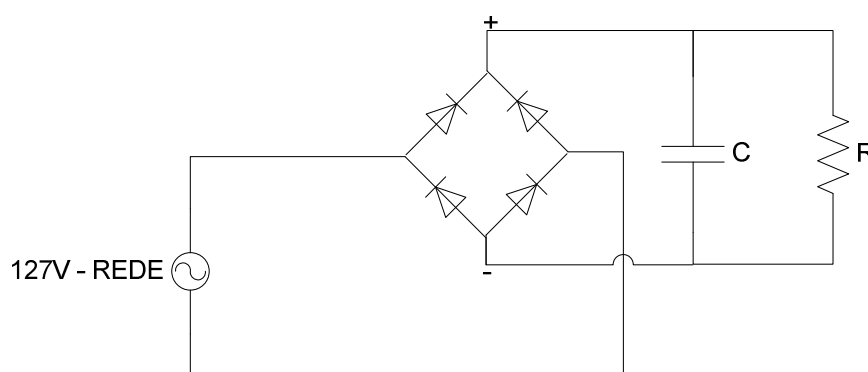


Figura 17 - Circuito monofásico - Carga não linear
Fonte: Aatoria própria

Com um ensaio de um minuto para este circuito, obteve-se os resultados apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Resultados Monofásico - Carga Não Linear

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	704,4727W	0,71KW
Potência reativa	378,252VAr	0,39KVAr
Potência aparente	893,9711VA	0,81KVA
Fator de potência	0,7880	0,78
Energia ativa	11,841 Wh	0,012KWh
Energia reativa	6,2979 VArh	0,007KVArh

Fonte: Aatoria própria

Como mencionado anteriormente, para esta carga, se tem um elevado THDi. Isto é comprovado observando-se a figura 30, no apêndice B, onde a THDi medido pelo Fluke é de 49,0%. O mesmo é confirmado quando se analisa os resultados do sistema embarcado, mostrados na tabela 22 do apêndice B, que é de 49,65%.

4.3.2 Circuito Trifásico a 3 Fios

4.3.2.1 Carga R

Para de testar o sistema embarcado para um circuito trifásico a 3 fios, foi realizado um ensaio utilizando uma carga resistiva. Foi adicionado quatro resistores de carga de 100Ω e $200W$ em paralelo, gerando uma carga de 25Ω , para cada fase. A figura 18 apresenta o circuito utilizado no ensaio.

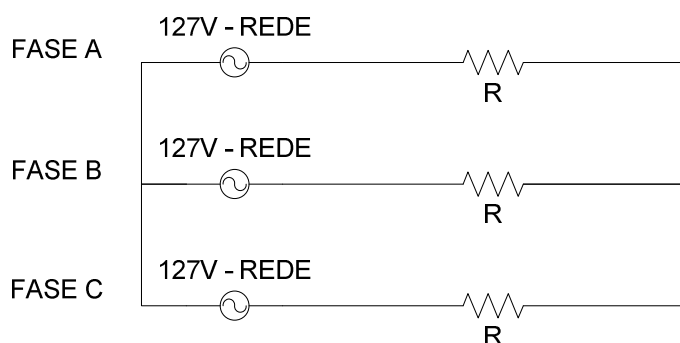


Figura 18 - Circuito trifásico 3 fios - Carga R
Fonte: Autoria própria

Realizando um ensaio para um minuto, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Resultados trifásico 3 fios - Carga R

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	1931,138W	1,94KW
Potência reativa	16,4667VAr	0,03KVAr
Potência aparente	1942,135VA	1,94KVA
Fator de potência	0,9943	1,00
Energia ativa	32,2634 Wh	0,033KWh
Energia reativa	0,2079 VArh	0,000KVArh

Fonte: Autoria própria

Por ser uma carga resistiva real, ela apresenta uma pequena indutância nos enrolamentos, tendo uma potência reativa muito baixa, não sendo possível comparar os resultados uma vez que o medidor Fluke trabalho com uma escala de KVArh

4.3.2.2 Carga Não Linear

Para gerar altas quantidades de harmônicos, foi empregada uma carga não linear. Para isto, foi utilizada uma ponte retificadora trifásica Semikron, modelo SKD 116/12-L75. Em sua saída CC foi utilizado o mesmo circuito no ensaio para carga não linear monofásica. A figura 19 mostra o circuito do ensaio.

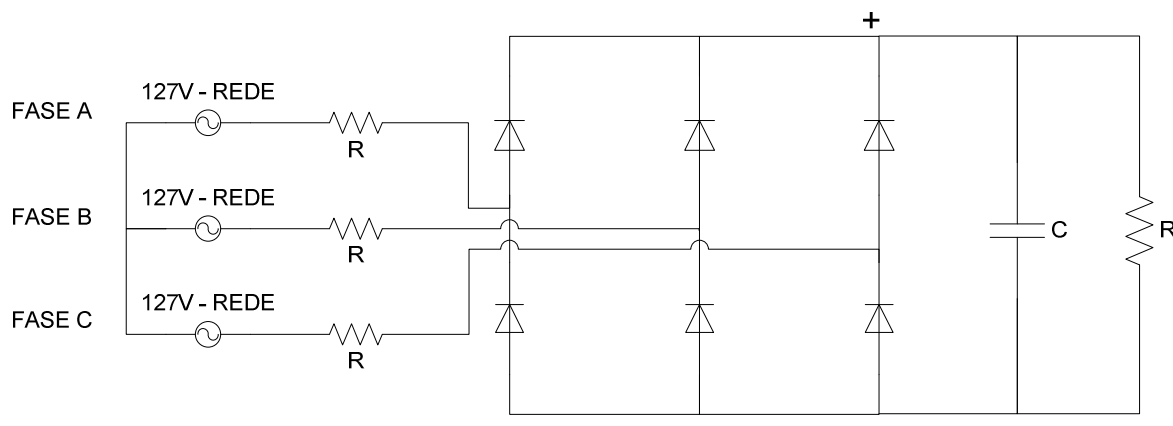


Figura 19 - Circuito trifásico 3 fios - Carga não linear
Fonte: Autoria própria

O sistema foi ensaiado para um tempo de um minuto., Os resultados são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Resultados trifásico 3 fios - Carga não linear

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	3549,106W	3,76KW
Potência reativa	422,6831VAr	0,38KVAr
Potência aparente	4153,668VA	3,77KVA
Fator de potência	0,8544	0,86
Energia ativa	59,5111 Wh	0,063KWh
Energia reativa	4,2573 VArh	0,006KVArh

Fonte: Autoria própria

Os resultados de THDi e potência reativa foram coerentes quando comparados aos obtidos com o medidor Fluke, mostrados no apêndice B na tabela 24.

4.3.3 Circuito Trifásico a 4 Fios

4.3.3.1 Carga R

Para o ensaio do sistema trifásico utilizando quatro fios, foi adicionado o neutro ao circuito trifásico utilizando 3 fios. O circuito ensaiado é mostrado na figura 20.

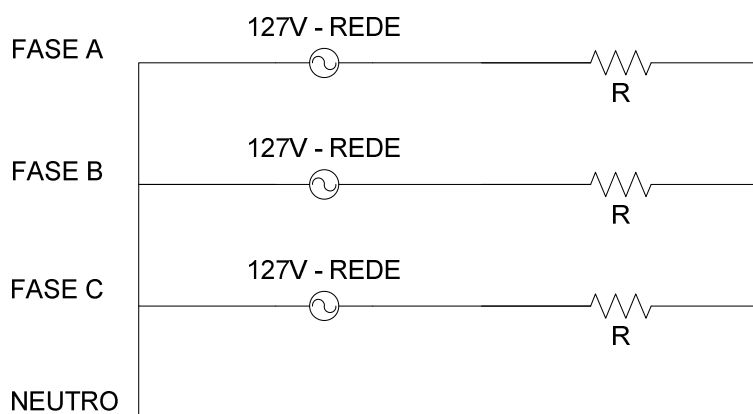


Figura 20 - Circuito trifásico 4 fios - Carga R
Fonte: Autoria própria

O circuito foi ensaiado durante um minuto. A tabela 15 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 15 - Resultados trifásico 4 fios - Carga R

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	1952,323W	1,97KW
Potência reativa	15,3529VAr	0,03KVAr
Potência aparente	1952,416VA	1,97KVA
Fator de potência	0,999	1,00
Energia ativa	32,4428 Wh	0,033KWh
Energia reativa	0,2375 VArh	0,001KVArh

Fonte: Autoria própria

Como nos ensaios com cargas resistivas anteriores, os valores de THD ficaram um pouco acima dos valores obtidos com o Fluke, estando estes resultados presentes na tabela 25 do apêndice B. Os valores de THDv e THDi obtidos com o sistema embarcado corresponderam a 3,8% e 4,5%, respectivamente, sendo que o Fluke forneceu o valor de 2,0% para ambos os valores de THD.

4.3.3.2 Carga RLC

Para o sistema desbalanceado, foram adicionadas cargas indutivas e capacitivas ao circuito. Na fase A, foi adicionado um indutor de 15 mH em paralelo a carga resistiva de 25Ω. Na fase B, uma capacitância de 480uF foi inserida em paralelo a carga resistiva de 25Ω, e na fase C, foi utilizada apenas a carga resistiva de 25Ω, gerando assim, um circuito desbalanceado. Segue, na figura 21, o circuito empregado no ensaio.

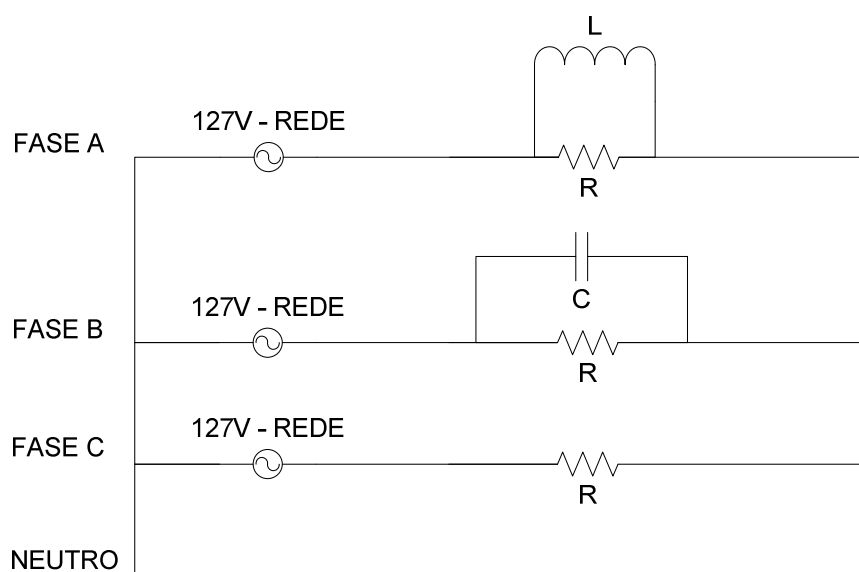


Figura 21 - Circuito trifásico 4 fios - Carga RLC
Fonte: Autoria própria

Seguindo o padrão dos testes anteriores, o circuito foi ensaiado para um tempo de um minuto. Segue, na tabela 16, os resultados obtidos.

Tabela 16 - Resultados trifásico 4 fios - Carga RLC

Variável	Sist. Embarcado	Fluke
Potência ativa	2667,737W	2,54KW
Potência reativa	352,4560VAr	0,34KVAr
Potência aparente	9353,601VA	6,35KVA
Fator de potência	0,285	0,40
Energia ativa	43,0347 Wh	0,043KWh
Energia reativa	5,9701 VArh	0,006KVArh

Fonte: Autoria própria

Com a adição do capacitor na fase B, foi detectado um valor de THDi através do medidor Fluke, que está mostrado na figura 42 do apêndice B. Este valor é similar ao resultado obtido com o sistema embarcado desenvolvido que está apresentado na tabela 26 do apêndice B. Entretanto, devido ao fato do medidor Fluke não implementar a norma IEEE 1459-2010, os resultados fornecidos por este equipamento diferirão dos fornecidos pelo sistema desenvolvido. O medidor Fluke utiliza a teoria clássica das potências. Assim, este calcula a potência aparente total, somando a potência aparente de cada fase, enquanto o sistema embarcado utiliza a equação (42), que incorpora o conceito de potência aparente efetiva. Dessa forma, a potência aparente fornecida pelo Fluke será diferente do valor calculado pelo sistema proposto. Da mesma forma, como a norma propõe o cálculo do fator de potência pela equação (50), este valor também será diferente.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de medição de energia que incorpora as novas definições apresentadas na norma IEEE 1459-2010. O sistema foi implementado em um *software* para PC e, posteriormente, foi portado para um processador digital de sinais (DSC).

Comparando-se os dados obtidos com o *software* desenvolvido com os dados da simulação realizada no MATLAB®, pode-se concluir que os resultados foram bastante satisfatórios. Com o uso do medidor de energia Fluke também permitiu-se ter uma boa noção do quão efetivo é o método proposto neste trabalho. Verificou-se que boa parte das grandezas calculadas aproximaram seus valores daqueles fornecidos pelo medidor Fluke.

Como já era de se esperar, os resultados da potência aparente e do fator de potência foram diferentes daqueles fornecidos pelo medidor Fluke, uma vez que este último não implementa a norma IEEE 1459-2010. Dessa forma, este trabalho serve como um ponto inicial para a implementação de medidores de energia ou de potência para os cenários onde a teoria clássica das potências não consegue descrever adequadamente o sistema. Naturalmente, o medidor desenvolvido necessita de uma maior maturação e diversas melhorias podem ser realizadas. Como sugestões para melhorias e trabalhos futuros, destaca-se as seguintes:

- Desenvolvimento de uma interface gráfica para o sistema embarcado;
- Aumento da taxa de amostragem;
- Estudos de precisão e de erros numéricos buscando a melhoria dos resultados fornecidos;
- Inclusão da determinação da frequência da rede para melhoria no desempenho do medidor quando sujeito a este tipo de perturbação.

6. REFERÊNCIAS

CARDOSO, Rafael. **Algoritmos para Sincronismo, Análise da Qualidade de Energia e Geração de Referências Para Filtros Ativos de Potência:Uma Abordagem Estocástica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, abr. 2008.

EEL, Edison Electric Institute. **Handbook for Electricity Metering**. Washington, D.C., 2002.

FILHO, Solon de Medeiros. **Medição de Energia Elétrica**. 3. ed. vol. 1. Recife: Guanabara Koogan S.A, 1976.

FTDI, Future Technology Devices International. **FT2232H Mini Module USB Hi-Speed FT2232H Evaluation Module Datasheet**. 2011.

IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement Of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. IEEE Std 1459-2010, New York, 2010.

INMETRO. Ensaio de Apreciação Técnica de Modelo Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica. *NIE-DIMEL- 036*. Maio de 2007.

INSTRUMENTS, Texas. **Data Manual DSCs TMS320F28335/28334/28332 e TMS320F28235/28234/28232**. 2008. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2012.

JCGM, Joint Committee for Guides in Metrology. **International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)**. 2008.

LEM. Datasheet - Current Transducer LA 55-P. 2013.

LEM. Datasheet Voltage Transducer LV 25-600. 2013.

LIMA, Eduardo Santos. **Protótipo de Tarifador Digital de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2007.

NETO, Daywes Pinheiro; et al.. Desempenho dos Medidores Monofásicos de Energia Elétrica dos Tipos Eletrônico e Indução. **Revista O Setor Elétrico**, Goiás, p. 124-129, abr. 2011.

NOKIA, Corporation. **Framework QT**. 2011. Disponível em: <<http://qt.nokia.com/>>. Acesso em: 28 out. 2011.

PÉREZ, Eric López. **Protocolo USB (UNIVERSAL SERIAL BUS)**. *I-Micro*. 2008. Disponível em: <<http://www.i-micro.com/pdf/articulos/usb.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2013.

RIZZI, Álvaro Pereira. Medidas Elétricas: potência, energia, fator de potência. **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.** Itajubá, 1. ed. v. 1, 1980.

RODRIGUES, José Eduardo. **Interferência de harmônicos em equipamentos de medição de energia elétrica**. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, jun. 2009.

SANTOLIN, Lucas. **Desenvolvimento de Um Sistema de Aquisição e Processamento de Dados com Conexão USB**. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Pato Branco, 2011.

WILL, Newton Carlos. **Desenvolvimento de um Sistema para Análise de Qualidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2012.

WILLEMS, Jacques L. **The IEEE Standard 1459: What and Why?** 6 p. Ghent University, Ghent, 2010.

ZELENOVSKY, Ricardo; MENDONÇA, Alexandre. **COMPUTADOR: Um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2006.

APÊNDICE A - Resultados de Simulação

Resultados para o Sistema Monofásico

A tabela 17 apresenta os resultados referentes a simulação monofásica apresentada na figura 9.

Tabela 17 - Resultados circuito monofásico

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Corrente RMS	$I = 5,0415 \text{ A}$
Tensão RMS	$V = 129,2396 \text{ V}$
Tensão fundamental RMS	$V_1 = 126,9939 \text{ V}$
Corrente fundamental RMS	$I_1 = 50068 \text{ A}$
Corrente harmônica RMS	$I_h = 0,5907 \text{ A}$
Tensão harmônica RMS	$V_h = 23,9879 \text{ V}$
Potência ativa	$P = 635,4055 \text{ W}$
Potência ativa - fundamental	$P_1 = 635,4055 \text{ W}$
Potência ativa - harmônica	$P_h = 8,7286 \text{ W}$
Potência aparente	$S = 651,6492 \text{ VA}$
Potência aparente - fundamental	$S_1 = 635,9157 \text{ VA}$
Potência aparente harmônica	$S_h = 14,1714 \text{ VA}$
Potência aparente não fundamental	$S_n = 142,3303 \text{ VA}$
Potência reativa	$Q = 118,5141 \text{ VAR}$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 10,8360 \text{ VAR}$
Potência reativa - fundamental	$Q_1 = 118,5141 \text{ VAR}$
Potência não ativa	$N = 144,5910 \text{ VAR}$
Fator de potência	$FP = 0,9751$
Fator de potência fundamental	$FP_1 = 0,9855$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 18,89\%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 11,80\%$

Fonte: Autoria própria

Resultados Sistema Trifásico a Três Fios

A tabela 18 apresenta os resultados referentes a todas as variáveis calculadas na simulação realizada para o circuito trifásico a três fios, representado na figura 10.

Tabela 18 - Resultados circuito trifásico a três fios

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_{ab} = 220,7352 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{ab1} = 219,9682 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{abh} = 18,4041 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_{bc} = 220,9995 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{bc1} = 220,2859 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bch} = 18,3842 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_{ca} = 220,9795 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{ca1} = 220,2186 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{cah} = 18,3761 V$
Corrente - fase A	$I_a = 4,0354 A$
Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 4,0073 A$
Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 0,47589 A$
Corrente - fase B	$I_b = 5,2657 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 5,2609 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 0,24923 A$
Corrente - fase C	$I_c = 5,5724 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 5,5664 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 0,27744 A$
Tensão efetiva	$V_e = 127,5394 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 127,1081 V$
Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 10,6164 V$
Corrente efetiva	$I_e = 5,0022 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 4,9907 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 0,34907 A$
Potência ativa	$P = 1879,5546 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 1869,19 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 9,1432 W$
Potência reativa	$Q = 102,9002 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 99,7512 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 3,149 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 1914,1695 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 1903,3173 VA$

Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 11,1192 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 203,5391 VA$
Potência não ativa	$N = 377,9079 VAR$
Fator de potência	$PF = 0,98035$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,98154$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 8,35\%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 6,99\%$

Fonte: A autoria própria

Resultados Sistema Trifásico a Quatro Fios

A tabela 19 apresenta os resultados para o sistema trifásico a quatro fios da figura 11.

Tabela 19 - Resultados circuito trifásico a quatro fios

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_a = 129.2396 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{a1} = 126.9838 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{ah} = 23,9878 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_b = 129,251 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{b1} = 127.0341 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bh} = 23,9669 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_c = 129,529 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{c1} = 127,3176 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{ch} = 23,9757 V$
Corrente - fase A	$I_a = 5.1696 A$
Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 5.0798 A$
Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 0.95951 A$
Corrente - fase B	$I_b = 4.7396 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 4.7065 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 0.556945 A$
Corrente - fase C	$I_c = 5,0473 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 4,9572 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 0,95665 A$
Corrente RMS - Neutro	$I_n = 3,6805 A$
Corrente RMS fundamental - Neutro	$I_{n1} = 3,012 A$
Corrente RMS harmônicas - Neutro	$I_{nh} = 2,1146 A$
Tensão efetiva	$V_e = 128,4428 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 127,1884 V$

Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 18,5408 V$
Corrente efetiva	$I_e = 5,4225 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 5,2154 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 1,4868 A$
Potência ativa	$P = 1866,5789 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 1813,1598 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 53,995 W$
Potência reativa	$Q = 90,0954 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 81,009 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 9.0865 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 2089,7117 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 1990,275 VA$
Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 82,7099 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 636,9462 VA$
Potência não ativa	$N = 939,5627 VAr$
Fator de potência	$PF = 0,89322$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,91101$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 14,57 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 28,50 \%$

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B - Resultados Experimentais do Sistema Embarcado Desenvolvido

Resultados Sistema Monofásico com Carga R

A tabela 20 apresenta os resultados referentes ao ensaio monofásico com carga resistiva, sendo o circuito apresentado na figura 15.

Tabela 20 - Resultados Monofásico - Carga R

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Corrente RMS	$I = 5,2742 \text{ A}$
Tensão RMS	$V = 126,0674 \text{ V}$
Tensão fundamental RMS	$V_1 = 125,9292 \text{ V}$
Corrente fundamental RMS	$I_1 = 5,2569 \text{ A}$
Corrente harmônica RMS	$I_h = 0,470 \text{ A}$
Tensão harmônica RMS	$V_h = 5,902 \text{ V}$
Potência ativa	$P = 663,8652 \text{ W}$
Potência ativa - fundamental	$P_1 = 661,9988 \text{ W}$
Potência ativa - harmônica	$P_h = 1,8664 \text{ W}$
Potência aparente	$S = 664,91 \text{ VA}$
Potência aparente - fundamental	$S_1 = 661,9999 \text{ VA}$
Potência aparente harmônica	$S_h = 2,5207 \text{ VA}$
Potência aparente não fundamental	$S_n = 62,13997 \text{ VA}$
Potência reativa	$Q = 1,5431 \text{ VAR}$
Potência reativa - fundamental	$Q_1 = 1,0488 \text{ VAR}$
Potência reativa - harmônica	$Q_h = 0,4943 \text{ VAR}$
Potência não ativa	$N = 37,2588 \text{ VAR}$
Fator de potência	$FP = 0,9984$
Fator de potência fundamental	$FP_1 = 0,9995$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 4,6 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 8,1 \%$
Energia Ativa	$Wh = 11,3009 \text{ Wh}$
Energia Reativa	$VAh = 0,1572 \text{ VARh}$

Demanda

W = 675,8025 W

Fonte: Autoria própria

O circuito foi analisado utilizando o medidor Fluke, para a comparação com o sistema desenvolvido. Os resultados são apresentados nas figuras 22, 23, 24 e 25.

Potência e Energia		
FUND		0:01:57
A		Total
kW	0.67	0.67
kVA	0.67	0.67
kVAR	0.01	0.01
PF	1.00	1.00
DPF	1.00	1.00
kWh	0.011	0.011
kVAh	0.011	0.011
kVARh	0.000	0.000
START 01/17/03 01:07:19		0:01:00
PULSE CNT	CLOSE ENERGY	MANUAL COUNT +1
ON OFF		RESET ENERGY

Figura 22 - Potências e Energias - Monofásico - Carga R - FLUKE

Fonte: Autoria própria

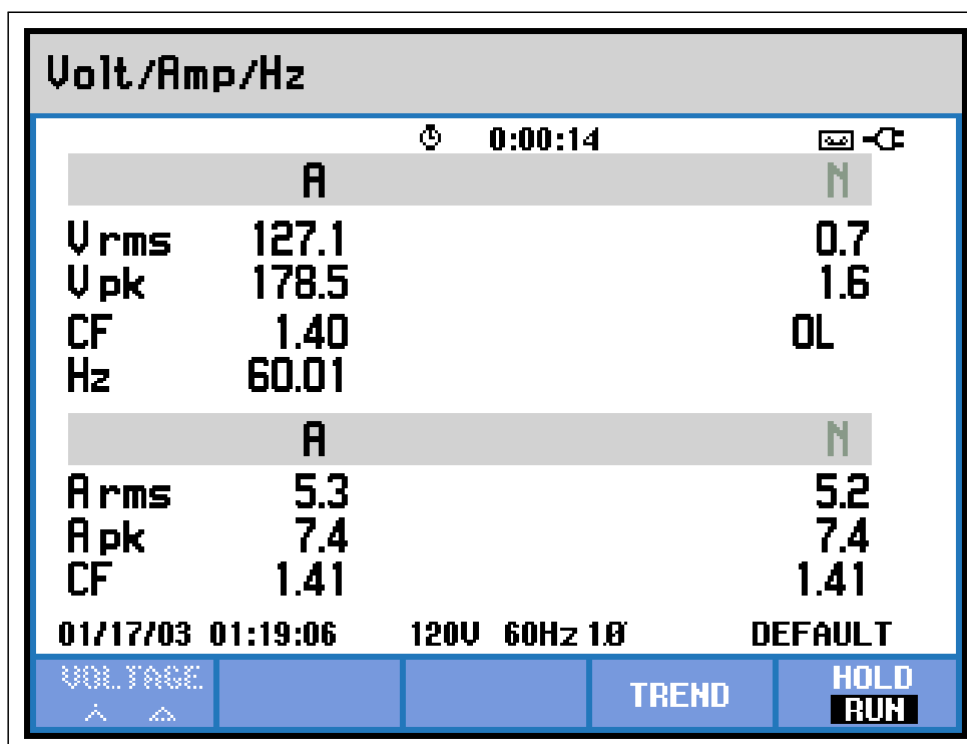


Figura 23 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga R - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

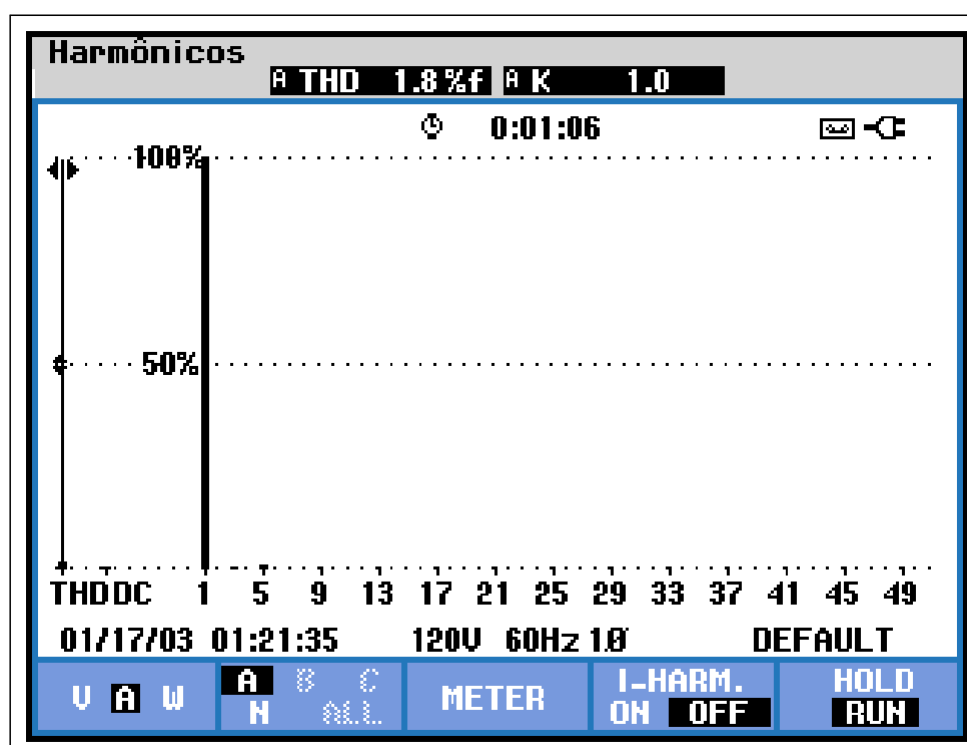


Figura 24 - THDi - Monofásico - Carga R - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

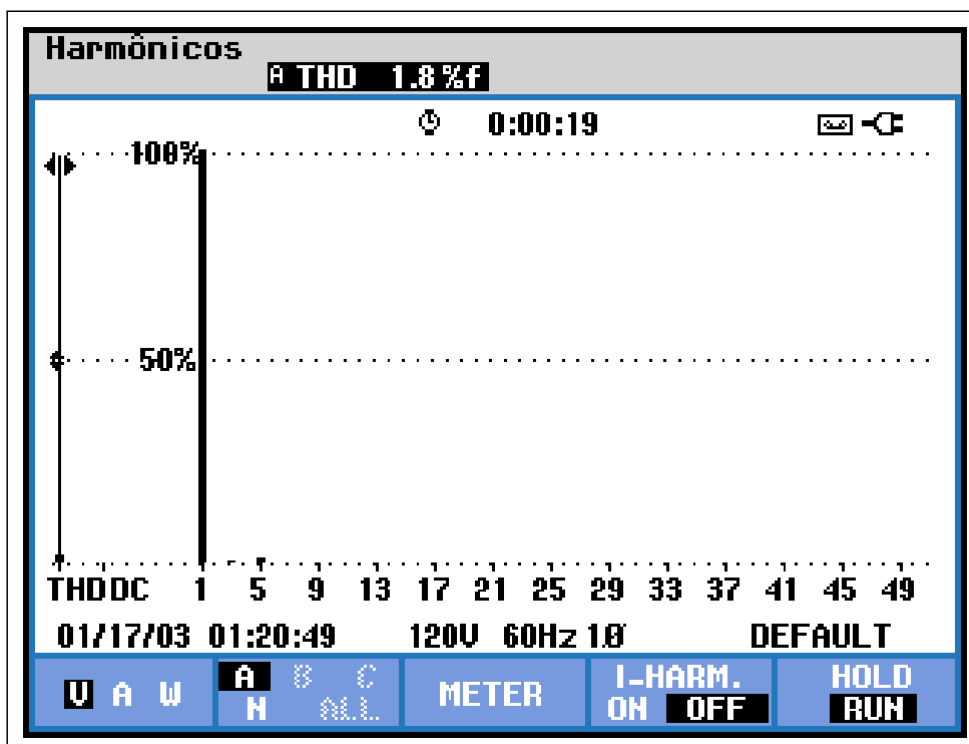


Figura 25 - THDv - Monofásico - Carga R - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

Resultados Sistema Monofásico com Carga RL

Para o ensaio monofásico com carga resistiva e indutiva, mostrado na figura 16, os resultados com todas as variáveis calculadas pelo sistema embarcado estão apresentados na tabela 21.

Tabela 21 - Resultados Monofásico - Carga RL

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Corrente RMS	$I = 22,1395 A$
Tensão RMS	$V = 119,9211 V$
Tensão fundamental RMS	$V_1 = 119,7478 V$
Corrente fundamental RMS	$I_1 = 22,1498 A$
Corrente harmônica RMS	$I_h = 0,8003 A$
Tensão harmônica RMS	$V_h = 6,4447 V$
Potência ativa	$P = 1326,67 W$
Potência ativa - fundamental	$P_1 = 1322,206 W$
Potência ativa - harmônica	$P_h = 4,4685 W$

Potência aparente	$S = 2656,736 \text{ VA}$
Potência aparente - fundamental	$S_1 = 2651,163 \text{ VA}$
Potência aparente harmônica	$S_h = 5,159 \text{ VA}$
Potência aparente não fundamental	$S_n = 171,984 \text{ VA}$
Potência reativa	$Q = 2518,82 \text{ VAr}$
Potência reativa - fundamental	$Q_1 = 5414,969 \text{ VAr}$
Potência reativa - harmônica	$Q_h = 3,8506 \text{ VAr}$
Potência não ativa	$N = 2301,777 \text{ VAr}$
Fator de potência	$FP = 0,499$
Fator de potência fundamental	$FP_1 = 0,94887$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 5,38 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 3,6 \%$
Energia Ativa	$Wh = 21,2748 \text{ Wh}$
Energia Reativa	$VArh = 42,2757 \text{ VArh}$
Demanda	$W = 1272,194 \text{ W}$

Fonte: Autoria própria

As figuras 26 e 27 apresentam os dados obtidos com o FLUKE, sendo que esses dados foram utilizados para a comparação com sistema embarcado.

Potência e Energia			
FUND		0:01:05	
	A		Total
kW	1.36		1.36
kVA	2.68		2.68
kVAR	2.31		2.31
PF	0.51		0.51
DPF	0.51		0.51
kWh	0.023		0.023
kVAh	0.045		0.045
kVARh	0.039		0.039
START 01/19/03 02:54:48		0:01:00	
PULSE CNT		CLOSE ENERGY	MANUAL COUNT ↑
ON OFF			RESET ENERGY

Figura 26 - Potências e Energias - Monofásico - Carga RL - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

Volt/Amp/Hz			
		0:00:03	
	A		N
V _{rms}	120.8		56.9
V _{pk}	167.6		79.6
CF	1.39		1.40
Hz	59.97		
	A		N
A _{rms}	22.2		22.1
A _{pk}	31.7		31.5
CF	1.43		1.43
01/19/03 02:59:28		120V 60Hz 1Ø	DEFAULT
VOLTAGE		TREND	HOLD RUN
↑ ↑			

Figura 27 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga RL - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

Resultados Sistema Monofásico com Carga Não Linear

Os resultados apresentados na tabela 22 são referentes ao sistema monofásico com uma carga não linear, mostrado na figura 17.

Tabela 22 - Resultados Monofásico - Carga Não Linear

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Corrente RMS	$I = 7,1897 A$
Tensão RMS	$V = 124,3396 V$
Tensão fundamental RMS	$V_1 = 124,1601 V$
Corrente fundamental RMS	$I_1 = 6,4350 A$
Corrente harmônica RMS	$I_h = 3,1976 A$
Tensão harmônica RMS	$V_h = 6,6788 V$
Potência ativa	$P = 704,4727 W$
Potência ativa - fundamental	$P_1 = 706,4074 W$
Potência ativa - harmônica	$P_h = 1,93 W$
Potência aparente	$S = 893,9711 VA$
Potência aparente - fundamental	$S_1 = 799,5302 VA$
Potência aparente harmônica	$S_h = 21,3967 VA$
Potência aparente não fundamental	$S_n = 399,9196 VA$
Potência reativa	$Q = 378,252 VAr$
Potência reativa - fundamental	$Q_1 = 372,3214 VAr$
Potência reativa - harmônica	$Q_h = 5,9306 VAr$
Potência não ativa	$N = 550,3657 VAr$
Fator de potência	$FP = 0,7880$
Fator de potência fundamental	$FP_1 = 0,8835$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 5,3 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 4,96 \%$
Energia Ativa	$Wh = 11,841 Wh$
Energia Reativa	$VArh = 6,2979 VArh$
Demanda	$W = 705,7629 W$

Fonte: Autoria própria

Com a alta presença de harmônicos de corrente para esta carga, observa-se um elevado THDi. Este efeito pode ser comprovado pelas figuras 28, 29 e 30, que apresentam as medições realizadas com o Fluke.

Potência e Energia				
FUND		0:02:33		
	A		Total	
kW	0.71		0.71	
kVA	0.81		0.81	
kVAR	÷ 0.39		÷ 0.39	
PF	0.78		0.78	
DPF	0.88		0.88	
kWh	0.012		0.012	
kVAh	0.014		0.014	
kVARh	÷0.007		÷0.007	
START 01/19/03 22:50:58		0:01:00		
PULSE CNT		CLOSE ENERGY	MANUAL COUNT+1	RESET ENERGY
ON OFF				

Figura 28 - Potências e Energias - Monofásico - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

Volt/Amp/Hz				
		0:00:04		
	A		N	
V _{rms}	126.0		0.9	
V _{pk}	175.3		2.7	
CF	1.39		OL	
Hz	59.99			
	A		N	
A _{rms}	7.2		7.2	
A _{pk}	14.4		14.3	
CF	2.00		1.99	
01/19/03 22:52:08		120V 60Hz 1Ø	DEFAULT	
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN
^ ^				

Figura 29 - Tensões e Correntes - Monofásico - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

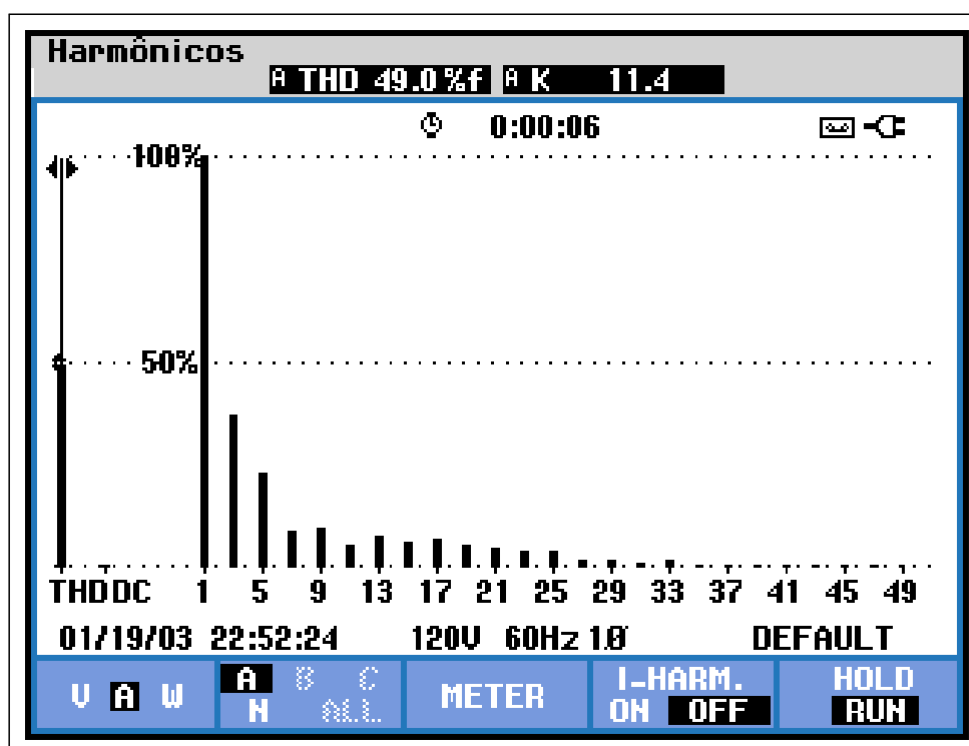


Figura 30 - THDi - Monofásico - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

Resultados do Sistema Trifásico a Três Fios com Carga R

Para os resultados com o sistema trifásico a três fios, foi inicialmente alimentada uma carga resistiva, apresentada na figura 18, sendo que os resultados estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Resultados trifásico 3 fios - Carga R

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_{ab} = 215,5006 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{ab1} = 215,9211 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{abh} = 5,8540 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_{bc} = 219,9211 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{bc1} = 219,8645 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bch} = 4,9870 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_{ca} = 215,8539 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{ca1} = 215,7841 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{cah} = 5,4918 V$
Corrente - fase A	$I_a = 5,0788 A$

Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 5,0731 A$
Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 0,2385 A$
Corrente - fase B	$I_b = 5,1938 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 5,1917 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 0,1492 A$
Corrente - fase C	$I_c = 5,2206 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 5,2152 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 0,2385 A$
Tensão efetiva	$V_e = 125,3434 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 125,3038 V$
Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 3,1499 V$
Corrente efetiva	$I_e = 5,1648 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 5,1604 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 0,2134 A$
Potência ativa	$P = 1931,138 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 1928,6127 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 2,5253 W$
Potência reativa	$Q = 16,4667 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 16,7545 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 0,2878 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 1942,135 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 1939,864 VA$
Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 2,0168 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 93,90 VA$
Potência não ativa	$N = 206,3856 VAr$
Fator de potência	$PF = 0,09943$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,9942$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 2,51 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 4,13 \%$
Energia Ativa	$Wh = 32,2634 Wh$
Energia Reativa	$VArh = 0,2079 VArh$
Demanda	$W = 1922,521 W$

Fonte: Autoria própria

Como realizado nos ensaios anteriores, para comparação, os resultados do medidor Fluke, estão mostrados nas figuras 31, 32 e 33.

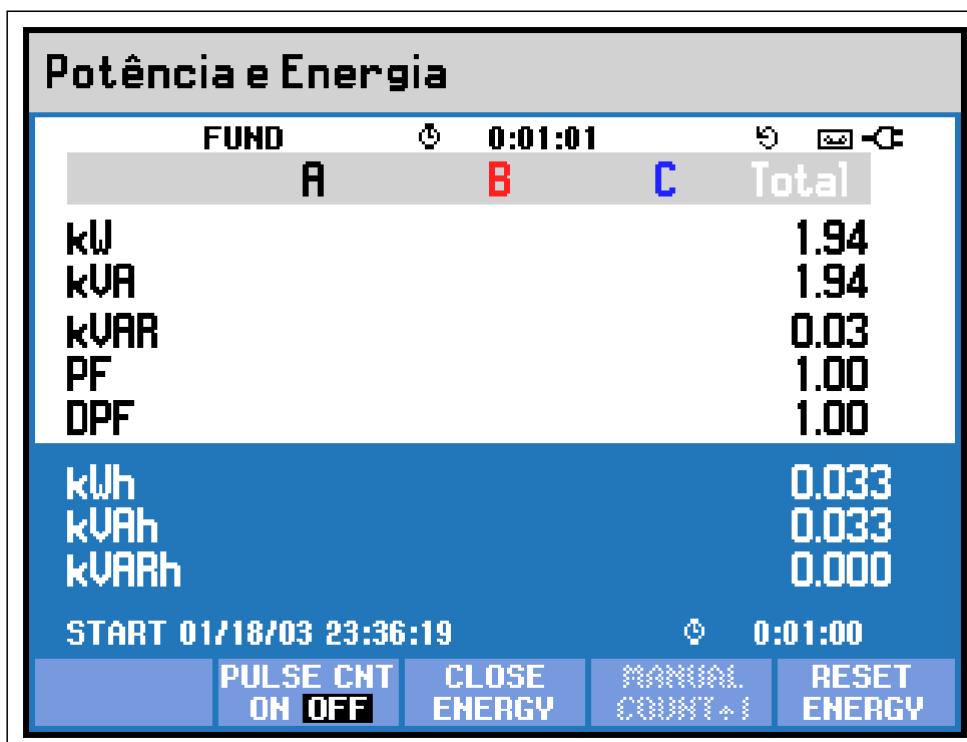


Figura 31 - Potências e Energias - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE
Fonte: Autoria própria

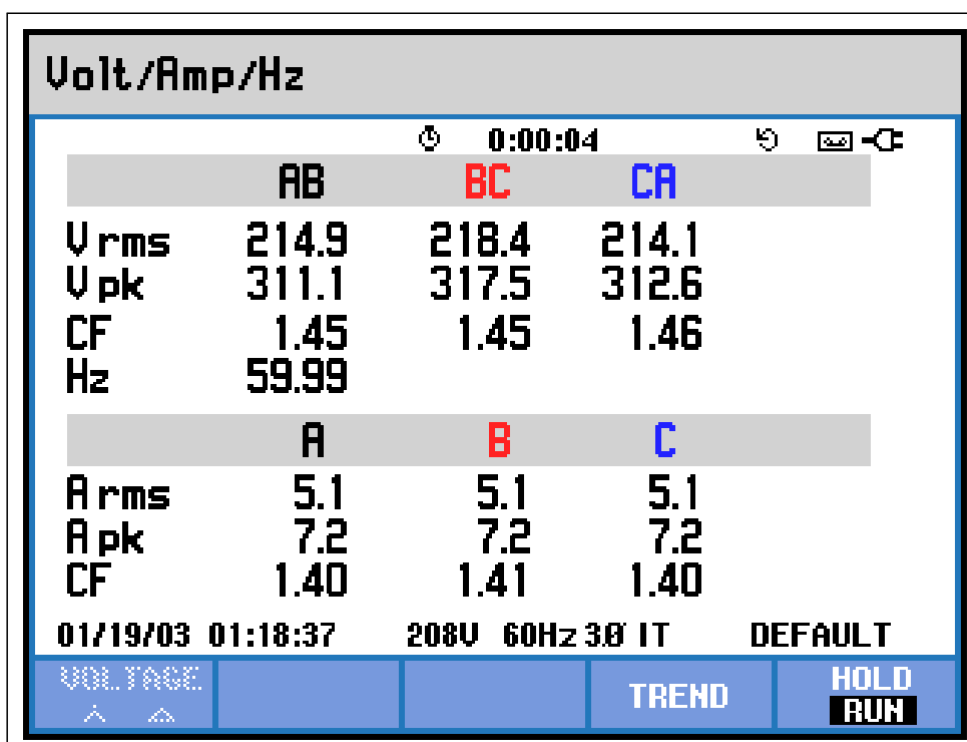


Figura 32 - Tensões e Correntes - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE
Fonte: Autoria própria

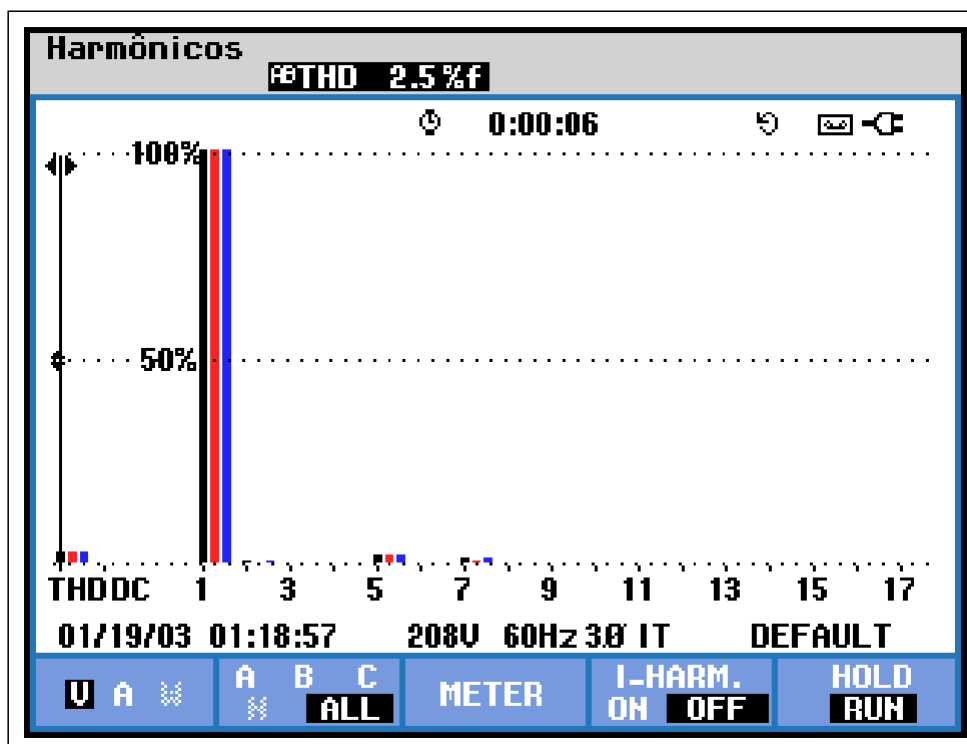


Figura 33 - THDv - Trifásico 3 fios - Carga R - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

Resultados do Sistema Trifásico a Três Fios com Carga Não Linear

Um segundo ensaio com o sistema trifásico a três fios considerando uma carga não linear foi realizado, sendo o circuito apresentado na figura 19. Os valores obtidos no ensaio estão mostrados na tabela 24 .

Tabela 24 - Resultados trifásico 3 fios - Carga não linear

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_{ab} = 217,1091 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{ab1} = 216,9485 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{abh} = 8,3495 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_{bc} = 221,5834 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{bc1} = 221,471 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bch} = 7,055 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_{ca} = 217,8646 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{ca1} = 217,7866 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{cah} = 5,8319 V$
Corrente - fase A	$I_a = 10,8684 A$
Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 9,3492 A$
Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 5,5421 A$

Corrente - fase B	$I_b = 11,0246 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 9,4732 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 5,6392 A$
Corrente - fase C	$I_c = 11,1681 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 9,7359 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 5,4716 A$
Tensão efetiva	$V_e = 125,9931 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 125,9258 V$
Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 4,1179 V$
Corrente efetiva	$I_e = 10,9891 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 9,4932 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 5,5353 A$
Potência ativa	$P = 3549,106 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 3569,171 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 20,0654 W$
Potência reativa	$Q = 422,6831 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 358,855 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 63,8280 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 4153,668 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 3586,325 VA$
Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 68,38213 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 2095,527 VA$
Potência não ativa	$N = 2256,622 VAr$
Fator de potência	$PF = 0,8544$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,9952$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 3,27 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 5,83 \%$
Energia Ativa	$Wh = 59,5111 Wh$
Energia Reativa	$VArh = 4,2573 VArh$
Demanda	$W = 3558,838 W$

Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentam uma elevada taxa de distorção harmônica presente na corrente do sistema, e também um valor de potência reativa possível de ser comparada com os valores do Fluke. Segue nas figuras 34, 35 e 36 os valores obtidos.

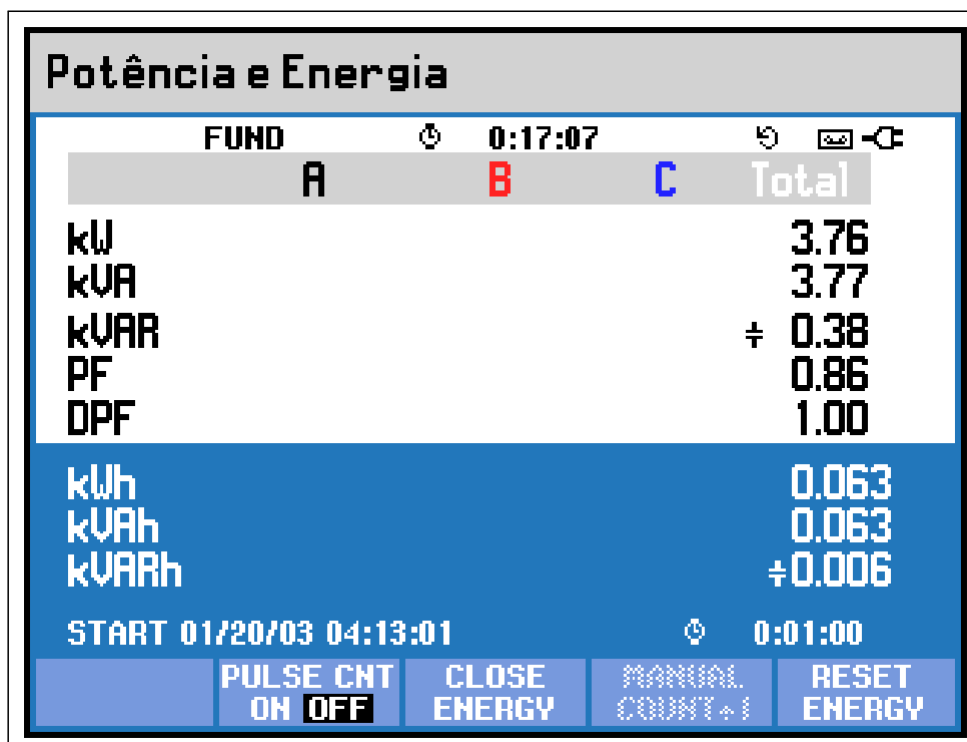


Figura 34 - Potências e Energias - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

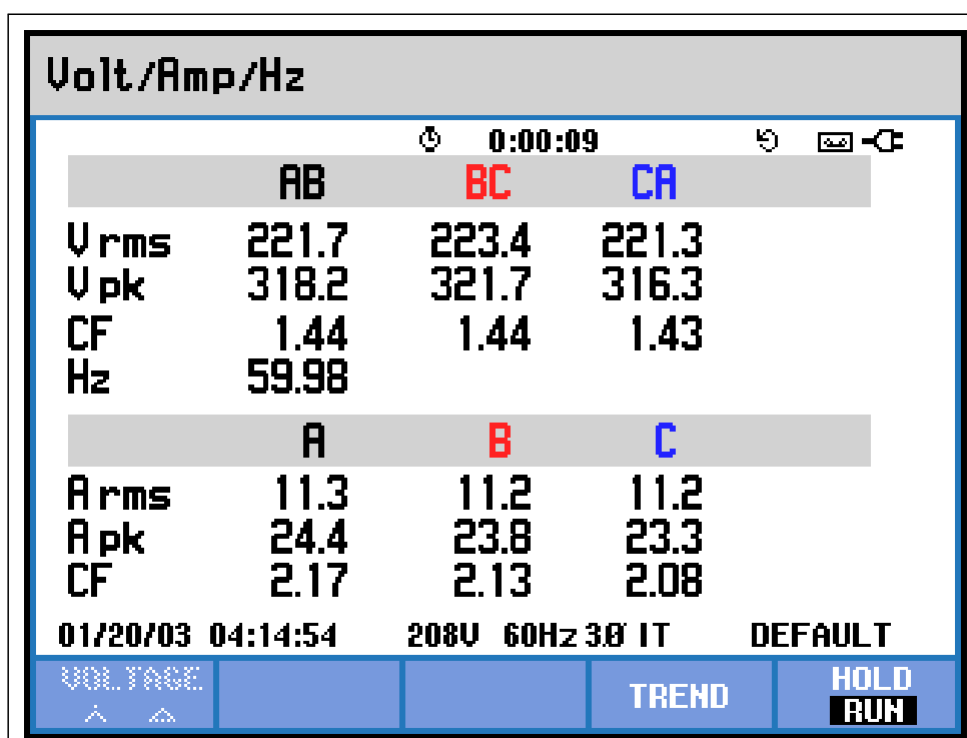


Figura 35 - Tensões e Correntes - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

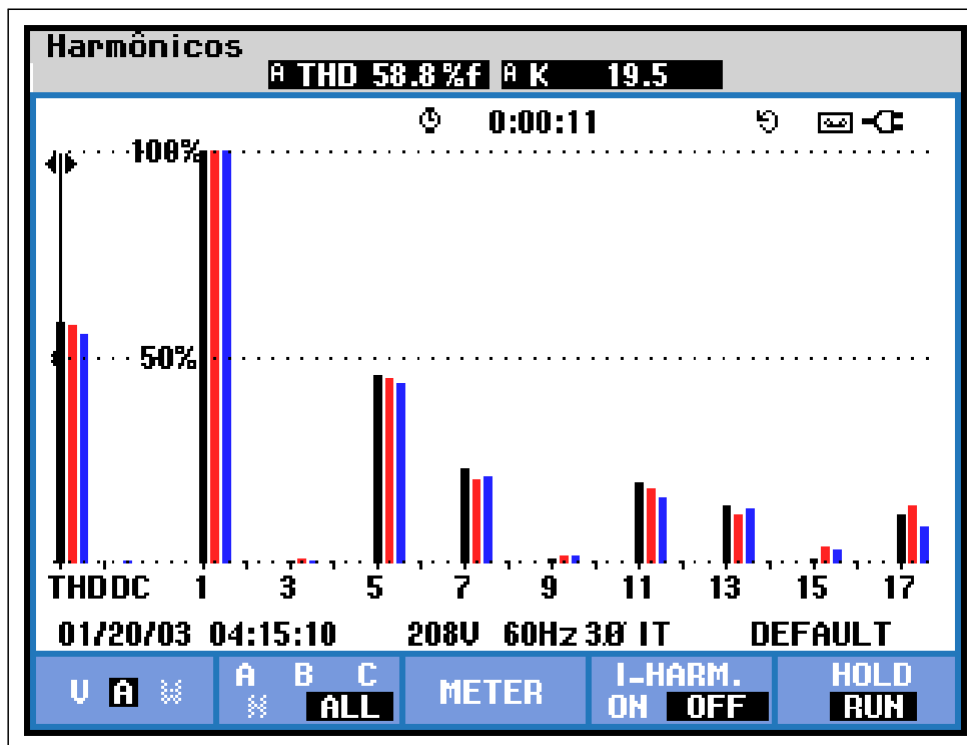


Figura 36 - THDi - Trifásico 3 fios - Carga não linear - FLUKE
Fonte: Autoria própria

Resultados do Sistema Trifásico a Quatro Fios com Carga R

Com o sistema trifásico a três fios montado, foi adicionado o neutro ao sistema, tornando o sistema a operar a quatro fios. Uma carga resistiva foi utilizada, apresentada na figura 20, tendo os resultados apresentados na tabela 25.

Tabela 25 - Resultados trifásico 4 fios - Carga R

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_a = 123,2301 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{a1} = 123,1038 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{ah} = 5,5777 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_b = 125,4705 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{b1} = 125,3287 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bh} = 5,9630 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_c = 126,2006 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{c1} = 125,9891 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{ch} = 7,3040 V$
Corrente - fase A	$I_a = 5,1166 A$
Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 5,1143 A$
Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 0,1546 A$

Corrente - fase B	$I_b = 5,2250 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 5,2218 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 0,1839 A$
Corrente - fase C	$I_c = 5,2820 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 5,2766 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 0,24 A$
Corrente RMS - Neutro	$I_n = 0,2439 A$
Corrente RMS fundamental - Neutro	$I_{n1} = 0,0664 A$
Corrente RMS harmônicas - Neutro	$I_{nh} = 0,2346 A$
Tensão efetiva	$V_e = 124,9075 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 124,8131 V$
Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 4,8549 V$
Corrente efetiva	$I_e = 5,2102 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 5,2048 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 0,2383 A$
Potência ativa	$P = 1952,323 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 1948,759 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 3,5639 W$
Potência reativa	$Q = 15,3529 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 14,9284 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 0,4235 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 1952,416 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 1948,897 VA$
Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 3,4719 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 117,158 VA$
Potência não ativa	$N = 73,22055 VAr$
Fator de potência	$PF = 0,999$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,999$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 3,8 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 4,5 \%$
Energia Ativa	$Wh = 32,4428 Wh$
Energia Reativa	$VArh = 0,2375 VArh$
Demanda	$W = 1940,113 W$

Fonte: Autoria própria

Os resultados do medidor Fluke estão apresentados nas figuras 37, 38 e

Potência e Energia				
FUND 0:01:00				
	A	B	C	Total
kW	0.65	0.66	0.65	1.97
kVA	0.65	0.66	0.65	1.97
kVAR	0.01	0.01	0.01	0.03
PF	1.00	1.00	1.00	1.00
DPF	1.00	1.00	1.00	1.00
kWh	0.011	0.011	0.011	0.033
kVAh	0.011	0.011	0.011	0.033
kVARh	0.000	0.000	0.000	0.001
START 01/22/03 20:34:39			0:01:00	
PULSE CNT ON OFF		CLOSE ENERGY		MANUAL COUNT+1
				RESET ENERGY

Figura 37 - Potências e Energias - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE
Fonte: Autoria própria

Volt/Amp/Hz				
0:00:03				
	A	B	C	N
U _{rms}	125.1	127.1	125.8	0.6
U _{pk}	173.7	177.2	175.4	1.3
CF	1.39	1.39	1.39	OL
Hz	59.98			
	A	B	C	N
I _{rms}	5.2	5.2	5.2	0.1
I _{pk}	7.3	7.3	7.4	0.4
CF	1.40	1.41	1.42	OL
01/22/03 20:35:51 120V 60Hz 3Ø WYE DEFAULT				
VOLTAGE ▲ ▲		TREND		HOLD RUN

Figura 38 - Tensões e Correntes - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE
Fonte: Autoria própria

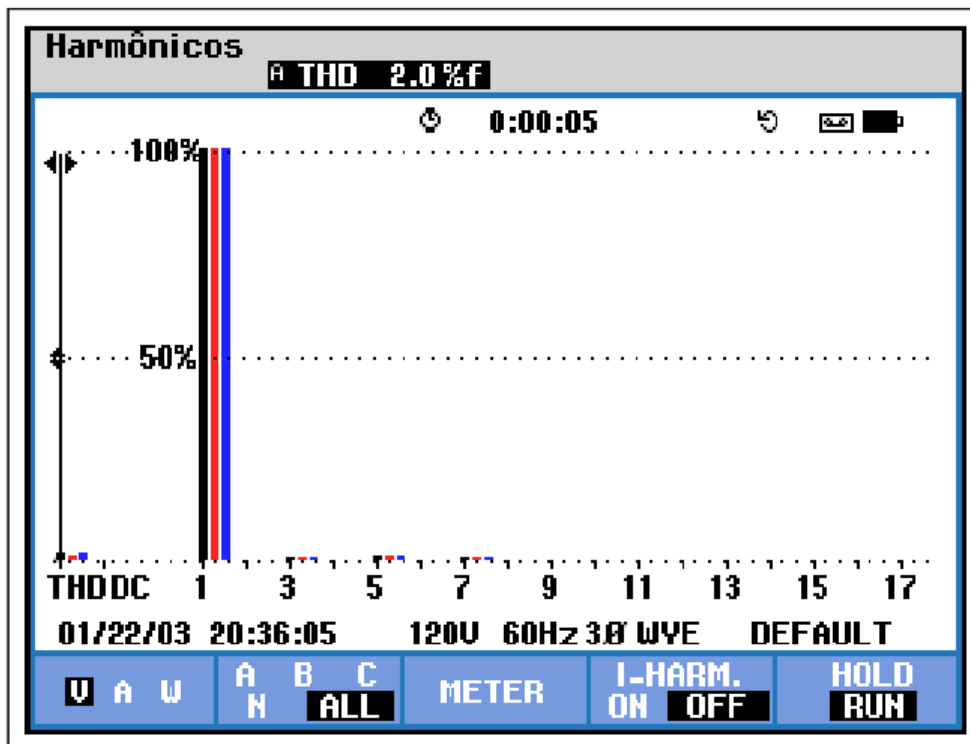


Figura 39 - THDv - Trifásico 4 fios - Carga R - FLUKE
 Fonte: Autoria própria

Resultados do Sistema Trifásico a Quatro Fios com Carga RLC

Aproveitando a carga resistiva montada, foi adicionada na sua fase A uma carga indutiva em paralelo a resistiva, na fase B uma carga capacitiva em paralelo a resistiva e na fase C foi mantida apenas a carga resistiva. O circuito é o mesmo apresentado na figura 21. Os resultados estão apresentados na tabela 26.

Tabela 26 - Resultados trifásico 4 fios - Carga RLC

VARIÁVEIS	PARÂMETROS OBTIDOS
Tensão RMS fase A - fase B	$V_a = 122,2903 V$
Tensão fundamental RMS fase A - fase B	$V_{a1} = 122,2451 V$
Tensão harmônica RMS fase A - fase B	$V_{ah} = 3,3228 V$
Tensão RMS fase B - fase C	$V_b = 126,4214 V$
Tensão fundamental RMS fase B - fase C	$V_{b1} = 126,3816 V$
Tensão harmônica RMS fase B - fase C	$V_{bh} = 3,1715 V$
Tensão RMS fase C - fase A	$V_c = 129,3085 V$
Tensão fundamental RMS fase C - fase A	$V_{c1} = 129,2245 V$
Tensão harmônica RMS fase C - fase A	$V_{ch} = 4,660 V$
Corrente - fase A	$I_a = 22,5243 A$
Corrente fundamental - fase A	$I_{a1} = 22,5211 A$

Corrente harmônica - fase A	$I_{ah} = 0,3801 A$
Corrente - fase B	$I_b = 22,9538 A$
Corrente fundamental - fase B	$I_{b1} = 22,7416 A$
Corrente harmônica - fase B	$I_{bh} = 3,114 A$
Corrente - fase C	$I_c = 5,6979 A$
Corrente fundamental - fase C	$I_{c1} = 5,6806 A$
Corrente harmônica - fase C	$I_{ch} = 0,4428 A$
Corrente RMS - Neutro	$I_n = 27,3820 A$
Corrente RMS fundamental - Neutro	$I_{n1} = 26,8688 A$
Corrente RMS harmônicas - Neutro	$I_{nh} = 5,328 A$
Tensão efetiva	$V_e = 126,689 V$
Tensão efetiva fundamental	$V_{e1} = 126,6362 V$
Tensão efetiva harmônica	$V_{eh} = 3,6550 V$
Corrente efetiva	$I_e = 24,6104 A$
Corrente efetiva fundamental	$I_{e1} = 24,3487 A$
Corrente efetiva harmônica	$I_{eh} = 3,5793 A$
Potência ativa	$P = 2667,737 W$
Potência ativa fundamental	$P_1 = 2663,674 W$
Potência ativa harmônica	$P_h = 4,0625 W$
Potência reativa	$Q = 352,4560 VAr$
Potência reativa fundamental	$Q_1 = 350,2543 VAr$
Potência reativa harmônica	$Q_h = 2,2017 VAr$
Potência aparente efetiva	$S_e = 9353,601 VA$
Potência aparente efetiva fundamental	$S_{e1} = 9250,287 VA$
Potência aparente efetiva harmônica	$S_{eh} = 39,2548 VA$
Potência efetiva não fundamental	$S_{eN} = 1386,374 VA$
Potência não ativa	$N = 8965,102 VAr$
Fator de potência	$PF = 0,285$
Fator de potência fundamental	$PF_1 = 0,287$
Taxa de distorção harmônica de tensão	$THD_v = 2,88 \%$
Taxa de distorção harmônica de corrente	$THD_i = 14,7 \%$
Energia Ativa	$Wh = 43,0347 Wh$
Energia Reativa	$VArh = 5,9701 VArh$
Demanda	$W = 2573,405 VArh$

Fonte: Autoria própria

Por fim, para validação do sistema, o circuito foi ensaiado utilizando o medidor Fluke. As figuras 40, 41 e 42 apresentam os resultados obtidos.

Potência e Energia				
FUND 0:01:41				
	A	B	C	Total
kW	1.17	0.66	0.71	2.54
kVA	2.75	2.89	0.71	6.35
kVAR	2.48	2.81	0.01	0.34
PF	0.43	0.23	1.00	0.40
DPF	0.43	0.23	1.00	0.40
kWh	0.020	0.011	0.012	0.043
kVAh	0.046	0.049	0.012	0.107
kVARh	0.042	0.047	0.000	0.006
START 01/22/03 20:42:34			0:01:00	
PULSE CNT ON OFF		CLOSE ENERGY		MANUAL COUNT+1
				RESET ENERGY

Figura 40 - Potências e Energias - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE
Fonte: Autoria própria

Volt/Amp/Hz				
0:00:03				
	A	B	C	N
U _{rms}	121.6	127.2	130.0	3.8
U _{pk}	168.8	176.9	181.2	6.1
CF	1.39	1.39	1.39	1.58
Hz	60.01			
	A	B	C	N
I _{rms}	22.5	22.9	5.5	39.4
I _{pk}	32.0	32.5	7.7	55.3
CF	1.42	1.42	1.42	1.40
01/22/03 20:43:47		120V 60Hz 3Ø WYE		DEFAULT
VOLTAGE		TREND		HOLD RUN

Figura 41 - Tensões e Correntes - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE
Fonte: Autoria própria

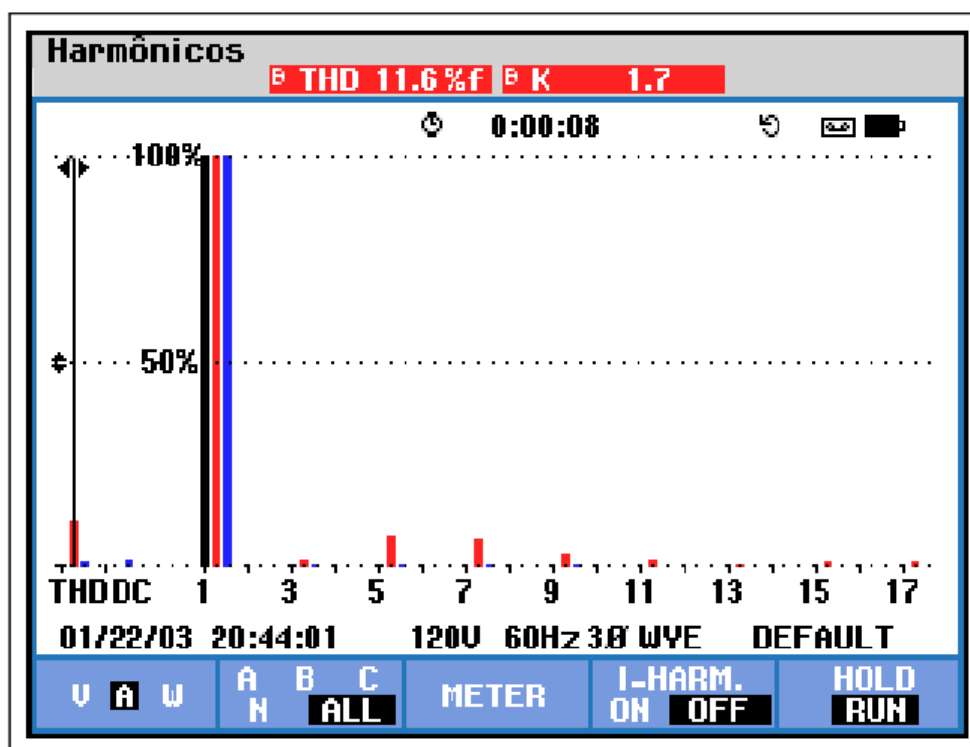


Figura 42 - THDi - Trifásico 4 fios - Carga RLC - FLUKE
 Fonte: Autoria própria