



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

BRUNO SOARES DOS SANTOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

***Estágio no Laboratório de Proteção e Simulação de
Sistemas Elétricos (LASSE) da Universidade Federal de
Campina Grande – Estudo de Qualidade de Energia Elétrica
e Aplicação de Ligas Nanocristalinas***

Campina Grande – Paraíba

Setembro – 2012

BRUNO SOARES DOS SANTOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

***Estágio no Laboratório de Proteção e Simulação de
Sistemas Elétricos (LASSE) da Universidade Federal de
Campina Grande – Estudo de Qualidade de Energia Elétrica
e Aplicação de Ligas Nanocristalinas***

Relatório de Estágio Supervisionado apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.

Campina Grande – Paraíba

Setembro - 2012

BRUNO SOARES DOS SANTOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

***Estágio no Laboratório de Proteção e Simulação de
Sistemas Elétricos (LASSE) da Universidade Federal de
Campina Grande – Estudo de Qualidade de Energia Elétrica
e Aplicação de Ligas Nanocristalinas***

Relatório de Estágio Supervisionado apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em: / /

Prof.: Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.

(Orientador)

Prof.: Prof.: Benedito Antonio Luciano, Dr.

(Componente da Banca)

Campina Grande – Paraíba

Setembro - 2012

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais Maria de Fátima e Gildo Soares, e meu irmão, Luis Gustavo, pelo amor, incentivo e apoio incondicional necessário para que eu concluísse o curso de Engenharia Elétrica.

À minha noiva, Jéssika Freitas, pelo amor, compreensão dos incontáveis momentos ausentes e incentivos para que eu realizasse meu sonho de concluir este curso.

Às amizades iniciadas durante o curso que contribuíram para a conclusão do mesmo e que permeará por toda vida, em especial: Miquéias Melo, João Paulo Pereira, Laécio Trajano, Arthur Dantas, Márcio Rilton, Valdemir Brito, Anderson Câmara.

Aos amigos Alberto Dantas e Gilvan Pereira, que com perseverança me convenceram a realizar meu sonho, cursar Engenharia Elétrica.

Aos amigos, Joseildo Barros e Stayner Guimarães, que infelizmente não estão aqui presente, mas estariam felizes com minha formação.

A todos aqueles que compõem o Departamento de Engenharia Elétrica, em especial os professores, a quem devo grande respeito e admiração pelos ensinamentos que me proporcionaram tornar um engenheiro eletricitista.

Ao professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, pela orientação, apoio e confiança por ter me proporcionado a oportunidade de realizar o meu estágio.

A todos aqueles que não foram citados, mas que de forma direta ou indiretamente fizeram parte de minha vida acadêmica.

RESUMO

Este trabalho consiste num relato das atividades desenvolvidas pelo aluno Bruno Soares dos Santos durante o estágio realizado pelo mesmo no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), na Universidade Federal de Campina Grande, no primeiro semestre de 2012. O trabalho realizado no estágio esteve no âmbito do Estudo de Qualidade de Energia Elétrica, com a edição de um guia prático para o uso do Analisador de Energia modelo LASSE-1 na análise comparativa de diversos tipos de lâmpadas disponíveis comercialmente, além da aplicação de ligas nanocristalinas no isolamento de sensores de corrente, com objetivo de proteção destes instrumentos.

Palavras-chave: analisador de energia, ligas nanocristalinas, qualidade de energia elétrica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dimensões da bancada e dos diâmetros dos parafusos de fixação (em milímetros).....	12
Figura 2 – Distância entre os parafusos de fixação dos bornes, tomadas, suportes e interruptor (em milímetros).	13
Figura 3 – Bancada de testes.....	14
Figura 4 – Conexões da bancada de testes.	14
Figura 5 – Esquema de montagem para análise da qualidade de energia elétrica de um sistema monofásico 1Φ2W.	16
Figura 6 – Montagem do circuito para análise da qualidade de energia elétrica de um sistema monofásico 1Φ2W.	16
Figura 7 – Montagem realizada na bancada de testes.....	17
Figura 8 – Analisador de energia elétrica.	19
Figura 9 – Menu de botões do analisador LASSE - 1.	19
Figura 10 – Tela de configuração SETUP do analisador LASSE - 1.....	20
Figura 11 – Tela dos dados de Potência exibidos pelo analisador LASSE – 1.	23
Figura 12 – Tela dos dados de Potência exibidos pelo <i>software Power & Harmonics Analyzer</i>	23
Figura 13 – Tela das formas de onda da tensão de fase e corrente de linha exibidos pelo analisador LASSE – 1.....	24
Figura 14 – Selecionando as formas de onda de tensão de fase e corrente de linha.	24
Figura 15 – Tela das formas de onda da tensão de fase e corrente de linha exibidos pelo <i>software Power & Harmonics Analyzer</i>	25
Figura 16 – Tela dos dados de Harmônica de corrente de linha exibidos pelo analisador LASSE – 1.	26
Figura 17 – Tela dos dados de Harmônica (fundamental) de corrente de linha exibidos pelo <i>software Power & Harmonics Analyzer</i>	26
Figura 18 – Tela dos dados de Harmônica (fundamental) da tensão de fase exibidos pelo <i>software Power & Harmonics Analyzer</i>	27
Figura 19 – Diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha exibido pelo analisador LASSE – 1.	28
Figura 20 – Diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha exibido pelo <i>software Power & Harmonics Analyzer</i>	28

Figura 21 – Índice do arquivo de cópia de tela.....	30
Figura 22 – Tela de harmônica descarregada no computador em formato <i>BitMap</i> ...30	
Figura 23 – (a) Lâmpada fluorescente compacta. (b) Lâmpada LED. (c) Lâmpada fluorescente tubular. (d) Lâmpada incandescente.....	32
Figura 24 – (a) Luxímetro digital HOMIS, modelo 259. (b) Varivolt. (c) Transformador de Corrente (TC)	33
Figura 25 – Montagem para análise da lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	35
Figura 26 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	36
Figura 27 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8.....	38
Figura 28 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada incandescente.....	40
Figura 29 – Montagem para análise da lâmpada LED.	41
Figura 30 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada LED.....	42
Figura 31 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	46
Figura 32 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	46
Figura 33 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada LED.....	48
Figura 34 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada LED.....	48
Figura 35 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada fluorescente tubular.....	50
Figura 36 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente tubular.....	50
Figura 37 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada incandescente.....	52
Figura 38 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada incandescente.....	52
Figura 39 – Amplificador operacional básico.....	57
Figura 40 – Operação modo-diferencial.....	58
Figura 41 – Operação modo-comum.....	58

Figura 42 – Configuração clássica de um amplificador de instrumentação formado por 3 amplificadores operacionais.....	60
Figura 43 – Configuração do amplificador de instrumentação INA 101HP.	62
Figura 44 – Estrutura interna do amplificador de instrumentação INA 101HP.	63
Figura 45 – Estrutura do circuito elétrico do sensor de corrente.	64
Figura 46 – (a) Núcleo toroidal de liga nanocristalina. (b) Núcleo toroidal de liga nanocristalina com 300 espiras no secundário.....	66
Figura 47 – Dimensões do núcleo toroidal de liga nanocristalina utilizado.	66
Figura 48 – Curva de histerese (Indução Magnética (B) versus Intensidade do Campo Magnético (H)).	67
Figura 49 – Estrutura modificada do circuito elétrico do sensor de corrente.	67
Figura 50 - Sensor de corrente.....	68
Figura 51 – Parte interna do sensor de corrente.	68
Figura 52 – Parte interna do sensor de corrente.	69
Figura 53 – Montagem para o ajuste do sensor de corrente.	69
Figura 54 – Curva característica do sensor de corrente.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	35
Tabela 2 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8.....	37
Tabela 3 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada incandescente.....	39
Tabela 4 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada LED. ...	41
Tabela 5 – Análise de eficiência energética e dos custos para cada tipo de lâmpada.	44
Tabela 6 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.....	47
Tabela 7 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada LED.....	49
Tabela 8 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada fluorescente tubular.....	51
Tabela 9 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada incandescente.....	53
Tabela 10 – Levantamento dos dados de entrada (I_{ES}) e de saída (V_{SS}) do sensor de corrente.....	70

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	10
2 – ATIVIDADES REALIZADAS	12
2.1 – Construção da bancada de testes	12
2.2 – Edição de um guia prático do analisador de energia elétrica LASSE - 1	15
2.2.1 – Montagem de um circuito monofásico a 2 fios (1Φ2W)	15
2.2.2 – Instalação do software do analisador de energia elétrica LASSE – 1.....	18
2.2.3 – Configuração dos parâmetros do analisador de energia elétrica LASSE – 1.....	18
2.2.4 – Coleta dos dados e análise dos resultados	21
2.3 – Estudo comparativo da Qualidade de Energia Elétrica de lâmpadas disponíveis comercialmente	31
2.3.1 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado	34
2.3.2 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8	36
2.3.3 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada incandescente	38
2.3.4 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada LED	40
2.3.5 – Análise de Eficiência Energética, Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH), Fator de Potência (FP) e Custos.....	43
2.4 – Isolamento de sensores de corrente por uso de núcleos de ligas nanocristalinas	55
2.4.1 – Amplificadores de Instrumentação	55
2.4.2 – Ligas Nanocristalinas.....	63
2.4.3 – Descrição do problema	64
2.4.4 – Solução.....	65
2.4.5 – Ajuste do ganho e levantamento da curva característica do sensor de corrente.....	69
3 – CONCLUSÕES	72
4 – REFERÊNCIAS	73

1 – INTRODUÇÃO

Até o final da década de 70, vivia-se no Brasil uma situação bastante diferente da atual, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica. Os consumidores residenciais daquela época possuíam uma carga plenamente resistiva, salvo raras exceções. Por exemplo, numa residência típica, encontravam-se como cargas os chuveiros elétricos e os ferros de passar roupas a resistência elétrica. O número de equipamentos eletrônicos resumia-se, na maioria das residências, a um aparelho de TV. Até mesmo a demanda por energia elétrica das cargas indutiva – resistivas (o motor refrigerador) era consumida por uma carga considerada resistiva.

Atualmente, os consumidores de diversas classes, inclusive os residenciais, possuem cargas comandadas eletronicamente, tais como fornos de microondas, computadores e periféricos, diversos aparelhos de TV e de áudio e elevada quantidade de eletrodomésticos. Um exemplo do emprego da eletrônica em uma área dominada por cargas resistivas são as lâmpadas fluorescentes compactas, que estão substituindo as lâmpadas incandescentes tradicionais, inclusive com apoio do governo, no caso da crise energética ocorrida no Brasil no início do século XXI.

As cargas elétricas comandadas eletronicamente possuem uma característica intrínseca que é a não-linearidade da mesma, ou seja, não requerem a corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos. Dependendo da topologia do conversor eletrônico empregado, a corrente de entrada é disparada em determinado período ou ângulo da oscilação senoidal. Com isto, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda (tensão e corrente) que lhe é entregue e como consequência gerando uma “poluição” na rede de energia elétrica. É importante ressaltar que estas mesmas cargas eletroeletrônicas, além de poluírem a rede elétrica, sofrem diretamente com a má qualidade desta energia elétrica.

Neste relatório de estágio serão apresentados os resultados dos estudos analíticos e práticos sobre o desempenho de diversos tipos de lâmpadas comercialmente disponíveis, com foco nos custos, na qualidade de energia elétrica e na eficiência luminosa, com vistas à eficiência energética. Também serão

apresentados os resultados de um isolamento na estrutura de um sensor de corrente utilizado no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), a partir de um núcleo de material de liga nanocristalina.

2 – ATIVIDADES REALIZADAS

2.1 – Construção da bancada de testes

A primeira atividade realizada no estágio foi a construção de uma bancada de testes que facilitasse os ensaios de Qualidade de Energia Elétrica. A bancada foi construída utilizando todo o aparato disponível no Laboratório de Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), com dimensões conforme visto nas Figuras 1 e 2 (elaborada com auxílio do *software AutoCad*).

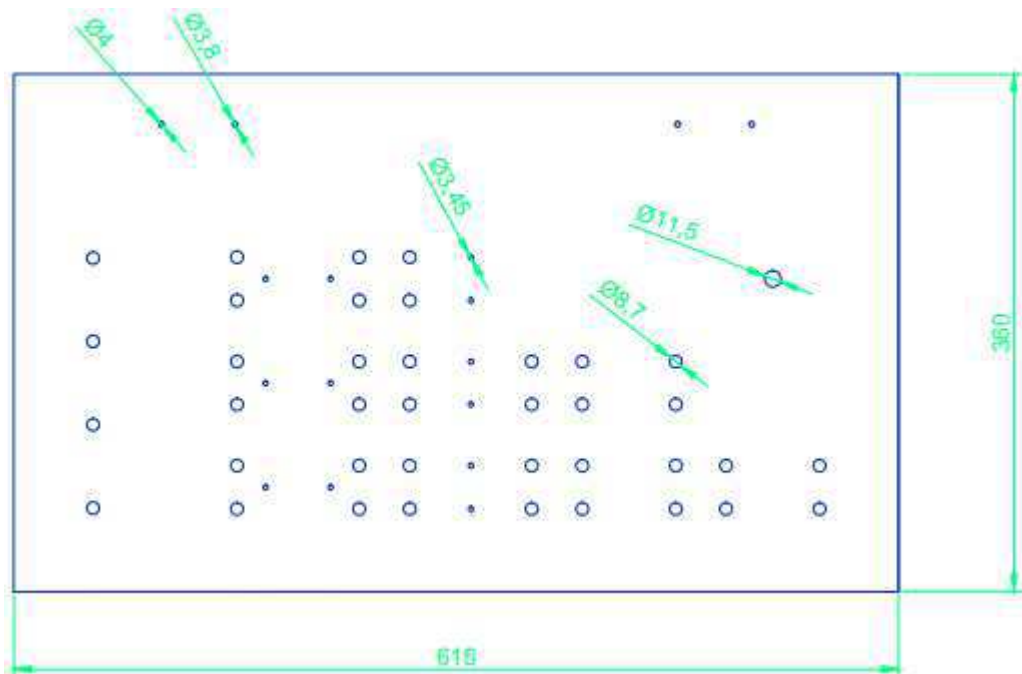


Figura 1 – Dimensões da bancada e dos diâmetros dos parafusos de fixação (em milímetros).

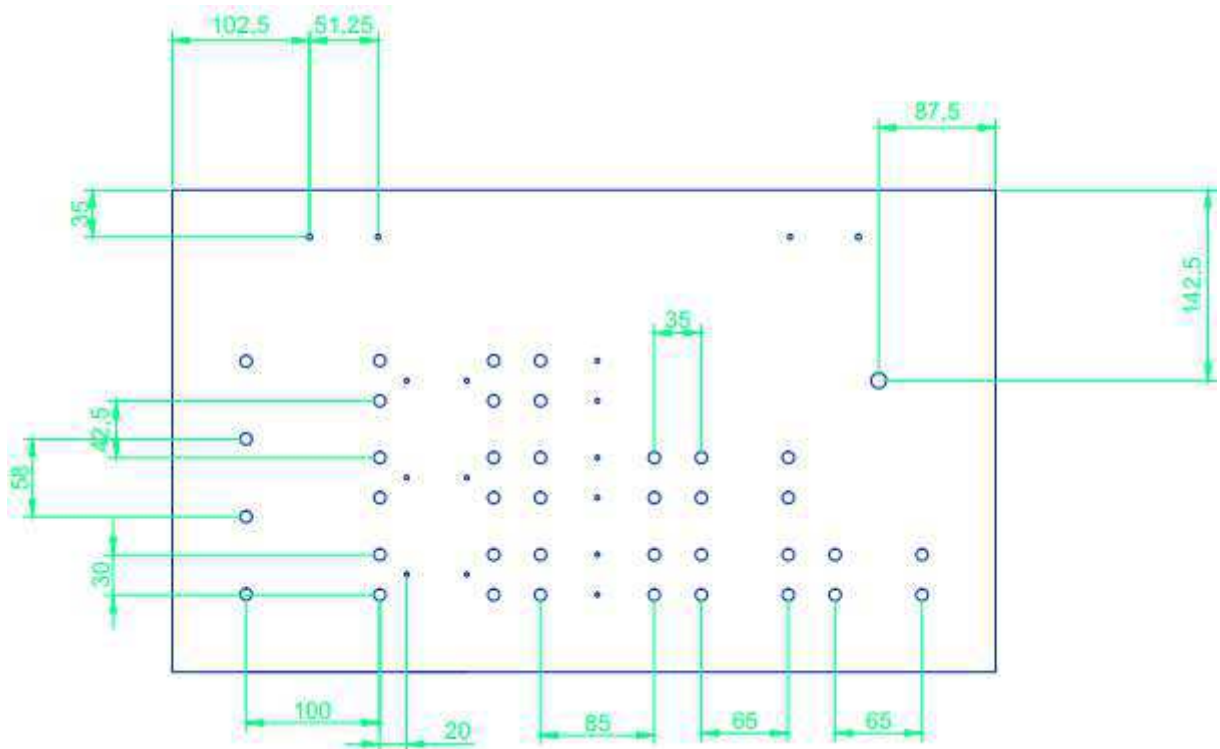


Figura 2 – Distância entre os parafusos de fixação dos bornes, tomadas, suportes e interruptor (em milímetros).

Ao final do processo de fabricação da bancada de testes (ver Figura 3), obteve-se uma estrutura de alimentação trifásica, capaz de simular diversos tipos de associações e de cargas elétricas, podendo desta forma avaliar situações encontradas tanto em âmbito residencial quanto industrial. Na Figura 4, podem-se verificar as conexões realizadas na montagem da bancada.

A bancada de testes fabricada apresenta as seguintes características:

- alimentação trifásica a quatro condutores (3 fases (bornes amarelos a esquerda) e um neutro (borne azul));
- bornes de conexão das cargas elétricas (bornes amarelos);
- bornes de medição das cargas elétricas (bornes vermelhos);
- suporte para conexão de uma lâmpada fluorescente;
- interruptor de liga/desliga da lâmpada fluorescente;
- 3 bocais;
- 3 adaptadores de bocais;
- 3 tomadas;
- bornes adicionais, para inserir futuras aplicações na bancada;

- reator eletromagnético PHILIPS de 18 W – 20 W, 220 V, 60 Hz;
- Starter DECORLUX de 30 W – 40 W, 110 V – 220 V.



Figura 3 – Bancada de testes.

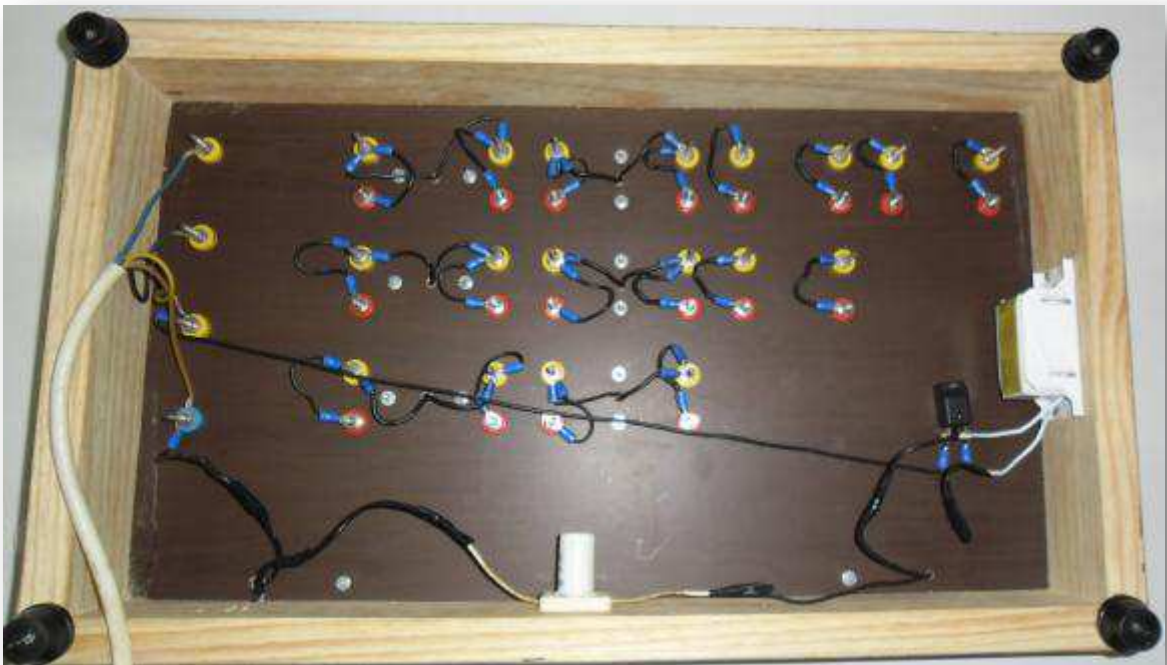


Figura 4 – Conexões da bancada de testes.

2.2 – Edição de um guia prático do analisador de energia elétrica LASSE - 1

O guia prático do Analisador de Energia Elétrica LASSE – 1 foi editado, para fins restritamente acadêmicos, com objetivo de estudar o funcionamento deste equipamento, facilitando o manuseio do analisador por parte de futuros usuários.

Para a montagem desta edição, algumas simulações foram realizadas e as telas, tanto do analisador quanto as do *software* disponibilizado pelo fabricante, foram capturadas. Os circuitos elétricos das montagens realizadas foram desenhados com auxílio do *software Autocad*.

Devido à extensão do guia prático, ele não será inserido em sua totalidade neste relatório, mas uma aplicação do estudo de qualidade de energia elétrica será apresentada com todos os passos de montagem do circuito a ser simulado, instalação do *software Power & Harmonics Analyzer* do equipamento, configuração e manuseio do analisador, além da coleta dos dados. Todos os detalhes destes passos estão presentes neste guia.

2.2.1 – Montagem de um circuito monofásico a 2 fios ($1\Phi 2W$)

Para analisar a potencialidade do analisador LASSE-1 no estudo de qualidade de energia elétrica, uma montagem de um circuito monofásico a 2 fios ($1\Phi 2W$) foi realizada na bancada de testes, conforme o esquema visto na Figura 5. Verifica-se nesta Figura a presença de alguns componentes do analisador, como a garra sensível de corrente e as pontas de prova, cujos cabos são conectados aos terminais I_1 e V_1, V_n do analisador, respectivamente, e os seus terminais aos pontos de medição na bancada de testes. A montagem real do circuito monofásico a 2 fios pode ser verificada nas Figuras 6 e 7.

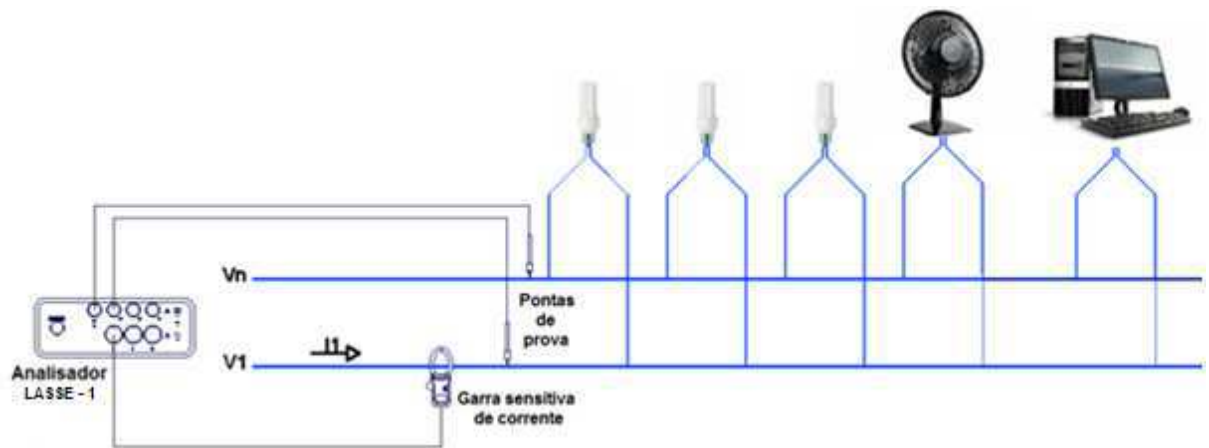


Figura 5 – Esquema de montagem para análise da qualidade de energia elétrica de um sistema monofásico 1Φ2W.

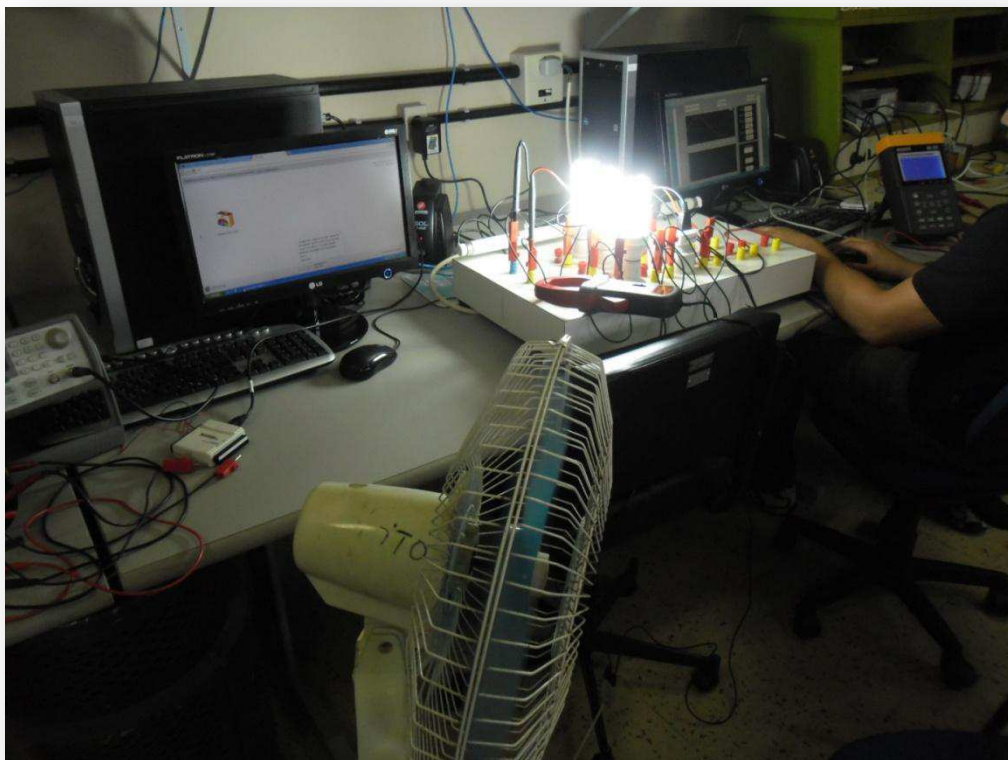


Figura 6 – Montagem do circuito para análise da qualidade de energia elétrica de um sistema monofásico 1Φ2W.

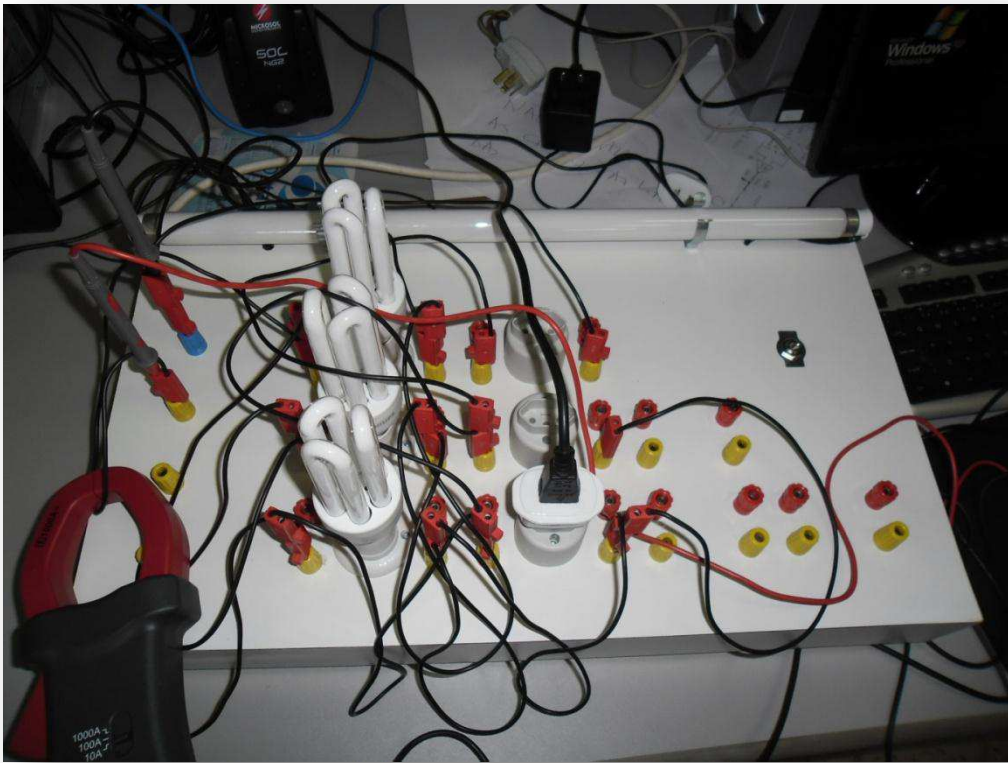


Figura 7 – Montagem realizada na bancada de testes.

As cargas utilizadas nesta montagem apresentam as seguintes características elétricas:

- a) Lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado
 - Fabricante: PHILIPS
 - Potência ativa: 18 W
 - Tensão elétrica: 220 – 240 V
 - Frequência: 50 / 60 Hz

- b) Ventilador
 - Fabricante: Super Deluxe
 - Potência ativa: 65 W
 - Tensão elétrica: 220 V
 - Frequência: 60 Hz

- c) Computador
 - Potência ativa: 80 W
 - Monitor: fabricante LG
 - Tensão elétrica: 100 – 240 V;
 - Frequência: 50 / 60 Hz;
 - Processador: Intel(R) Core (TM) 2 Duo
 - Sistema Operacional: Microsoft Windows XP Professional
 - 1 Gigabyte de memória RAM
 - Tensão elétrica: 220 V
 - Frequência: 60 Hz

2.2.2 – Instalação do software do analisador de energia elétrica LASSE – 1.

O *software Power & Harmonics Analyzer* do analisador de energia elétrica LASSE - 1 foi instalado no computador 43 do LASSE, que recebe os dados coletados do analisador via comunicação RS – 232, em tempo real, e conexão USB – ótica. Neste computador foram realizadas todas as medições e análises das diversas montagens utilizadas para a construção deste relatório e na edição deste guia prático.

2.2.3 – Configuração dos parâmetros do analisador de energia elétrica LASSE – 1.

Após realizar a montagem da Figura 6, o seguinte passo é a configuração dos parâmetros do analisador de energia elétrica LASSE – 1 de acordo com as características elétricas do circuito e da instalação elétrica na qual está sendo efetuada a análise.



Figura 8 – Analisador de energia elétrica.

O primeiro parâmetro a ser ajustado é o que define a quantidade de fases e de fios da montagem, que é realizada pressionando-se, no menu de botões do analisador de energia (Figura 9), o botão POWER. Nesta tela, pressiona-se o botão 1 Φ 3 Φ até que o sistema 1 Φ 2W seja exibido na parte inferior esquerda do display do analisador.



Figura 9 – Menu de botões do analisador LASSE - 1.

A configuração dos parâmetros do analisador de energia LASSE-1 é realizada pressionando o botão SETUP. A tela SETUP pode ser vista na Figura 10, onde cada parâmetro pode ser selecionado pressionando o botão SETUP e os seus valores ajustados pelos botões de seta.

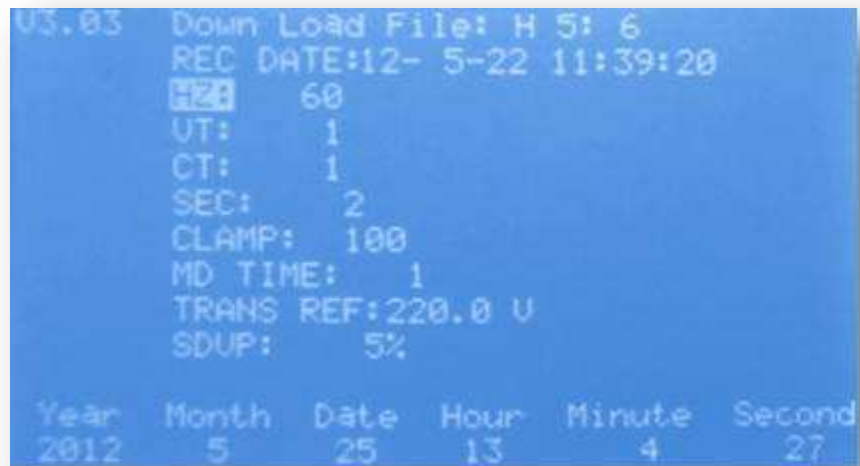


Figura 10 – Tela de configuração SETUP do analisador LASSE - 1.

Com o parâmetro HZ selecionado e com auxílio dos botões de seta, o valor de frequência é ajustado para 60 Hz (frequência de oscilação do sistema elétrico).

Os parâmetros VT e CT se referem às relações de transformação dos transformadores de potencial e corrente, respectivamente, caso estes equipamentos sejam utilizados em alguma montagem, o que não é o caso deste exemplo. Logo, os parâmetros VT e CT desta montagem são ajustados para uma relação de transformação igual a 1.

O parâmetro SEC define o intervalo de tempo, em segundos, entre um registro e outro. Para esta aplicação, o valor SEC foi ajustado no valor 2, significando que a cada dois segundos, um novo registro é realizado.

De acordo com a intensidade da corrente elétrica submetida ao circuito montado na bancada de testes, a escala da garra sensitiva de corrente é selecionada. Para esta montagem, a escala da garra de corrente selecionada é a de

10 A. Na tela de configurações SETUP do analisador de energia, o parâmetro CLAMP é selecionado e o seu valor ajustado para 100 A.

O parâmetro MD TIME define o intervalo de tempo, em minutos, de demanda máxima. Para esta montagem, o valor deste parâmetro foi ajustado para 1, ou seja, no intervalo de 1 minuto o analisador integrará os valores de potência ativa (kW) e aparente (kVA) e a demanda máxima será atualizada se o valor da nova demanda for maior do que a demanda anterior.

O parâmetro TRANS REF define a tensão de referência para detecção de transitório e nesta montagem o seu valor é de 220 V, tensão de fase da instalação elétrica onde foi realizada esta aplicação. O parâmetro SDVP ajusta os limites inferiores e superiores, em porcentagem, para detecção de tensão transitória. Nesta montagem, o seu valor foi ajustado para 5%.

Os parâmetros Year, Month, Date, Hour e Minute podem ser selecionados para ajustar o calendário e o horário.

2.2.4 – Coleta dos dados e análise dos resultados

Com os parâmetros do analisador ajustados, conectam-se os cabos de medições de tensão e corrente elétrica no analisador e nos pontos de medição do circuito montado na bancada de testes, certificando-se de que a garra está bem fechada e de que a corrente elétrica está fluindo da parte frontal para a parte traseira da garra. Conecta-se também um cabo USB com interface ótica para realizar a comunicação entre o analisador e o computador, onde neste se encontra instalado o *software Power & Harmonics Analyzer* que faz o tratamento dos dados enviados pelo analisador e mostra os resultados, em tempo real, das grandezas elétricas sob formas de onda, espectros de frequência e diagramas fasoriais.

Após a realização dos ajustes, configurações e conexões, a bancada de testes é energizada e inicializa-se a captura dos dados por parte do analisador LASSE – 1. Esses dados são mostrados tanto na tela do analisador quanto no computador onde se encontra instalado o *software Power & Harmonics Analyzer*. Selecionando o botão POWER no menu de botões do analisador, pode-se verificar

as seguintes parâmetros nas telas do analisador (Figura 11) e do *software* (Figura 12):

- tensão de fase (V_1) e de linha (neste exemplo, como se trata de uma montagem monofásica a dois fios, a tensão exibida é apenas a de fase);
- corrente de linha (I_1);
- potência ativa (P_1), aparente (S_1) e reativa (Q_1) por fase e o somatório destas. Quando a montagem utiliza uma fase, como neste exemplo, o valor de potência por fase é igual ao somatório das potências por fase;
- o fator de potência (PF), tanto por fase quanto o total da instalação. Quando a montagem utiliza uma fase, como neste exemplo, o valor do fator de potência por fase é igual ao fator de potência da instalação;
- o ângulo de fase (ϕ), em graus, entre a tensão de fase e a corrente de linha. Caso a montagem utilize mais de uma fase, os ângulos de defasagem de cada fase serão exibidos;
- os parâmetros de energia (WH, SH, QH);
- a frequência (HZ), ajustada em 60 Hz;
- os parâmetros de demanda máxima (potência aparente e potência ativa) para o intervalo de 1 minuto;
- os parâmetros que indicam o tipo do sistema utilizado na montagem, no caso em questão um sistema monofásico a dois fios ($1\Phi 2W$);
- o parâmetro que indica o intervalo de dois segundos (SEC) entre um registro e outro;
- os parâmetros que indicam a relação de transformação (CT e VT). Como não foi necessária a utilização de transformadores de corrente e potencial nesta aplicação, seus valores exibidos são iguais a 1.



Figura 11 – Tela dos dados de Potência exibidos pelo analisador LASSE – 1.



Figura 12 – Tela dos dados de Potência exibidos pelo *software Power & Harmonics Analyzer*.

Analisando os resultados de potência exibidos, conclui-se que as cargas instaladas utilizadas nesta montagem apresentam caráter indutivo (Phase = - 7,7° e Q = - 0,114 kvar).

Selecionando o botão de formas de onda VI no menu de botões do analisador, pode-se verificar as formas de onda da tensão de fase e corrente de linha na tela do analisador (Figura 13).

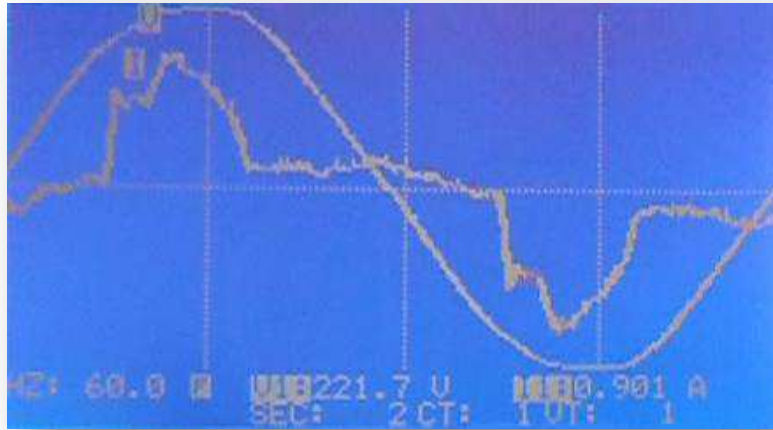


Figura 13 – Tela das formas de onda da tensão de fase e corrente de linha exibidos pelo analisador LASSE – 1.

Na tela de potência, pode-se obter a mesma forma de onda exibida na Figura 13 com auxílio do *software Power & Harmonics Analyzer*, clicando na barra de ferramentas do *software* em *View, Power, Waveform* (Figura 14). Assim, as formas de onda da tensão de fase e corrente de linha são exibidas, em tempo real, conforme visto na Figura 15.

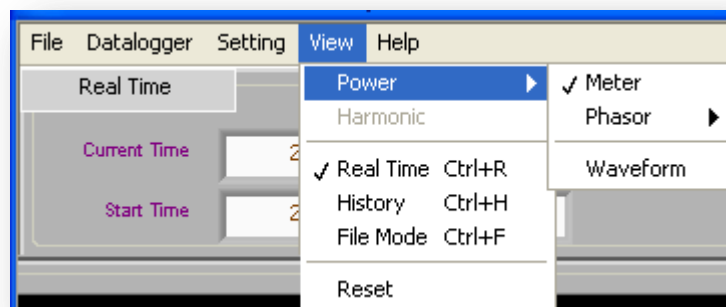


Figura 14 – Selecionando as formas de onda de tensão de fase e corrente de linha.

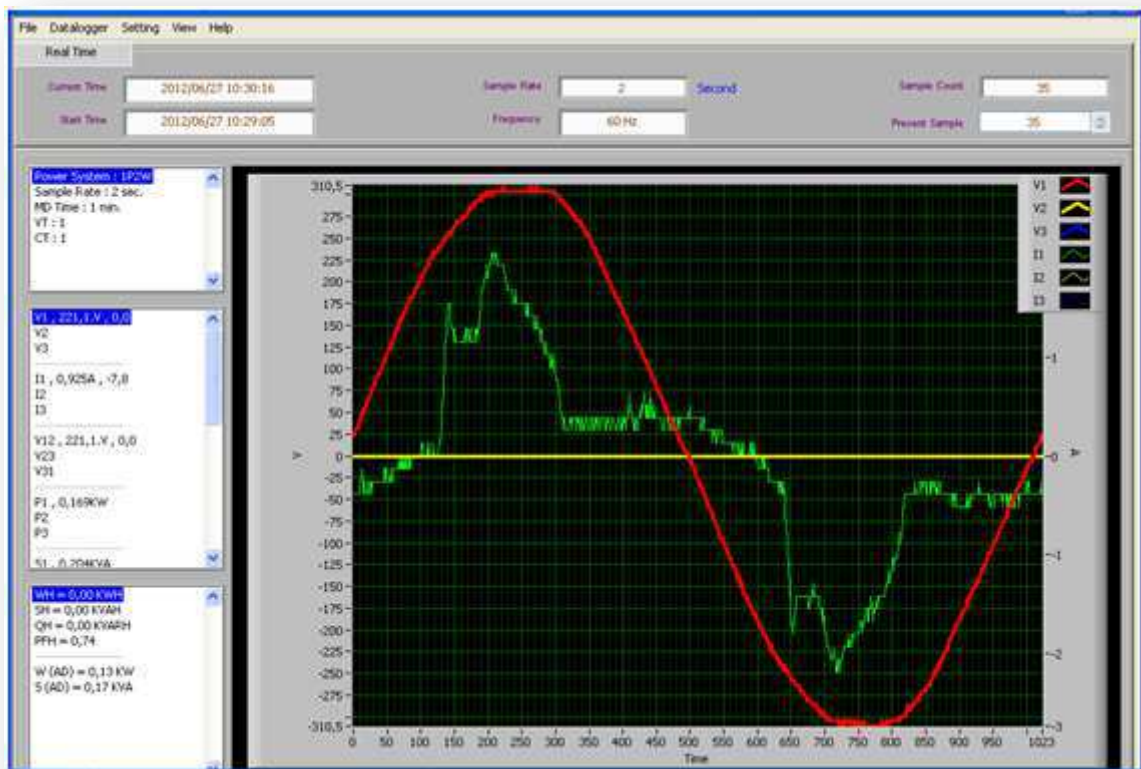


Figura 15 – Tela das formas de onda da tensão de fase e corrente de linha exibidos pelo *software Power & Harmonics Analyzer*.

Selecionando o botão MAG no menu de botões do analisador, pode-se verificar as formas de onda da tensão de fase ou corrente de linha e os seus respectivos espectros de frequência, além dos seguintes parâmetros nas telas do analisador (Figura 16) e do *software* (Figuras 17 e 18):

- valores de pico positivo e negativo da tensão de fase e corrente de linha;
- valor RMS da tensão de fase e corrente de linha;
- seleção da ordem da harmônica;
- frequência da harmônica selecionada;
- grau de distorção harmônico (%). Caso o botão PHASE seja pressionado, o ângulo de fase de cada harmônica será exibido ao invés do grau de distorção harmônico;
- amplitude da harmônica;
- taxa de distorção harmônica total (Thd).

Para alternar as informações de harmônicas de tensão de fase para corrente de linha, basta pressionar o botão VI 1>2>3 do analisador LASSE - 1.



Figura 16 – Tela dos dados de Harmônica de corrente de linha exibidos pelo analisador LASSE – 1.



Figura 17 – Tela dos dados de Harmônica (fundamental) de corrente de linha exibidos pelo software *Power & Harmonics Analyzer*.

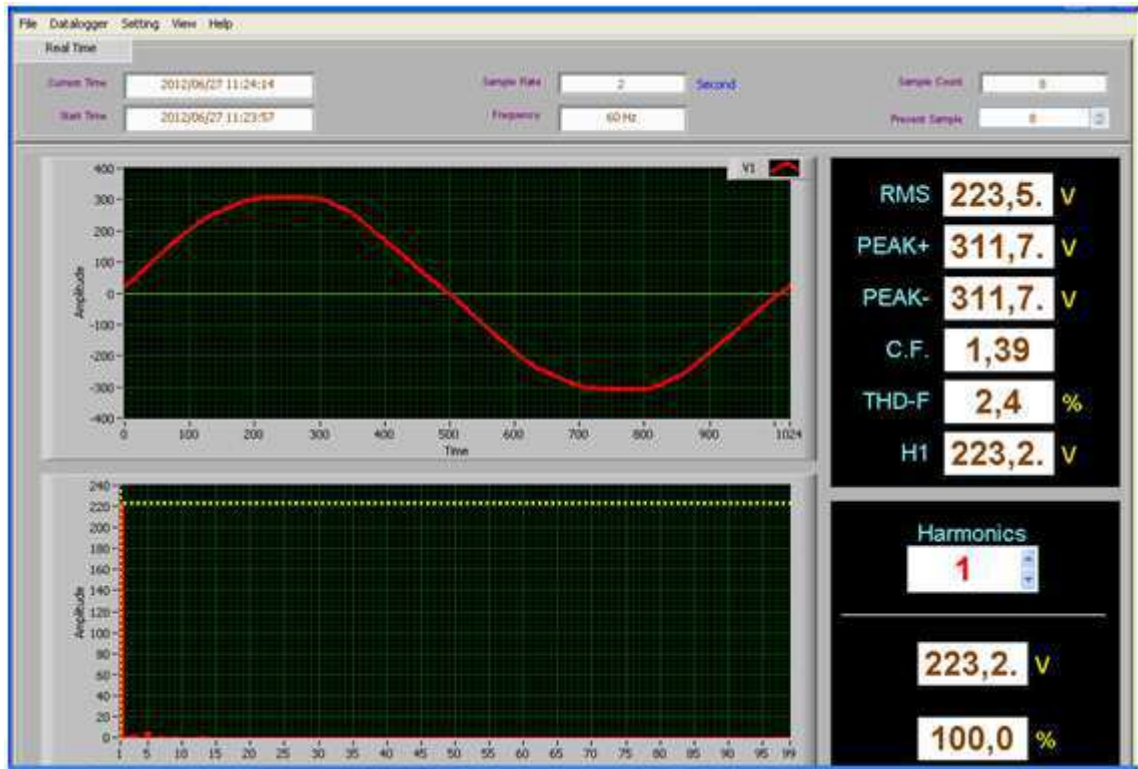


Figura 18 – Tela dos dados de Harmônica (fundamental) da tensão de fase exibidos pelo *software Power & Harmonics Analyzer*.

Analisando os resultados obtidos na medição de harmônicas, verifica-se a elevada Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH) na corrente de linha, devido as cargas não-lineares utilizadas na montagem, como o reator eletrônico das lâmpadas fluorescentes compactas e dos componentes eletrônicos encontrados num computador *Desktop* e periféricos. Com isto, estas cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda (tensão e corrente) que lhe é entregue e como consequência, gera uma “poluição” na rede de energia elétrica. É importante ressaltar que estas mesmas cargas eletroeletrônicas, além de poluírem a rede elétrica, sofrem diretamente com a má qualidade desta energia elétrica.

Selecionando o botão PHASE no menu de botões do analisador, pode-se verificar diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha na tela do analisador LASSE – 1 (Figura 19), o que confirma se tratar de uma carga indutiva devido a corrente de linha exibida estar atrasada da tensão de fase. Para visualizar o diagrama fasorial no computador, o analisador deve estar na tela de potência e com auxílio do *software Power & Harmonics Analyzer*, clica-se na barra de ferramentas em *View, Power, Phasor* (Figura 14) e escolhe quais fasores exibir.

Assim, para este exemplo, o diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha é exibido, em tempo real, conforme visto na Figura 20.



Figura 19 – Diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha exibido pelo analisador LASSE – 1.

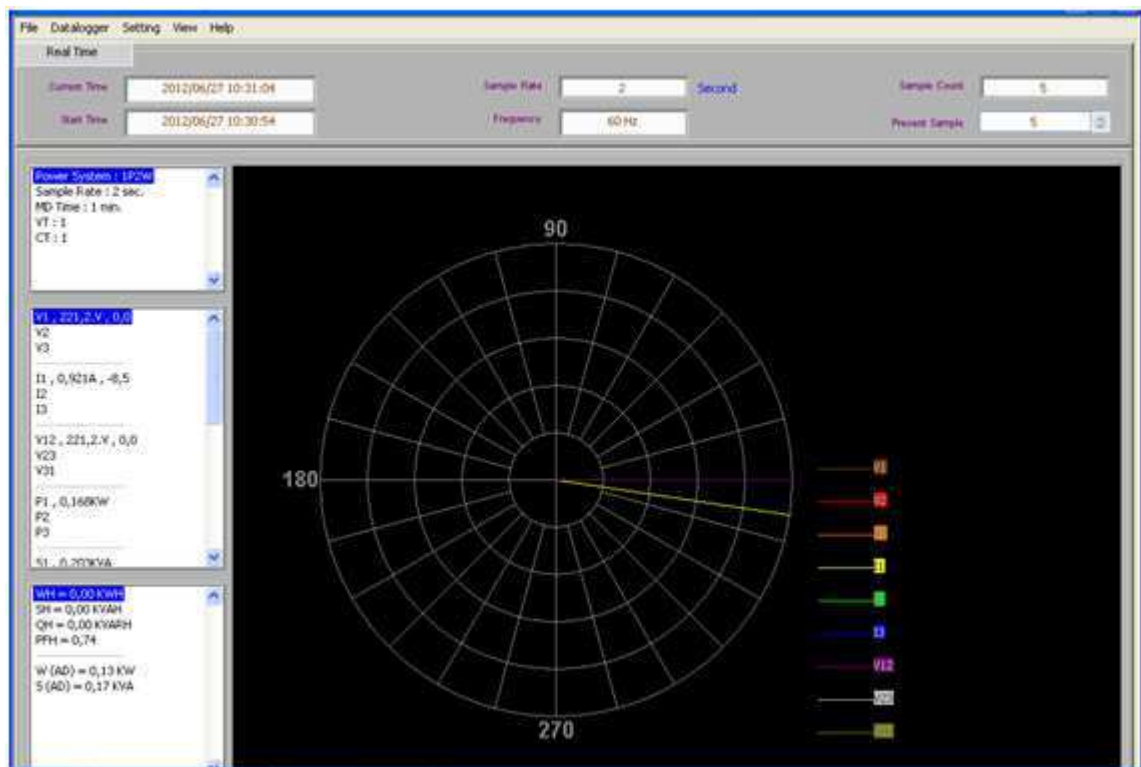


Figura 20 – Diagrama fasorial da tensão de fase e corrente de linha exibido pelo software *Power & Harmonics Analyzer*.

Outra função que pode ser explorada do analisador LASSE – 1 é o armazenamento de dados, que pode ser: dados de potência, harmônicos ou cópia de tela. Estes dados coletados pelo analisador podem ser enviados, via comunicação RS – 232 e conexão USB – ótica para computador onde esteja instalado *software Power & Harmonics Analyzer*. Como exemplo, mostra-se como realizar o armazenamento de uma cópia de tela de medição de harmônicos e o seu envio via comunicação RS-232 para um computador:

- na tela de medição de harmônica, pressiona-se o botão HOLD/READ;
- pressione o botão REC. Em apenas alguns segundos a tela será copiada, e armazenada em um arquivo interno;
- o display LCD exibirá o indicador REC em destaque, na parte inferior direita do analisador, quando em operação. O número exibido após o indicador REC é o número de arquivo;
- Pressione o botão REC novamente para interromper o registro de dados;
- pressione o botão SETUP;
- o arquivo a ser descarregado “*Down Load File*” será exibido em destaque no display. Caso o dado no arquivo selecionado seja uma cópia de tela, o indicador H será exibido em destaque;
- pressione o botão EXIT;
- ao pressionar CTRL+D a unidade receberá os dados através da porta RS-232C, e descarregará os parâmetros de cópia de tela armazenados;
- no computador, clique em *Download* para visualizar o índice do arquivo (Figura 21). Clique em *Download Data* para que o arquivo de cópia de tela seja descarregado;
- clique em *Save as BitMap* para salvar o dado descarregado como um *bit map* (Figura 22).

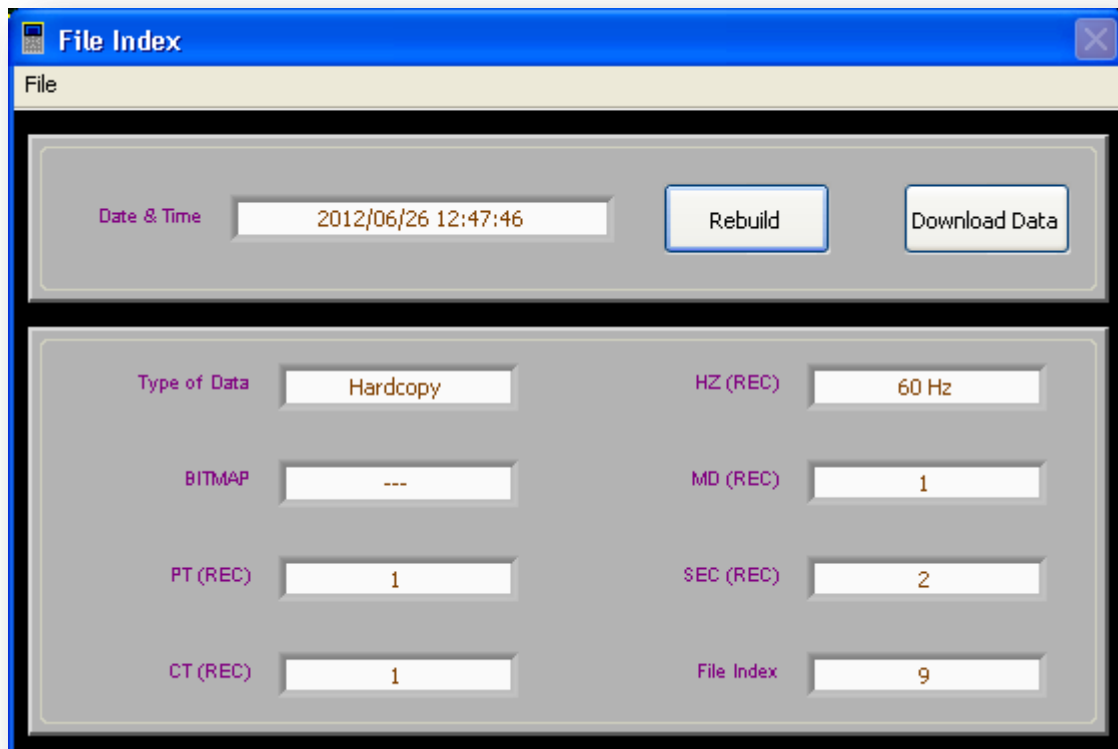


Figura 21 – Índice do arquivo de cópia de tela.

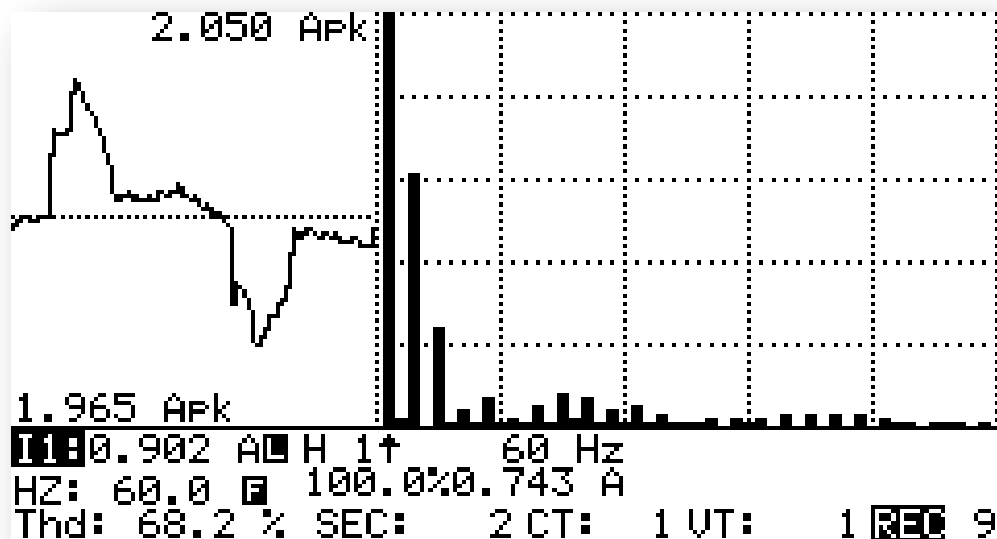


Figura 22 – Tela de harmônica descarregada no computador em formato *BitMap*.

2.3 – Estudo comparativo da Qualidade de Energia Elétrica de lâmpadas disponíveis comercialmente

Um dos dispositivos que mais contribuem para inserir harmônicos na rede elétrica atualmente são as lâmpadas que utilizam algum equipamento eletrônico em sua estrutura, como por exemplo, as lâmpadas fluorescentes compactas com reator eletrônico integrado. Este tipo de lâmpada vem substituindo as lâmpadas incandescentes tradicionais, que ainda representam 40 % das lâmpadas vendidas no país, mas são menos econômicas. Esta substituição ocorreu, inclusive com apoio do governo, com a crise energética ocorrida no Brasil no início do século XXI, sendo que a partir de julho de 2012 fica proibida a fabricação de lâmpadas incandescentes com potência superior a 101 W, com o estoque podendo ser vendido até o fim de 2012. As incandescentes de outras potências param de ser produzidas e vendidas até 2015, e as incandescentes importadas, mais eficientes, poderão ser comercializadas até 2016.

Quando a substituição das lâmpadas incandescente pelas fluorescentes compactas com reator eletrônico integrado foi incentivada, levou-se em consideração apenas a questão do consumo. Mas estudos posteriores mostraram que apesar destas lâmpadas fluorescentes compactas serem mais econômicas, estas por serem cargas não-lineares, não requer corrente elétrica constante, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos e dependendo da topologia do conversor eletrônico empregado, a corrente de entrada é disparada em um período ou ângulo da oscilação senoidal específico, e com isto, estas cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda da tensão e corrente elétrica que lhe é entregue.

Neste tópico é realizado um estudo comparativo da Qualidade de Energia Elétrica dos diversos tipos de lâmpadas comercialmente disponíveis, analisando os seguintes parâmetros: eficiência luminosa, eficiência energética, potência ativa, iluminância ou iluminamento, taxa de distorção harmônica total (TDH), fator de potência (FP), tempo médio de vida útil e custos. As lâmpadas analisadas foram as seguintes: lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado; lâmpada LED; lâmpada fluorescente tubular bulbo T8; lâmpada incandescente.



Figura 23 – (a) Lâmpada fluorescente compacta. (b) Lâmpada LED. (c) Lâmpada fluorescente tubular. (d) Lâmpada incandescente.

A montagem de um circuito monofásico a 2 fios ($1\Phi 2W$) foi realizada na bancada de testes para efetuar o estudo de Qualidade de Energia Elétrica, com o auxílio de: um analisador de energia elétrica LASSE – 1, para mensurar a corrente elétrica, a tensão, o fator de potência (FP), a potência ativa e a taxa de distorção harmônica total (TDH); um luxímetro digital (gentilmente cedido pelo Laboratório de Alta Tensão) marca HOMIS, modelo 259 (Figura 24 (a)), instalado a 1 m das lâmpadas, para mensurar a iluminância (unidade: lux) para cada tipo de lâmpada; um Varivolt monofásico (Figura 24 (b)), para avaliar a potência ativa consumida pela lâmpada a partir da variação do potencial elétrico; e de um transformador de corrente (TC) de relação de transformação de 10:1 (Figura 24 (c)), devido à corrente elétrica das lâmpadas de LED apresentarem níveis tão baixos que o analisador de energia LASSE – 1 não consegue mensurá-la. Daí a necessidade de se utilizar um TC, de modo que o seu secundário esteja ligado em série ao circuito e o primário em curto-circuito. Desta forma, a garra sensível de corrente será conectada no primário, mensurando uma corrente elétrica e uma potência ativa 10 vezes maior do que a corrente que circula pela lâmpada e a potência consumida pela mesma.



(a)

(b)



(c)

Figura 24 – (a) Luxímetro digital HOMIS, modelo 259. (b) Varivolt. (c) Transformador de Corrente (TC)

O Varivolt monofásico utilizado apresenta as seguintes características elétricas:

- Tipo: M – 2412;
- Frequência: 50 / 60 Hz;
- Corrente elétrica: 12 A;

- Potência ativa: 2640 W – 2880 W;
- Entrada 1 – 5 (220 V) → Saída 5 – 3 (0 – 220 V);
- Entrada 4 – 5 (220 V) → Saída 5 – 3 (0 – 240 V).

O Transformador de Corrente (TC) utilizado apresenta as seguintes características elétricas:

- Relação de transformação: 10:1 A;
- Classe de exatidão e carga: 0,6 – C 12,5;
- Tensão máxima: 0,6 kV;
- Frequência: 50 / 60 Hz.

2.3.1 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado

A lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado utilizada neste estudo apresenta as seguintes características:

- Fabricante: PHILIPS
- Potência ativa: 18 W
- Tensão elétrica: 220 – 240 V
- Frequência: 50 / 60 Hz
- Vida útil: 4000 horas

O processo de funcionamento das lâmpadas fluorescentes compactas baseia-se em descargas elétricas bruscas para a ionização do gás, formação do arco no ambiente gasoso e excitação do fósforo que reveste o tubo de vidro, sendo que nestas lâmpadas as descargas são geradas a partir de circuitos eletrônicos (TORRES, et al., 2009).

Para avaliar a eficiência luminosa da lâmpada fluorescente compacta, foi utilizado o Varivolt para selecionar 11 níveis de potencial elétrico para uma lâmpada e com isso mensurar e analisar para cada nível de potencial, a potência ativa consumida pela lâmpada, com o uso do analisador LASSE-1, e a iluminância, pelo uso do luxímetro HOMIS. A montagem realizada para esta análise pode ser vista na Figura 25 e os dados mensurados nos equipamentos utilizados e os resultados do

cálculo da eficiência luminosa (expressão 1) estão presentes na Tabela 1, lembrando que, para a realização deste experimento é necessário que o ambiente esteja isento de qualquer luminosidade que não seja as das lâmpadas em análise.

$$Eficiência\ luminosa = \frac{Iluminância\ (lux)}{Potência(W)} \quad (1)$$

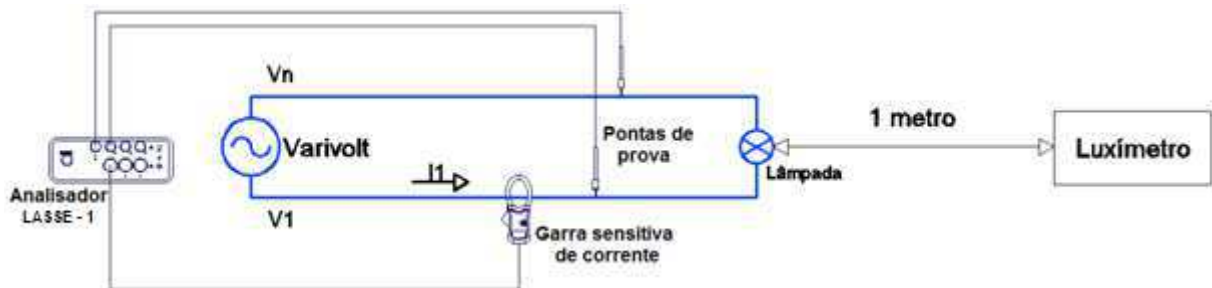


Figura 25 – Montagem para análise da lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

Tabela 1 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

Potencial Elétrico (V)	Potência (W)	Iluminância (lux) a 1 m	Eficiência luminosa (lux/W)
120	9,67	58,90	6,09
130	11,00	66,20	6,02
140	11,67	73,60	6,31
150	12,33	79,00	6,41
160	13,00	85,40	6,57
170	14,00	91,00	6,50
180	14,67	93,90	6,40
190	15,33	98,30	6,41
200	16,00	102,40	6,40
210	16,67	103,00	6,18
220	17,00	108,00	6,35

Com os dados da Tabela 1, plota-se, com auxílio do *software MatLab*, um gráfico de Iluminância (lux) versus Potência (W) e de Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) (Figura 26).

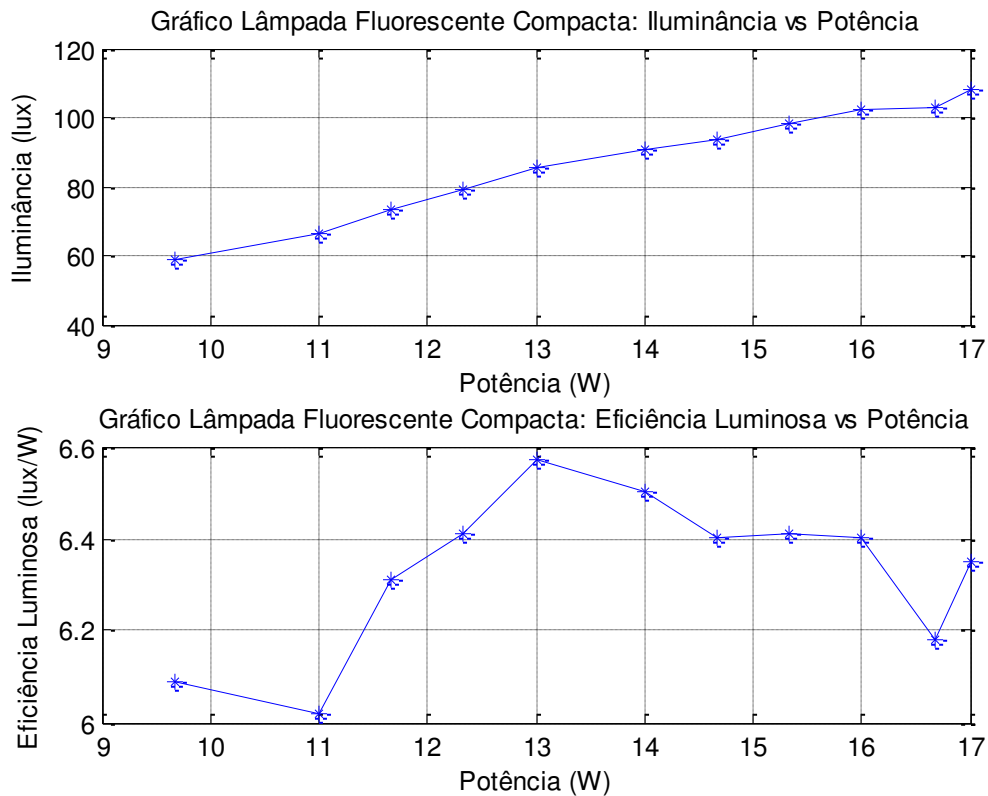


Figura 26 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

2.3.2 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8

A Lâmpada fluorescente tubular bulbo T8 utilizada neste estudo apresenta as seguintes características:

- Fabricante: EMPALUX
- Potência ativa: 20 W
- Tensão elétrica: 220 V
- Frequência: 60 Hz
- Vida útil: 8000 horas

O processo de funcionamento das lâmpadas fluorescentes tubulares baseia-se em descargas elétricas bruscas para a ionização do gás, formação do arco no ambiente gasoso e excitação do fósforo que reveste o tubo de vidro, sendo que nestas lâmpadas as descargas são geradas a partir de reatores convencionais e do *starter* (TORRES, et al., 2009).

Os mesmos passos utilizados para avaliar a eficiência luminosa da lâmpada no tópico anterior foram aplicados para analisar a eficiência luminosa da lâmpada fluorescente tubular bulbo T8, inclusive a montagem (Ver Figura 25). Os resultados podem ser vistos na Tabela 2 e na Figura 27.

Tabela 2 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8.

Potencial Elétrico (V)	Potência (W)	Iluminância (lux) a 1 m	Eficiência luminosa (lux/W)
120	4,00	134,60	33,65
130	8,00	156,30	19,54
140	10,00	175,00	17,50
150	11,50	191,40	16,64
160	12,50	209,00	16,72
170	13,50	225,60	16,71
180	15,00	240,90	16,06
190	16,00	257,00	16,06
200	17,50	272,30	15,56
210	20,00	289,40	14,47
220	23,00	306,70	13,33

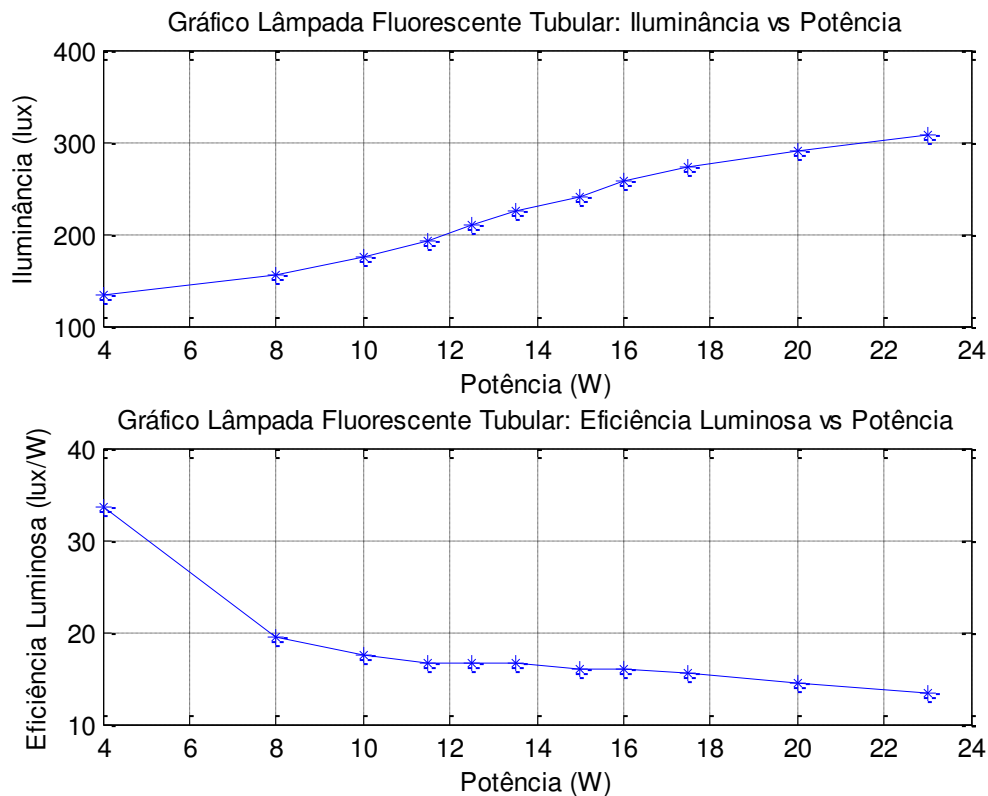


Figura 27 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8.

2.3.3 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada incandescente

A lâmpada incandescente utilizada neste estudo apresenta as seguintes características:

- Fabricante: General Electric
- Tipo: comum
- Potência ativa: 100 W
- Tensão elétrica: 220 V
- Frequência: 60 Hz
- Vida útil: 1000 horas

O processo de funcionamento das lâmpadas incandescentes consiste de um filamento de tungstênio envolvido em uma mistura de gases inertes dentro de um bulbo de vidro. Neste processo, a energia luminosa é obtida pela emissão de radiação de seu filamento, que é levado à incandescência devido à elevação de sua

temperatura, causada pela passagem da corrente elétrica. Por não necessitar de equipamento auxiliar para o seu funcionamento, a lâmpada incandescente pode ser conectada diretamente à rede de distribuição de energia elétrica, desde que submetida ao nível de tensão para o qual foi projetada (TORRES, et al., 2009).

Os mesmos passos utilizados para avaliar a eficiência luminosa da lâmpada no tópico anterior foram aplicados para analisar a eficiência luminosa da lâmpada incandescente, inclusive a montagem (Ver Figura 25). Os resultados podem ser vistos na Tabela 3 e na Figura 28.

Tabela 3 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada incandescente.

Potencial Elétrico (V)	Potência (W)	Iluminância (lux) a 1 m	Eficiência luminosa (lux/W)
120	35,00	19,10	0,546
130	40,00	26,90	0,672
140	44,00	36,50	0,830
150	50,00	48,50	0,970
160	54,00	62,40	1,156
170	60,00	78,40	1,307
180	65,00	98,40	1,514
190	71,00	118,90	1,675
200	77,00	143,20	1,860
210	84,00	170,10	2,025
220	91,00	201,10	2,210

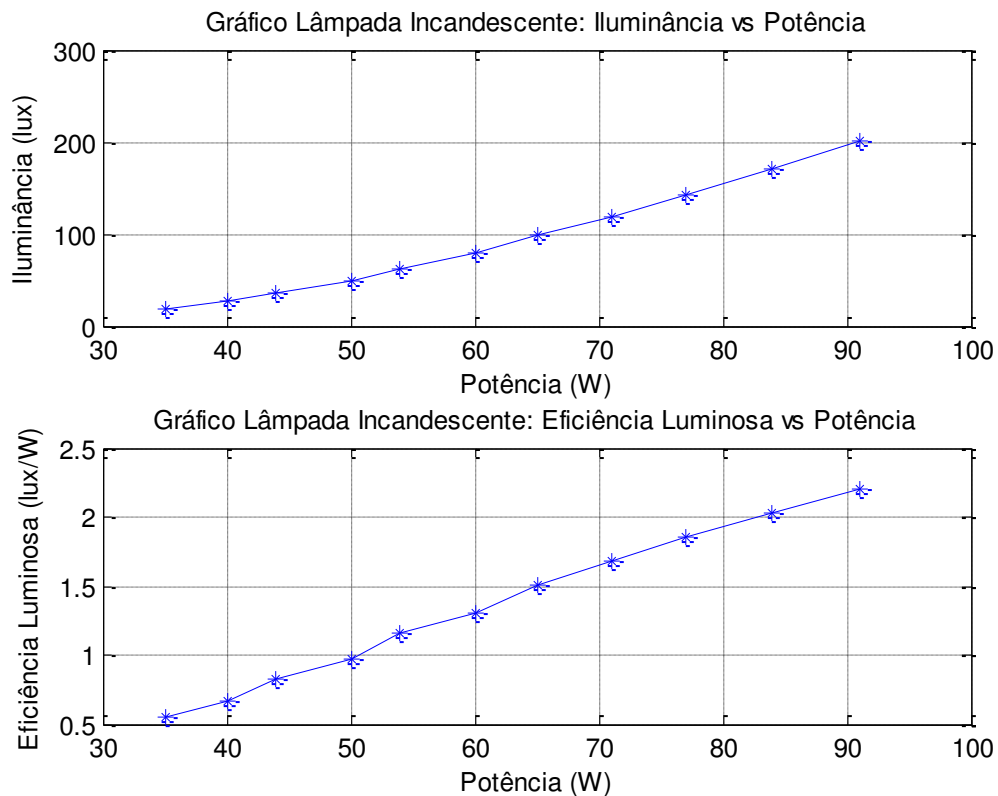


Figura 28 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada incandescente.

2.3.4 – Análise da eficiência luminosa para a lâmpada LED

A lâmpada LED utilizada neste estudo apresenta as seguintes características:

- Fabricante: Golden
- Potência ativa: 2 W
- Tensão elétrica: 220 V
- Frequência: 60 Hz
- Vida útil: 25000 horas
- Quantidade de LED'S: 24

O processo de funcionamento das lâmpadas LED's baseia-se no funcionamento de diodos semicondutores emissores de luz, componente eletrônico que emite luz visível quando energizado, processo este denominado eletroluminescência. Diferentemente da maioria dos componentes eletrônicos, que liberam energia através do calor, no LED o número de fótons da energia luminosa é

suficiente para criar uma fonte de luz bem visível (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

Os mesmos passos utilizados para avaliar a eficiência luminosa da lâmpada no tópico anterior foram aplicados para analisar a eficiência luminosa da lâmpada LED, lembrando que para este caso utiliza-se um TC de relação 10:1 com o objetivo de facilitar a medição da corrente elétrica e da potência ativa por parte do analisador LASSE – 1. A montagem realizada pode ser vista na Figura 29 e os resultados estão presentes na Tabela 4 e na Figura 30.

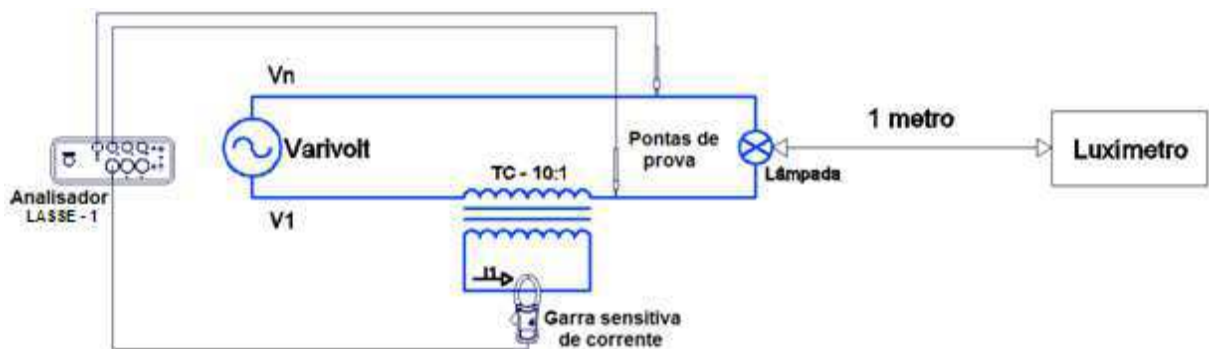


Figura 29 – Montagem para análise da lâmpada LED.

Tabela 4 – Dados mensurados de Potência (W), Iluminância (lux) e Eficiência luminosa (lux/W) para cada nível de Potencial Elétrico (V), para a lâmpada LED.

Potencial Elétrico (V)	Potência (W)	Iluminância (lux) a 1 m	Eficiência luminosa (lux/W)
120	0,567	175,60	309,70
130	0,633	208,20	328,81
140	0,733	237,10	323,46
150	0,833	266,50	319,93
160	0,933	294,60	315,75
170	1,033	320,90	310,65
180	1,133	349,10	308,12
190	1,233	373,80	303,16
200	1,333	402,50	301,95
210	1,500	427,60	285,07
220	1,600	450,00	281,25

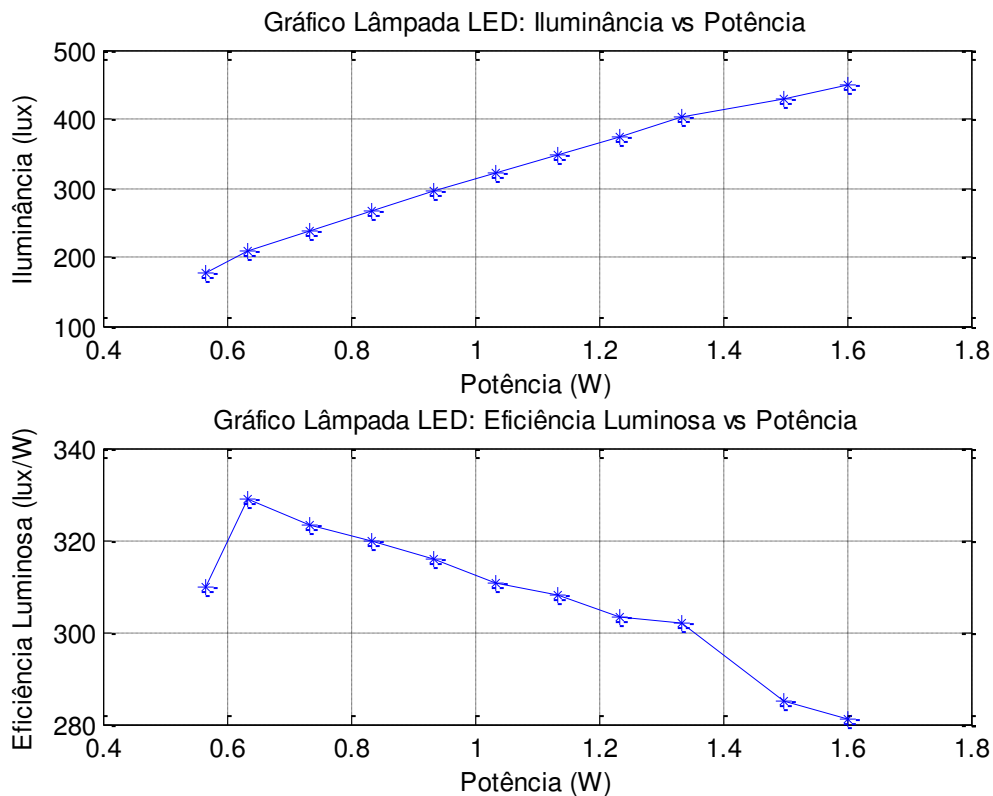


Figura 30 – Gráfico Iluminância (lux) versus Potência (W) e Eficiência luminosa (lux/W) versus Potência (W) para a lâmpada LED.

Avaliando os resultados de eficiência luminosa para cada tipo de lâmpada analisada, verifica-se que a lâmpada LED é a que apresenta o maior valor deste parâmetro, sendo este valor, na tensão nominal, 21,10, 44,29 e 127,26 vezes superior às lâmpadas fluorescente tubular, compacta e incandescente, respectivamente. A lâmpada incandescente é a que apresenta a menor eficiência luminosa devido a sua elevada potência nominal, ficando evidente a desvantagem do uso desta lâmpada frente às demais, quando a comparação se dá pelo enfoque da eficiência luminosa. A lâmpada fluorescente tubular apresentou uma eficiência luminosa 2,10 e 6,03 vezes maior do que a eficiência da lâmpada fluorescente compacta e a incandescente, respectivamente, na tensão nominal, se mostrando a segunda melhor opção quando a eficiência luminosa for o parâmetro analisado.

2.3.5 – Análise de Eficiência Energética, Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH), Fator de Potência (FP) e Custos

O parâmetro utilizado para avaliar a eficiência energética de cada lâmpada foi a energia elétrica consumida, considerando a utilização diária de 4 horas em cinco anos e a vida útil fornecida pelo fabricante para cada tipo de lâmpada. Com estes dados, pode-se avaliar também os custos com a energia elétrica consumida e o de aquisição das lâmpadas, além do número de lâmpadas necessárias ao final destes 5 anos.

Utilizando a bancada de testes, foi realizada uma montagem monofásica a 2 fios ($1\Phi 2W$) e a potência ativa consumida, a forma de onda de tensão e corrente elétrica, a TDH e os harmônicos de tensão e corrente elétrica para cada tipo de lâmpada foi mensurada com o analisador de energia elétrica LASSE – 1, aplicando na entrada a tensão de alimentação da instalação elétrica do laboratório LASSE. Os dados de potência ativa medida para cada lâmpada e os seus custos finais podem ser verificados na Tabela 5. Observa-se nesta tabela que a tensão de alimentação é um pouco superior ao seu valor nominal (220,0 V).

Tabela 5 – Análise de eficiência energética e dos custos para cada tipo de lâmpada.

	Incandescente	Fluorescente compacta	Fluorescente tubular	LED
Tensão elétrica medida (V)	224,1	222,5	224,4	224,5
Potência ativa medida (W)	98,5	18,17	23,0	1,65
*Tempo de vida (horas)	1000	4000	8000	25000
Utilização diária (horas)	4	4	4	4
Consumo de Eletricidade (em 5 anos)	719,05 kWh	132,62 kWh	167,90 kWh	12,045 kWh
**Custo da energia elétrica consumida	232,17	42,82	54,21	3,89
N° de lâmpadas necessárias nos 5 anos	8 (restando 700 horas de uso)	2 (restando 701,16 horas de uso)	1 (restando 700 horas de uso)	1 (restando 17700 horas de uso)
Custo (R\$/lâmpada)	1,50	6,40	19,02***	18,90
Custo com aquisição das lâmpadas (R\$) nos cinco anos	12,00	12,80	19,02	18,90
Custo total (R\$)	244,17	55,62	73,23	22,79

* Duração com base no uso médio residencial de 1000 horas/ano, em tensão elétrica eficaz constante.

** 1 kWh ao custo de R\$ 0,32289.

*** No custo da lâmpada fluorescente tubular está incluso o valor do reator eletromagnético (R\$ 12,63), do starter (R\$ 0,89) e da lâmpada (R\$ 5,50).

Analisando os resultados na Tabela 5, verifica-se que apesar de as lâmpadas incandescentes apresentarem o menor custo de aquisição entre as lâmpadas analisadas, o seu consumo de eletricidade é bem superior e, conseqüentemente, o seu custo ao final dos cinco anos é elevado, o que não compensa o seu uso. Em contrapartida, a lâmpada LED possui um custo de aquisição de 12,6 vezes superior as incandescentes, mas o custo total ao final dos cinco anos de uso diário de 4 horas é 10,71 vezes inferior, o que justifica o investimento nas lâmpadas LED, considerando que ao final dos cinco anos ainda restará cerca de 17700 horas de uso.

As lâmpadas fluorescentes compactas e tubulares apresentam custo total de 4,39 e 3,33 inferiores, respectivamente, ao custo total das lâmpadas incandescentes, e desta forma, junto com as lâmpadas LED, se mostram como uma boa alternativa para substituir as incandescentes, que ainda representam 40 % das lâmpadas vendidas no país, mas são menos econômicas. Desta forma, a utilização das lâmpadas LED, fluorescentes compactas e tubulares reduz o consumo de energia elétrica, contribuindo assim para a conservação de energia e ambiental, reduzindo a necessidade de construção de novas usinas geradoras de eletricidade, diminuindo os impactos ecológicos e sociais, no caso de usinas hidrelétricas, e menor consumo de fontes de energia e emissão de poluentes, no caso de usinas termelétricas, devido à queima de combustíveis, como o dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO_2), poluentes responsáveis pela chuva ácida e pelo efeito estufa.

Os resultados obtidos da TDH e harmônicos e o fator de potência (FP) para cada tipo de lâmpada foram os seguintes:

a) Lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado

Para melhorar a análise, foram utilizadas, em paralelo, seis lâmpadas fluorescentes compactas com reator integrado numa mesma fase, com o objetivo de aumentar a corrente elétrica de linha e assim facilitar a visualização de sua forma de

onda. As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre as lâmpadas fluorescentes compactas podem ser vistas na Figura 31. Na Figura 32 pode ser visto o espectro de frequência da corrente elétrica.

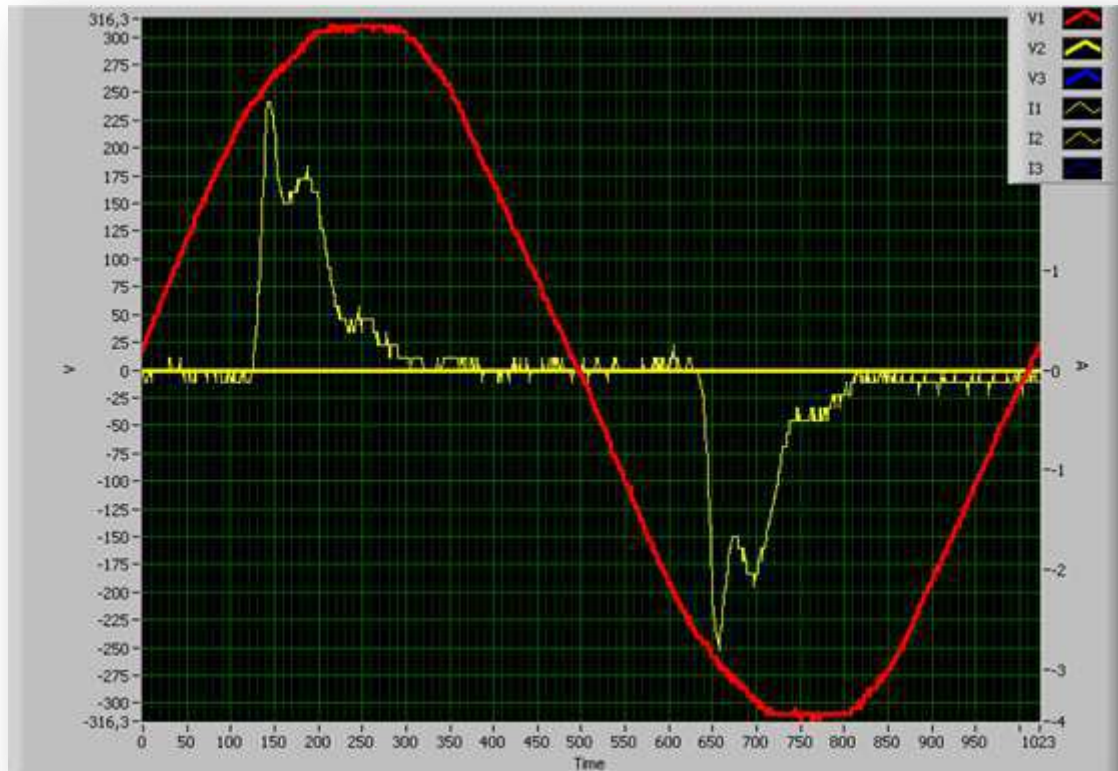


Figura 31 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

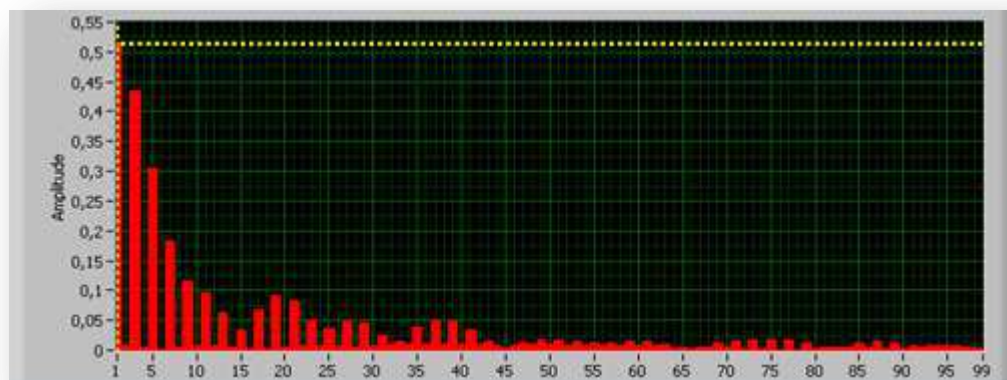


Figura 32 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

Para a lâmpada fluorescente compacta, o fator de potência, que designa a defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente elétrica, foi igual a 0,61. Os valores da TDH da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre as lâmpadas fluorescentes compactas, além dos valores eficazes de tensão e corrente de cada harmônica estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico integrado.

	TDH (%)	Harmônicas (tensão e corrente eficazes)									
		1*	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
Tensão de alimentação	2,2	222,1	0,5	2,1	0,2	4,2	0,2	0,9	0,1	0,8	0,0
Corrente elétrica	115,7	0,492	0,0	0,404	0,0	0,278	0,0	0,187	0,0	0,143	0,0

* Fundamental

b) Lâmpada LED

Para melhorar a análise, foram utilizadas quatro lâmpadas LED em paralelo numa fase, além de um TC de relação 10:1 com o objetivo de facilitar a visualização da forma de onda da corrente elétrica que percorre a lâmpada LED. As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica, além do espectro de frequência da corrente podem ser vistas nas Figuras 33 e 34, respectivamente, levando-se em consideração que os valores de corrente presente nestas Figuras estão multiplicados por 10.



Figura 33 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada LED.

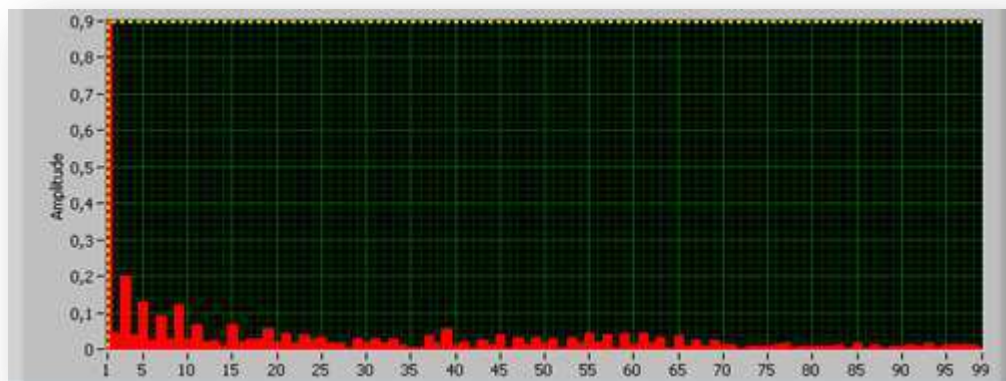


Figura 34 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada LED.

Para a lâmpada LED, o fator de potência foi igual a 0,30. Os valores da TDH da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre as lâmpadas LED,

além dos valores eficazes de tensão e corrente de cada harmônica estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada LED.

	TDH (%)	Harmônicas (tensão e corrente eficazes)									
		1*	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
Tensão de alimentação	2,3	223,8	0,5	2,1	0,4	4,6	0,2	0,9	0,2	0,8	0,1
Corrente elétrica	36,4	0,091	0	0,023	0,0	0,012	0,0	0,012	0,0	0,0	0,0

* Fundamental

c) Lâmpada fluorescente tubular bulbo T8

As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente tubular bulbo T8 podem ser vistas na Figura 35. Na Figura 36 pode ser visto o espectro de frequência da corrente elétrica.



Figura 35 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada fluorescente tubular.

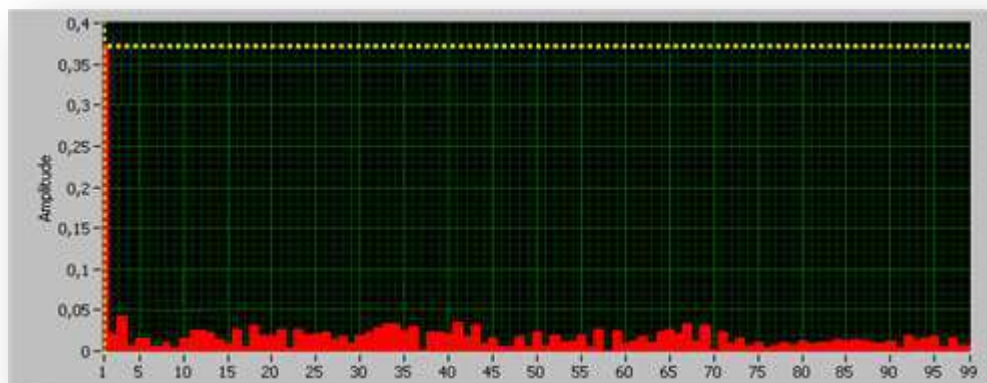


Figura 36 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente tubular.

Para a lâmpada fluorescente tubular, o fator de potência foi igual a 0,23. Os valores da TDH da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre a lâmpada fluorescente tubular, além dos valores eficazes de tensão e corrente de cada harmônica estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada fluorescente tubular.

	TDH (%)	Harmônicas (tensão e corrente eficazes)									
		1*	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
Tensão de alimentação	2,4	224,8	0,5	2,0	0,3	5,0	0,2	1,0	0,1	0,9	0,0
Corrente elétrica	19,9	0,385	0,0	0,042	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

* Fundamental

d) Lâmpada Incandescente

Para melhorar a análise, foram utilizadas, em paralelo, duas lâmpadas incandescentes numa mesma fase, com o objetivo de aumentar a corrente elétrica de linha e assim facilitar a visualização de sua forma de onda. As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre as lâmpadas incandescentes podem ser vistas na Figura 37. Na Figura 38 pode ser visto o espectro de frequência da corrente elétrica.



Figura 37 – Formas de onda da tensão de alimentação e da corrente elétrica para a lâmpada incandescente.



Figura 38 – Espectro de frequência da corrente elétrica que percorre a lâmpada incandescente.

Para a lâmpada incandescente, o fator de potência foi igual a 0,99. Os valores da TDH da tensão de alimentação e da corrente elétrica que percorre a lâmpada

incandescente, além dos valores eficazes de tensão e corrente de cada harmônica estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – TDH e harmônicas da tensão de alimentação e corrente elétrica para a lâmpada incandescente.

	TDH (%)	Harmônicas (tensão e corrente eficazes)									
		1*	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
Tensão de alimentação	2,3	224,1	0,6	1,9	0,4	4,8	0,1	0,9	0,2	0,9	0,1
Corrente elétrica	5,8	0,864	0,0	0,014	0,0	0,015	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

* Fundamental

Analisando os resultados da TDH e das harmônicas da corrente elétrica para cada tipo de lâmpada presentes nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, verifica-se que a lâmpada fluorescente compacta é a que apresentam uma maior TDH, devido os circuitos eletrônicos que compõe o seu reator, e apesar de ser mais econômica do que as lâmpadas incandescentes e fluorescentes tubulares de reator convencional, o seu uso em larga escala compromete a qualidade da energia elétrica do sistema onde elas são empregadas, devido ao surgimento de distorções indesejadas nas formas de onda da corrente e tensão da rede elétrica, distorções estas compostas da soma de frequências múltiplas ou submúltiplas da fundamental (60 Hz), conhecidas como harmônicos.

A presença destas distorções nos sistemas elétricos pode causar diversos inconvenientes, como queima de motores e mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, por exemplo. Em termos comparativos, pode-se verificar nas Figuras 32 e 36 a diferença de espectro existente entre uma lâmpada fluorescente que utiliza um reator eletrônico, composto de muitas harmônicas de elevada magnitude, e uma que utiliza um reator convencional.

Assim, as lâmpadas fluorescentes compactas causam distorções na forma de onda da corrente na rede elétrica, o que, em baixos níveis, pode não caracterizar um problema, como se pode verificar no baixo valor da TDH (2,2%) para a tensão de

alimentação (Tabela 6). No entanto, em níveis mais elevados, a circulação dessa corrente em elementos resistivos originará tensões que, somadas à fundamental, provocarão distorções na tensão fornecida. Esta situação pode caracterizar-se quando há um grande número de lâmpadas fluorescentes compactas na instalação elétrica considerada (TORRES, et al., 2009).

A lâmpada que possui o menor valor de fator de potência é a lâmpada fluorescente tubular, ou seja, nesta lâmpada a defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente elétrica são maiores devido à presença do reator (fortemente indutivo). As lâmpadas incandescentes, quando em regime térmico permanente, apresentam-se como uma resistência linear e constante, e com isso, o seu fator de potência é próximo da unidade (0,99), propriedade esta que pode ser vista como uma vantagem sobre as demais lâmpadas analisadas.

Outra análise que pode ser realizada é a forma de onda da tensão da rede elétrica do LASSE, que não se apresenta perfeitamente senoidal, conforme pode ser provado pela taxa de distorção harmônica total de 2,4 % e pelo espectro de frequência da mesma (Figura 18). Isto se deve ao fato do transformador de distribuição do bloco onde se localiza o LASSE ter sido projetado para operar em sua zona de saturação. A explicação para este caso pode ser efetuada utilizando-se a expressão (2), expressão esta de importância fundamental no projeto de um transformador e aplicada quando o mesmo está submetido à tensão senoidal.

$$V_1 = 4,44N_1SfB_m \quad (2)$$

Onde:

V_1 = valor eficaz nominal da tensão no primário;

N_1 = número de espiras do enrolamento primário;

S = área da seção reta do núcleo magnético;

f = frequência de operação;

4,44 = fator de forma multiplicado por quatro;

B_m = indução de pico, normalmente escolhido no ponto de joelho da curva de magnetização B – H do material. Para transformadores com núcleo de liga de ferro-

silício de grãos orientados (FeSi GO) (transformadores de rede elétrica), o valor típico de B_m é de 1,5 T.

Como os valores de V_1 , f e de B_m são conhecidos, pode-se determinar o produto NS relacionado a cada enrolamento do transformador. Assim, para que o transformador projetado não opere na região de saturação e desta forma não distorça a forma de onda da tensão de alimentação, o projetista tem que aumentar o produto NS , ou seja, ele tem que aumentar a quantidade de cobre utilizado nos enrolamentos e a quantidade de FeSi GO utilizado no núcleo, tendo como consequência aumento no custo de fabricação do transformador. Para evitar o aumento deste custo é que estão sendo fabricados transformadores em grande escala com quantidade insuficiente de cobre e FeSi GO, fazendo com que estes transformadores não operem em sua região linear prejudicando a qualidade da tensão elétrica de distribuição.

2.4 – Isolamento de sensores de corrente por uso de núcleos de ligas nanocristalinas

2.4.1 – Amplificadores de Instrumentação

Um amplificador de instrumentação, também conhecido por *in-amp* (*instrumentation amplifier*) é um elemento essencial em qualquer sistema de aquisição de sinais de pequena amplitude. O termo “amplificador de instrumentação” denota um amplificador que executa uma conversão de um sinal diferencial na entrada para um sinal de saída simples com um ganho precisamente definido (DAL FABBRO, 2002).

Uma característica importante da conexão diferencial é que os sinais, quando são opostos nas entradas mais (não-inversora) e menos (inversora), são altamente amplificados, enquanto um sinal comum às entradas é apenas suavemente amplificado – a operação amplifica o sinal diferença enquanto rejeita o sinal comum às duas entradas. Uma vez que em geral o ruído (qualquer sinal de entrada não desejado) é comum a ambas as entradas, a conexão diferencial tende a atenuar esta entrada indesejada enquanto fornece uma saída amplificada do sinal diferença

aplicado às entradas. Esta característica operacional é denominada rejeição de modo-comum (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

Assim, de modo a realizar uma perfeita conversão de entrada diferencial para saída simples, um amplificador de instrumentação ideal deve ter a habilidade de amplificar apenas sinais de modo diferencial, ou seja, amplificar somente a diferença entre os sinais presentes nas entradas. Para tanto, a componente de modo-comum aos sinais de entrada deve ser completamente rejeitada, característica esta que todo amplificador de instrumentação deve primar por apresentar. Assim, o termo Razão de Rejeição de Modo-Comum, ou simplesmente RRMC (*Common Mode Rejection Ratio*), descreve quantitativamente esta característica do amplificador. A RRMC é normalmente expressa em decibéis (dB) e é dada pela razão entre o ganho do amplificador para sinais diferenciais (A_d) e o ganho para sinais de modo-comum (A_c), conforme visto nas expressões (3) e (4) (DAL FABBRO, 2002).

$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} \quad (3)$$

$$RRMC_{dB} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} \quad (4)$$

A partir da estrutura de um amplificador operacional (amp-op) básico (Figura 39) é apresentado a seguir o método para se calcular o ganho diferencial (A_d) e ganho de modo-comum (A_c) de um amplificador, sabendo-se que a diferença entre um amplificador operacional e um amplificador de instrumentação é que este deve ser capaz de rejeitar sinais de modo-comum a uma taxa de 90,0 dB, aproximadamente. Outra diferença básica é que aos amplificadores operacionais, uma malha de realimentação deve ser incorporada para que eles operem de forma controlada, ao passo que os amplificadores de instrumentação já são estruturas intrinsecamente realimentadas (DAL FABBRO, 2002).

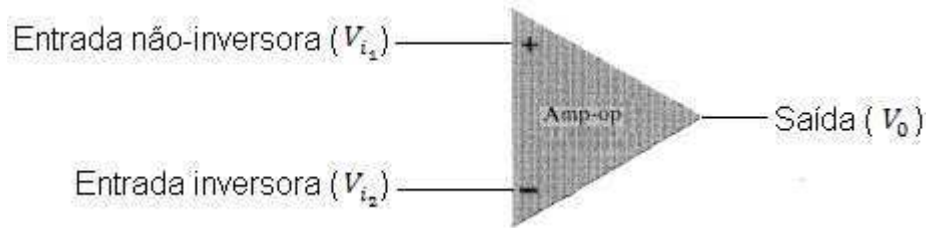


Figura 39 – Amplificador operacional básico.

Quando entradas separadas são aplicadas ao amplificador operacional, o sinal diferença resultante (tensão diferença (V_d)) é a diferença entre as duas entradas (expressão 5). Quando os sinais são iguais, o sinal comum às duas entradas (tensão comum (V_c)) pode ser definido como a média aritmética entre os dois sinais (expressão 6) (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

$$V_d = V_{i_1} - V_{i_2} \quad (5)$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) \quad (6)$$

Como qualquer sinal aplicado a um amplificador operacional possui em geral, componentes em fase e defasados, a saída resultante pode ser expressa como:

$$V_0 = A_d V_d + A_c V_c \quad (7)$$

Para medir A_d e A_c , utiliza-se a operação modo-diferencial e a modo-comum. Na operação modo-diferencial (Figura 40), faz-se $V_{i_1} = -V_{i_2}$, tal que:

$$V_d = V_{i_1} - V_{i_2} = 2V_{i_1} \quad (8)$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = 0 \quad (9)$$

Sob essas condições, a tensão de saída é:

$$V_0 = A_d V_d + A_c V_c = A_d V_d \therefore A_d = \frac{V_0}{V_d} \quad (10)$$

Desta forma, entende-se por ganho de modo-diferencial como a razão entre a variação na tensão de saída pela variação na tensão de modo diferencial na entrada.

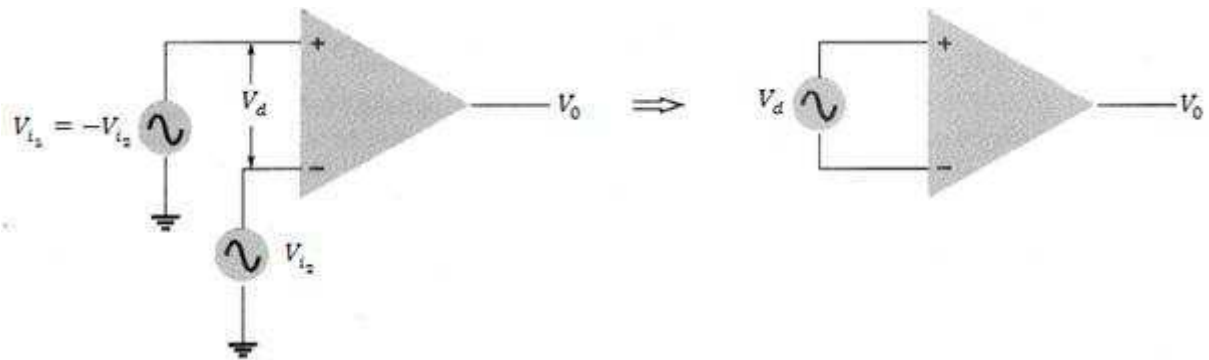


Figura 40 – Operação modo-diferencial.

Na operação modo-comum (Figura 41), faz-se $V_{i1} = V_{i2}$, tal que:

$$V_d = V_{i1} - V_{i2} = 0 \quad (11)$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) = V_{i1} \quad (12)$$

Sob essas condições, a tensão de saída é:

$$V_0 = A_d V_d + A_c V_c = V_c A_c \therefore A_c = \frac{V_0}{V_c} \quad (13)$$

Desta forma, entende-se por ganho de modo-comum como a razão entre a variação na tensão de saída pela variação na tensão de modo-comum na entrada.

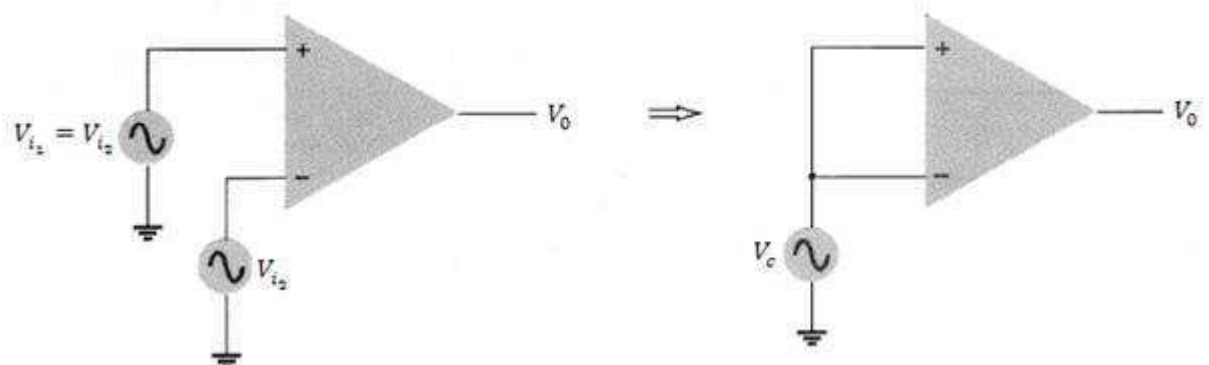


Figura 41 – Operação modo-comum.

Com os valores de ganho de modo-diferencial (A_d) e de modo-comum (A_c) calculados, pode-se aplicá-los nas expressões (3) e (4) para calcular a RRMC, tanto

em termos aritméticos quanto em logarítmicos (dB), sendo que a situação favorável ocorre quando A_d é muito grande e A_c muito pequeno, isto é, as componentes do sinal de polaridades opostas aparecerão muito amplificadas na saída, enquanto as componentes do sinal que estão em fase se cancelam em grande parte. Idealmente, o valor da RRMCM é infinito. Na prática, quanto maior o valor de RRMCM, melhor a operação do circuito e mais próxima a tensão de saída está da diferença das entradas vezes o ganho diferencial, com o sinal de modo-comum sendo rejeitado (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

Em geral, para ser definido como amplificador de instrumentação, um amplificador deve apresentar uma RRMCM superior a 80,0 dB, ou seja, um ganho para sinais diferenciais pelo menos 10 mil vezes o ganho para sinais de modo-comum. Isto significa que na leitura de um sinal de amplitude de 1,0 mV na presença de um sinal de modo comum com 1,0 V de amplitude, um amplificador de instrumentação apresentando uma RRMCM = 100,0 dB, cometerá um erro de 1% na medida (DAL FABRO, 2002).

Um amplificador de instrumentação construído a partir de amplificadores operacionais é fundamentado numa configuração que se tornou padrão que é a clássica estrutura baseada em três amplificadores operacionais (Figura 42), que se caracteriza por apresentar as resistências R e R_1 bem casadas, assim como as impedâncias das entradas V_1 e V_2 , que além de casadas devem ser altas, o que facilita a rejeição de modo-comum do circuito, visto que, caso contrário, uma determinada tensão aplicada igualmente nas entradas, correntes diferentes fluirão por elas produzindo uma tensão não-nula de saída (DAL FABRO, 2002).

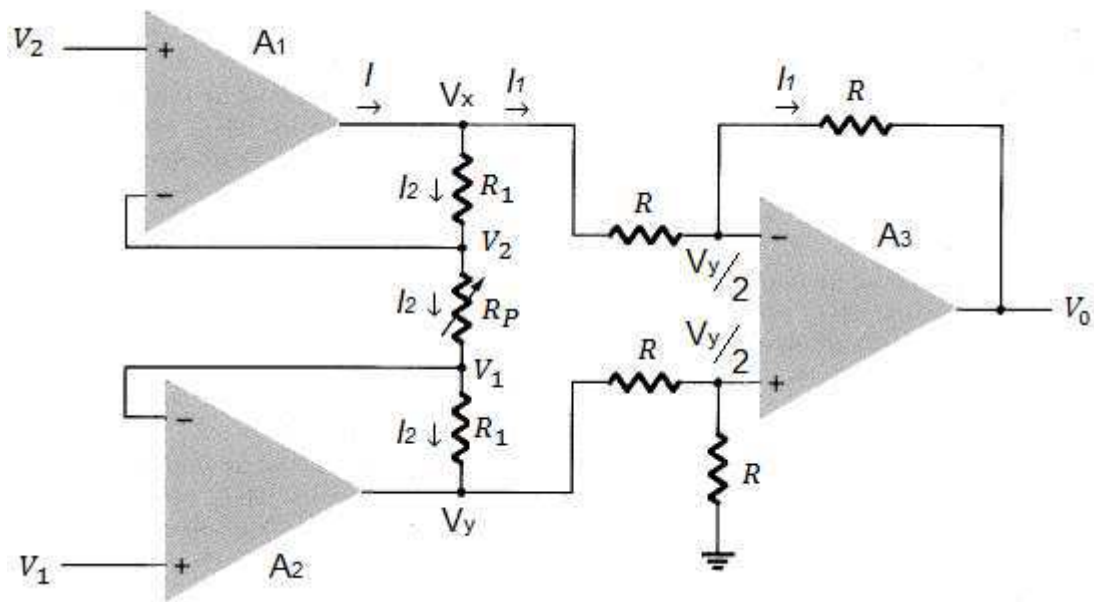


Figura 42 – Configuração clássica de um amplificador de instrumentação formado por 3 amplificadores operacionais.

O circuito visto na Figura 42 apresenta dois estágios: o primeiro, formado pelos amplificadores operacionais A_1 e A_2 e pelas resistências R_1 e R_P (resistência de ajuste do ganho do amplificador de instrumentação); o segundo, formado pelo amplificador operacional A_3 e pelas resistências R , que constituem um circuito subtrator operando com ganho unitário para sinais de modo-diferencial (todas as resistências são iguais) (DAL FABRO, 2002).

A seguir, demonstra-se a expressão da tensão de saída (V_0) do circuito (Figura 42):

1º passo: o estágio de entrada apresenta impedâncias altas e casadas em suas entradas, características estas conferidas pelos amplificadores A_1 e A_2 . Quando um sinal diferencial V_d é aplicado entre as entradas do circuito, a tensão V_d é imposta sobre a resistência R_P .

$$V_d = V_2 - V_1 = R_P I_2 \quad (14)$$

2º passo: como as impedâncias de entrada dos amplificadores são altas, a corrente I_2 percorre as resistências R_1 e R_P e a corrente I_1 percorre a resistência R , de modo que:

$$I_2 = \frac{V_2 - V_1}{R_P} = \frac{V_1 - V_y}{R_1} = \frac{V_x - V_2}{R_1} \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{V_x - \frac{V_y}{2}}{R} = \frac{\frac{V_y}{2} - V_0}{R} \quad (16)$$

3º passo: da expressão (15) obtém-se as expressões (17) e (18), e da expressão (16) obtém a expressão (19), respectivamente.

$$V_x = \frac{R_1}{R_P} (V_2 - V_1) + V_2 \quad (17)$$

$$V_y = \frac{R_1}{R_P} (V_1 - V_2) + V_1 \quad (18)$$

$$V_x = V_y - V_0 \quad (19)$$

4º passo: substituindo as expressões (17) e (18) na expressão (19), chega-se ao seguinte resultado:

$$V_0 = \left(1 + \frac{2R_1}{R_P}\right) (V_1 - V_2) \quad (20)$$

Da expressão (20) conclui-se que o sinal diferencial V_d aplicado entre as entradas V_1 e V_2 do circuito passa para o segundo estágio com um ganho dado pelo fator $(1 + 2R_1/R_P)$. Já para sinais de modo-comum, as tensões nas extremidades de R_P serão iguais e não haverá corrente fluindo por R_P . Portanto, os amplificadores operacionais disponibilizarão para o segundo estágio o sinal de entrada de modo-comum com ganho unitário. Cabe ao segundo estágio rejeitar este sinal, passando para a saída somente sinais de modo diferencial (DAL FABBRO, 2002).

Um exemplo de amplificador de instrumentação disponível comercialmente é o INA 101 HP, fabricado pela empresa BURR-BROWN, pertencente à empresa Texas Instruments, que é um dispositivo de alta exatidão projetado para amplificar sinais de baixo nível e aquisição de dados de propósito geral, utilizado nas seguintes

aplicações: instrumentação biomédica, caso de sistemas de aquisição de sinais provenientes de eletroencefalogramas (EEG); condicionadores de sinais de baixo nível que, por exemplo, coletam sinais de termopares, pontes resistivas ou de algum outro tipo de sensor.

O INA 101HP é utilizado no LASSE como parte componente de uma estrutura de um sensor de corrente que apresenta em sua saída, um sinal de tensão proporcional ao sinal de corrente elétrica que é aplicado em seus terminais de entrada. Mais detalhes sobre a estrutura do sensor montado e utilizado no LASSE será mais bem detalhado adiante.

A configuração do INA 101HP é *DIL (dual in-line)*, ou seja, apresentam numa estrutura retangular com duas fileiras paralelas de pinos de conexão, conforme visto na Figura 43. Este amplificador de instrumentação é composto por três amplificadores operacionais de precisão com elevada impedância de entrada (10^{10} Ω) e de resistores de filme metálico que são cortados a laser para que apresentem valores exatos. Estes componentes são integrados em um único circuito integrado monolítico. A estrutura interna do circuito integrado do INA 101HP é visto na Figura 44, estrutura esta semelhante à apresentada na Figura 42.

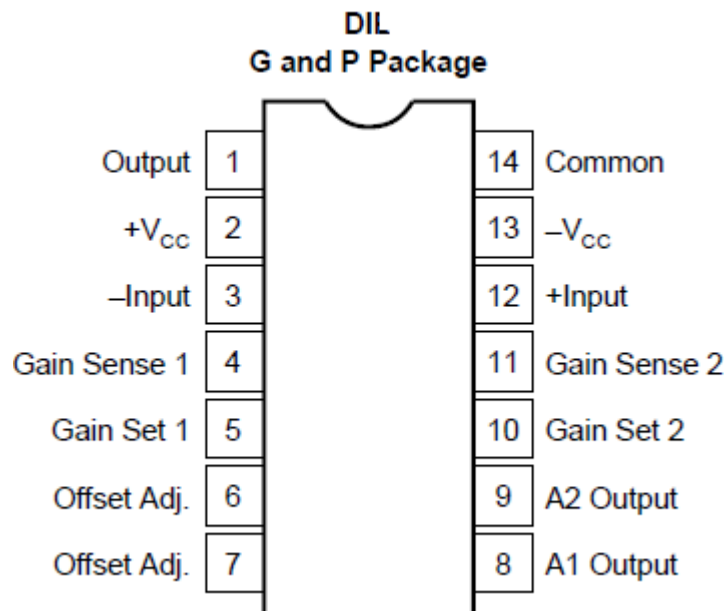


Figura 43 – Configuração do amplificador de instrumentação INA 101HP.

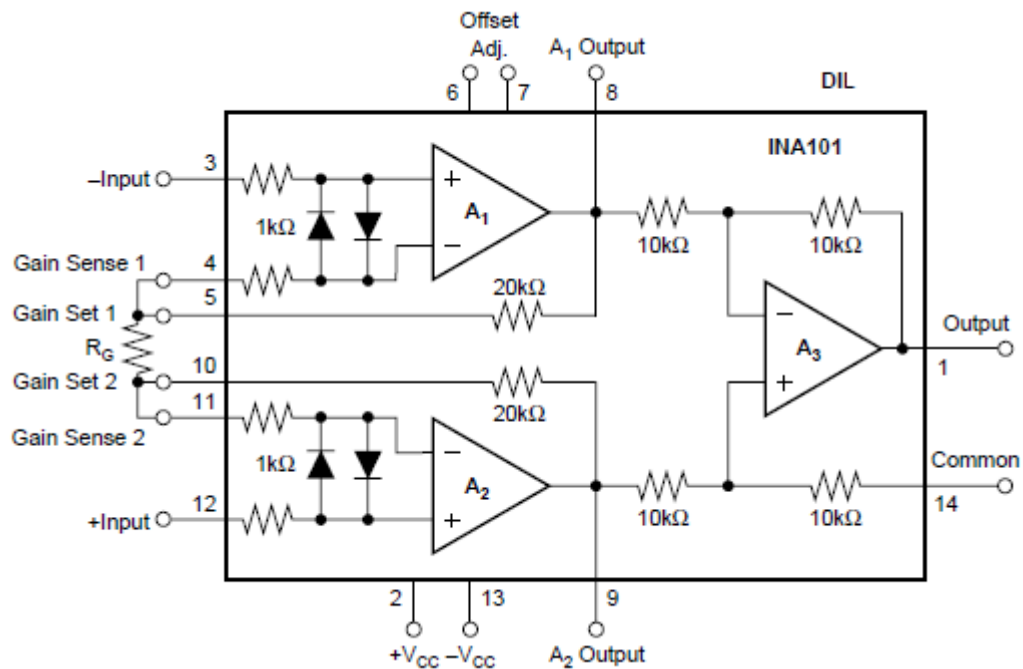


Figura 44 – Estrutura interna do amplificador de instrumentação INA 101HP.

Com base nos valores de resistência presentes na estrutura interna do INA 101 HP e da expressão (20), o ganho deste amplificador de instrumentação é igual a:

$$G = 1 + \frac{40k}{R_G} \quad (21)$$

Onde R_G é a resistência de ajuste do ganho conectado aos pinos 5 e 10 do amplificador (Figura 44). O INA 101 HP apresenta uma RRMCM de 106,0 dB a 60,0 Hz. Para mais detalhes, o *datasheet* do INA 101HP deve ser consultado.

2.4.2 – Ligas Nanocristalinas

As ligas nanocristalinas são materiais magneticamente moles relativamente novos e somente a partir do início da década dos noventa do século XX é que os pesquisadores começaram a explorar as várias potencialidades desta nova classe de materiais policristalinos com tamanho de grãos na ordem de 1 a 100 nm que podem ser obtidos por diferentes processos: condensação de gás inerte, *mechanical alloying*, deposição de plasma, *spray conversion processing*, são alguns dentre outros métodos (LUCIANO, 2010).

As propriedades dos materiais nanocristalinos são geralmente superiores às daquelas dos materiais policristalinos tradicionais, sobretudo no que diz respeito às propriedades eletromagnéticas como alta permeabilidade, baixa força coerciva e resistividade elétrica elevada, o que resulta em baixíssimas perdas por correntes parasitas, além de boa estabilidade térmica e elevado valor indução de saturação, como por exemplo, as ligas nanocristalinas à base de FeSiBPCu que apresentam valores de indução de saturação entre 1,82 e 1,85 T, que fazem das ligas nanocristalinas concorrentes de qualidades iguais ou superiores às ligas *permalloys*, ferrites ou ligas amorfas à base de cobalto (LUCIANO, 2010) , (LUCIANO; CASTRO, 2012).

A combinação das excelentes propriedades magnéticas, elétricas, térmicas e mecânicas dos materiais nanocristalinos sugerem várias aplicações em dispositivos eletroeletrônicos, tais como: produção de núcleos enrolados para atenuação de interferência eletromagnética, componentes para fontes chaveadas, conversores de frequência para acionamento de máquinas elétricas, indutores, sensores de corrente para sistemas de proteção, reatores saturáveis, transformadores para altas frequências, cabeçotes magnéticos e transformadores de corrente (LUCIANO, 2010), (LUCIANO; CASTRO, 2012).

2.4.3 – Descrição do problema

O sensor de corrente utilizado no LASSE apresentava a seguinte estrutura do circuito elétrico:

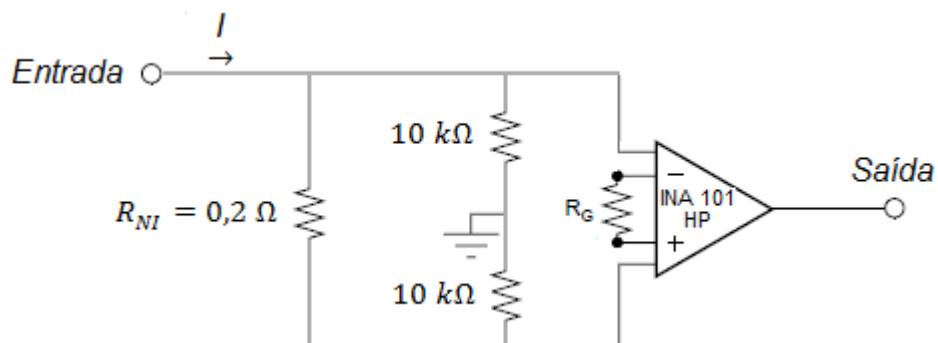


Figura 45 – Estrutura do circuito elétrico do sensor de corrente.

O R_{NI} é um resistor não indutivo de baixa resistência com objetivo de evitar que sua impedância cresça caso a frequência se eleve ou devido à possibilidade de ocorrência de harmônicos, além de aplicar uma pequena tensão de entrada no INA 101 HP. Os resistores de 10 k Ω têm a função de dividir a tensão por igual, com sinais opostos, para que as mesmas sejam aplicadas nas entradas inversoras e não-inversoras do INA 101HP, de tal forma que este amplificador opere no modo de rejeição de modo-comum, ou seja, que o mesmo amplifique o sinal diferencial e rejeite ou atenuar o sinal comum as duas entradas (ruído).

O problema da configuração vista na Figura 45 é a ineficiência de seu isolamento para um elevado valor de corrente elétrica injetado na entrada, o que fez com que ocorresse a queima de diversos amplificadores de instrumentação, que no caso do INA 101 HP o custo é de aproximadamente R\$ 100,00.

2.4.4 – Solução

Pensando em solucionar o problema de isolamento conferido na estrutura do sensor de corrente (Figura 45), algumas modificações foram inseridas.

A primeira mudança foi a aplicação de uma estrutura que garantisse que uma pequena parcela da corrente de entrada percorresse o resistor não indutivo (R_{NI}). A estrutura utilizada foi um pequeno núcleo toroidal de material de liga nanocristalina (Figura 46), fabricado pela empresa MAGMATTEC, cujas dimensões podem ser verificadas na Figura 47. Nesta estrutura foram inseridos dois enrolamentos constituídos de condutores de cobre: o secundário, composto por 300 espiras, cujo condutor apresenta seção transversal pequena devido ao baixo valor de corrente elétrica que o percorre; e o primário, composto por 30 espiras, cujo condutor apresenta seção transversal maior do que o condutor primário, devido à corrente elétrica que o percorre ser mais elevada. Assim, com esta estrutura inserida no sensor, a corrente elétrica que percorre o R_{NI} será dez vezes menor do que a corrente de entrada, ou seja, a função desta estrutura de isolamento é a de um transformador de corrente.



Figura 46 – (a) Núcleo toroidal de liga nanocristalina. (b) Núcleo toroidal de liga nanocristalina com 300 espiras no secundário.

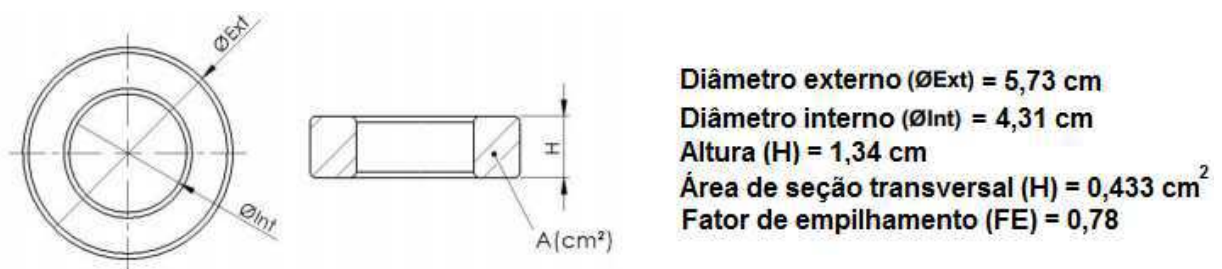


Figura 47 – Dimensões do núcleo toroidal de liga nanocristalina utilizado.

A configuração toroidal é particularmente favorável, pois com essa geometria as linhas de fluxos percorrerão o material magnético numa direção de permeabilidade elevada, sem a presença de entreferros transversais. A vantagem de se utilizar o núcleo de liga nanocristalina é que devido a sua característica magnética de elevada permeabilidade relativa ($\mu_r = 100000$) e baixa força coerciva, a corrente de excitação necessária para estabelecer a densidade de fluxo magnético é pequena, diminuindo assim as perdas no núcleo, que pode ser verificada pela estreita curva de histerese do núcleo de liga nanocristalina utilizado (Figura 48) e desta forma contribui para a boa exatidão do sensor de corrente, além de garantir um bom isolamento do mesmo, protegendo o amplificador INA 101 HP. A indução de saturação (B_s) para o núcleo de liga nanocristalina utilizado é igual a 1,2 T (LUCIANO, et al., 2006).

Curva BH - Corrente Alternada

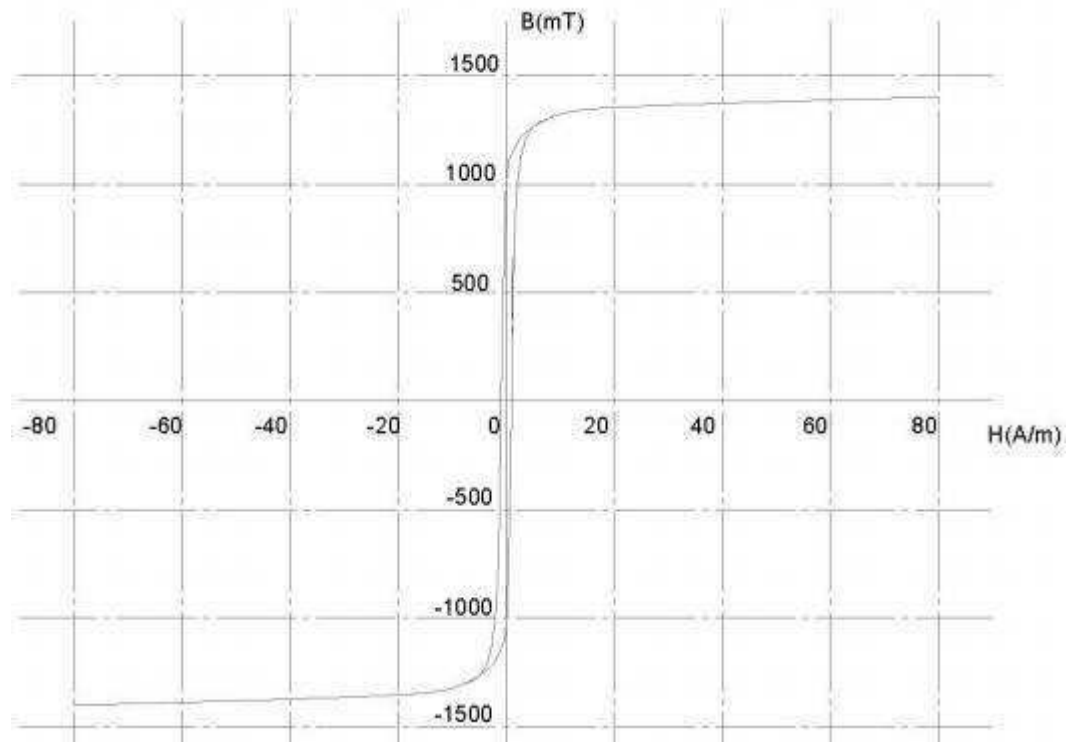


Figura 48 – Curva de histerese (Indução Magnética (B) versus Intensidade do Campo Magnético (H)).

A segunda alteração foi a troca do resistor não indutivo (R_{NI}) por um resistor de $0,33 \Omega$ de $10,0 W$, que realiza a mesma função conferida ao R_{NI} .

Com estas alterações, o circuito elétrico do sensor de corrente passa a ter a seguinte estrutura:

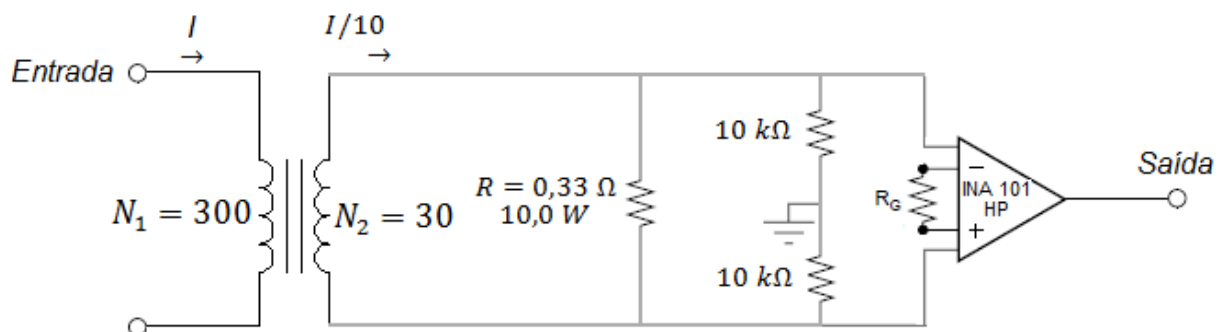


Figura 49 – Estrutura modificada do circuito elétrico do sensor de corrente.

A terceira e última alteração foi a troca da caixa do sensor de corrente por uma maior que coubesse todos os componentes do sensor de corrente, incluindo o novo componente, o núcleo de liga nanocristalina. Todos os componentes foram devidamente transferidos e fixados nesta nova caixa, que pode ser verificada nas Figuras 50, 51 e 52.



Figura 50 - Sensor de corrente.

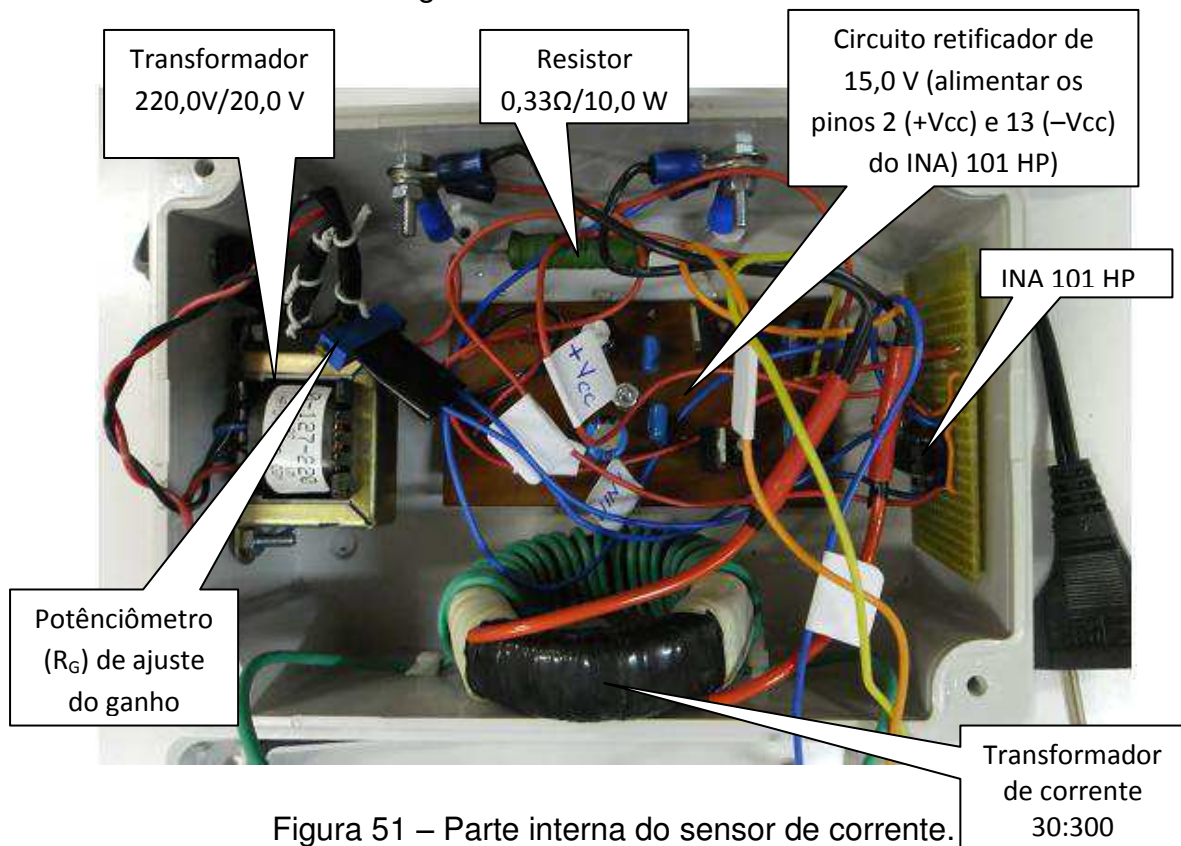


Figura 51 – Parte interna do sensor de corrente.

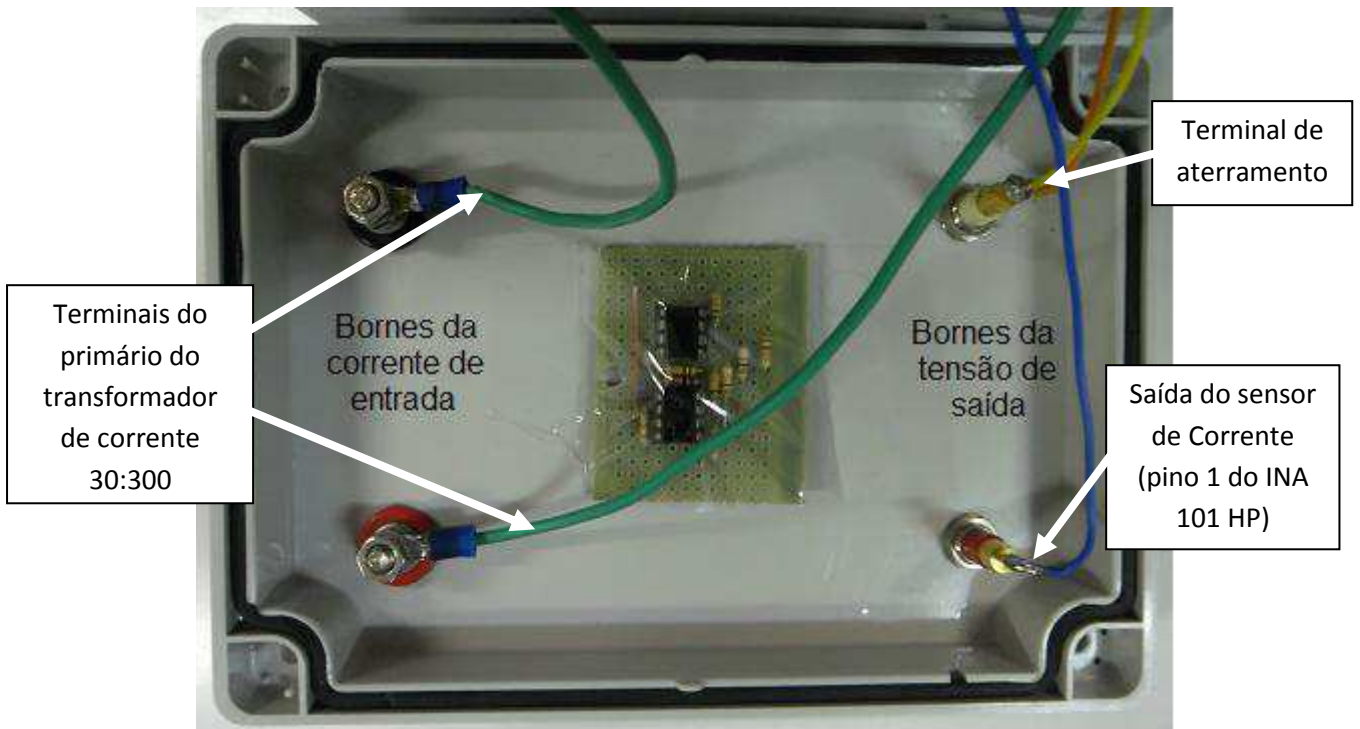


Figura 52 – Parte interna do sensor de corrente.

2.4.5 – Ajuste do ganho e levantamento da curva característica do sensor de corrente

Para o ajuste da relação corrente elétrica de entrada / tensão elétrica de saída do sensor de corrente, realizou-se a seguinte montagem na bancada ELABO A24, localizada no LASSE:

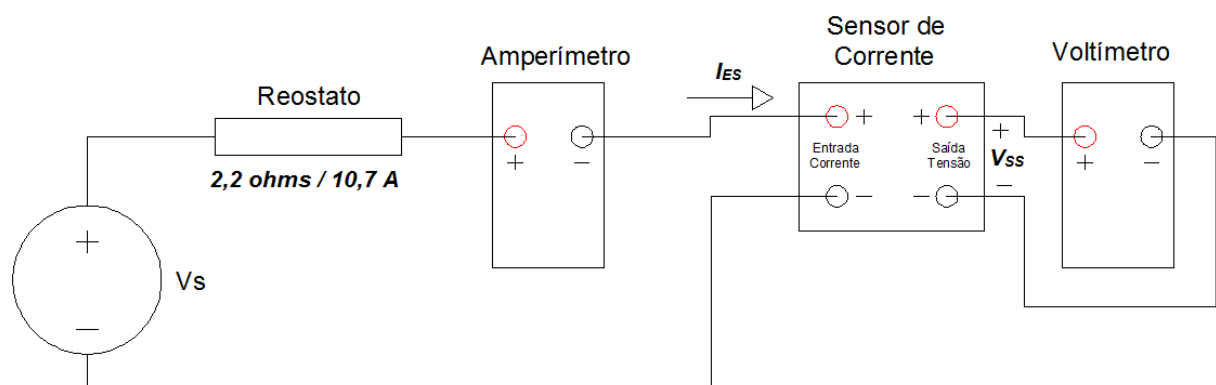


Figura 53 – Montagem para o ajuste do sensor de corrente.

O reostato utilizado na montagem da Figura 53 é de $2,2 \Omega$ e $10,7 \text{ A}$.

A partir da montagem da Figura 53, o ajuste do sensor de corrente foi obtido variando-se o potenciômetro de ganho (R_G) do INA 101 HP, e com auxílio de um voltímetro e um amperímetro, chegou-se a seguinte relação da corrente elétrica de entrada do sensor (I_{ES}) com relação tensão elétrica de saída do sensor (V_{SS}).

$$\frac{I_{ES}}{V_{SS}} \approx \frac{2}{1} \quad (22)$$

O valor de R_G para obtenção da relação contida na expressão (22) foi de $1,962 \text{ k}\Omega$.

Com o sensor de corrente ajustado, realizou-se, utilizando-se ainda da montagem vista na Figura 53, um levantamento dos dados de saída (V_{SS}) variando os dados de entrada (I_{ES}), chegando aos valores vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Levantamento dos dados de entrada (I_{ES}) e de saída (V_{SS}) do sensor de corrente.

Corrente de entrada do sensor (I_{ES}) (A)	Tensão de saída do sensor (V_{SS}) (V)
0,51	0,255
1,05	0,526
1,53	0,763
2,01	1,010
2,50	1,254
3,03	1,524
3,55	1,780
4,02	2,023

Utilizando os dados mensurados contidos na Tabela 10, plota-se, com auxílio do *software MatLab*, o valores medidos da corrente de entrada versus a tensão de saída do sensor, bem como uma reta interpolando os pontos medidos, gerando assim a curva característica do sensor de corrente (Figura 54).

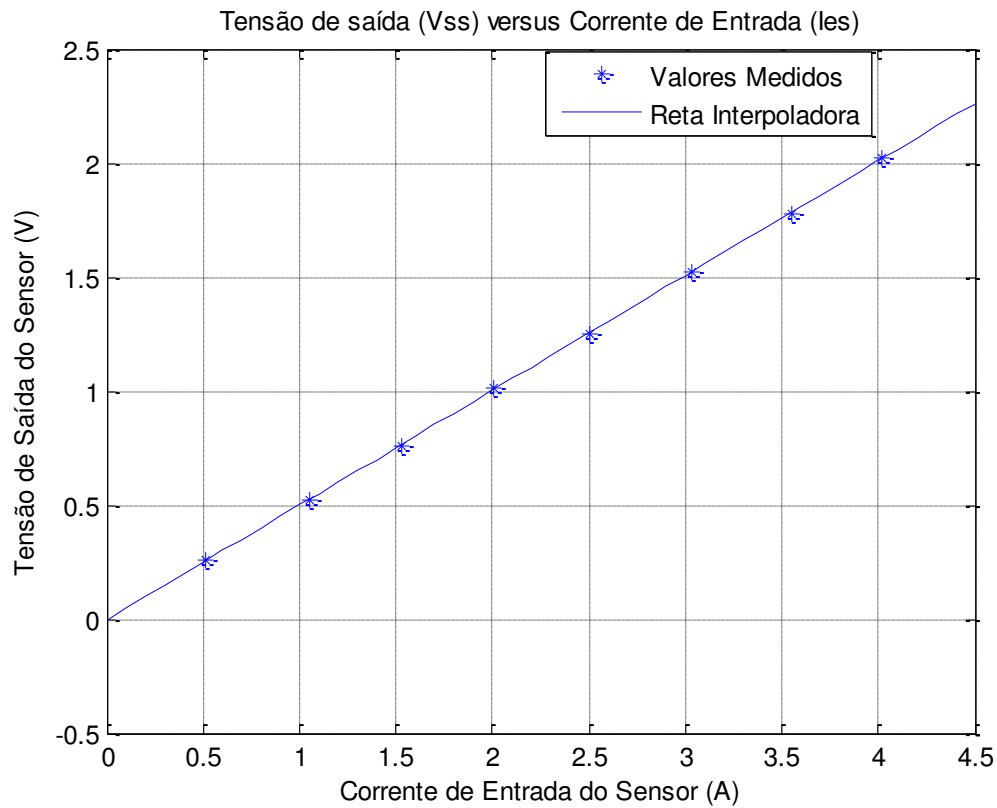


Figura 54 – Curva característica do sensor de corrente.

A reta interpoladora obtida no gráfico contido na Figura 54 apresenta a seguinte expressão:

$$V_{SS} = 0,5034I_{ES} - 0,0033 \quad (23)$$

O coeficiente angular da expressão (23), igual a 0,5034, representa o ganho do sensor de corrente, e o inverso deste ganho se aproxima da relação contida na expressão (22), fato este esperado, pois foi para esta relação que o sensor foi ajustado.

3 – CONCLUSÕES

Neste relatório de estágio foi apresentado as etapas e os resultados das atividades realizadas no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), durante os 4 meses de Estágio Supervisionado realizado no mesmo.

Durante o Estágio Supervisionado foi realizado um estudo comparativo da Qualidade de Energia Elétrica das lâmpadas comercialmente disponíveis e uma aplicação de ligas nanocristalinas no isolamento de um sensor de corrente, atividades estas que demandou a utilização dos equipamentos pertencentes ao laboratório LASSE. Ao fim destes estudos ficou evidenciado que:

- dentre as lâmpadas disponíveis comercialmente, a lâmpada LED é a que melhor se adéqua na questão da busca pela eficiência energética, devido ao seu ao seu baixo consumo de energia elétrica e elevada eficiência luminosa;
- a lâmpada fluorescente compacta, apesar das campanhas governamentais de apoio ao seu uso para diminuir o consumo de energia elétrica, apresenta uma elevada taxa de distorção harmônica total de corrente elétrica, devido os circuitos eletrônicos que compõe o seu reator, o que pode comprometer a qualidade da energia elétrica do sistema onde elas são empregadas em larga escala, podendo ocasionar o mau funcionamento ou até mesmo a queima de equipamentos alimentados por este sistema;
- a lâmpada incandescente, apesar de apresentar elevado valor de fator de potência e baixa taxa de distorção harmônica total, apresenta baixa eficiência luminosa e elevado consumo de energia elétrica, o que inviabiliza a sua utilização, principalmente nos dias atuais quando se busca diminuir o consumo de energia elétrica visando a eficiência energética. Estas características das lâmpadas incandescentes estão fazendo com que a sua fabricação e comercialização deixem de ser realizadas no Brasil até 2016;
- a liga nanocristalina apresentou desempenho satisfatório e esperado devido a aplicação de isolamento do sensor de corrente ser favorável as características magnéticas desta liga, tais como: baixos valores de força coerciva, permeabilidade magnética relativa elevada (na ordem de 100.000), baixas perdas ativas e indução de saturação de 1,2 T;

- com o isolamento do sensor de corrente por uso de um núcleo toroidal de liga nanocristalina, a proteção do amplificador de instrumentação INA 101 HP foi efetuada de forma satisfatória, fazendo com que se evite a queima deste dispositivo eletrônico, com custo aproximado de R\$ 100,00 cada;

Com estes resultados, verifica-se que para contribuir para a tão declamada eficiência energética, além da questão da redução do consumo de energia elétrica, que contribui simultaneamente para a conservação de energia e a conservação ambiental, devido à diminuição do consumo de energia elétrica, reduzindo a necessidade de construção de novas usinas geradoras de eletricidade, diminuindo assim os impactos ecológicos e sociais, o parâmetro da taxa de distorção harmônica total deve ser analisado, pois ele nos dá informações valiosas, indicando o quão distorcido é uma forma de onda de tensão e corrente elétrica quando comparada com uma onda senoidal, distorção esta provocada por cargas de características não-lineares inseridas nas instalações elétricas e que podem causar diversos inconvenientes, como queima de motores e mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, lembrando que, nos sistemas de distribuição, o controle das distorções harmônicas é objetivo tanto das concessionárias de energia elétrica quanto de seus clientes.

4 – REFERÊNCIAS

1. BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 649 p.
2. BURR-BROWN Datasheet High Accuracy Instrumentation Amplifier INA 101. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/BurrBrown/mXryuyt.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2012.
3. DAL FABBRO, P. A. Projeto de um amplificador de instrumentação CMOS integrado. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

4. LUCIANO, B. A. Fundamentos de circuitos magnéticos e transformadores. Campina Grande: DEE/CEEI/UFMG, 2010. 158p.
5. LUCIANO, B. A.; CASTRO, W. B. Ligas nanocristalinas: histórico, desenvolvimento e aplicações eletroeletrônicas. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.7.1, p. 43-47, 2012.
6. LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; LIRA, J. G. A.; FONTGALLAND, G.; CASTRO, W. B. Transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina. *IEEE Latin American Transactions*, 4(3), p. 160-164, 2006.
7. MAGMATTEC Núcleos Toroidais Nanocristalinos – 520. Disponível em: <<http://www.magmattec.com/imagens/repositorio/Datasheet%20N%C3%BAcleos%20Toroidais%20-%20Material%20520%20r1.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2012.
8. TORRES, I. S. M.; SOUSA, F. P. F.; FERREIRA, T. V.; LUCIANO, B. A. Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas: eficiência energética e qualidade de energia elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. p. 1-5, 2010.