

INSTRUMENTAÇÃO PARA UM PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA DE CARGAS ELÉTRICAS EM AUTOMAÇÃO PREDIAL

Por, **Leonardo Almeida Cunha**

Brasília, Abril de 2015



UNIVERSIDADE DE BRASILIA Faculdade de Tecnologia Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INSTRUMENTAÇÃO PARA UM PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA DE CARGAS ELÉTRICAS EM AUTOMAÇÃO PREDIAL

POR,

Leonardo Almeida Cunha

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Lélio Ribeiro Soares Junior, UnB/ ENE (Orientador)	
Prof. Adolfo Bauchspiess, UnB/ ENE	
Prof. Gerson Henrique Pfitscher, UnB/ ENE	

Brasília, Abril de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

CUNHA, LEONARDO ALMEIDA

Instrumentação para um Procedimento de Medição de Potência de Cargas Elétricas em

Automação Predial

[Distrito Federal] 2015.

xiii, 64p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2015). Trabalho de

Graduação - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1.Instrumentação

2. Medição de Energia

3.Automação Predial 4.Eletrônica

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CUNHA, L. A., (2014). Instrumentação para um Procedimento de Medição de

Potência de Cargas Elétricas em Automação Predial. Trabalho de Graduação em

Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 23/2014, Faculdade de

Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Leonardo Almeida Cunha.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Instrumentação para um Procedimento de

Medição de Potência de Cargas Elétricas em Automação Predial.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de

Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e

científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho

de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

iii

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a conclusão desta etapa, em especial à Rebecca, por ter estado sempre ao meu lado, ao Professor Lélio pela oportunidade e pelo apoio e a Deus que nos permite levantar a cada manhã e fazer o hoje diferente do ontem.

Leonardo Almeida Cunha

RESUMO

Neste documento é apresentado um projeto de instrumentação eletrônica para um módulo

de medição de energia/potência, projetado para tensões de 230 V e correntes de 40 A. O

módulo é composto por um circuito de alimentação, um circuito de medição e um circuito de

acoplamento, todos esses subsistemas foram estudados. Foram feitos ensaios em

laboratório antes e após as modificações propostas e os resultados obtidos são

apresentados ao fim do texto.

Palavras chave: Instrumentação, Medição de Energia, Automação Predial, Eletrônica.

ABSTRACT

This document presents an electronic instrumentation design for an energy/power meter

module rated at voltage of 230 V and current of 40 A. The module comprises a power circuit,

a measuring circuit and a coupling circuit, each of these subsystems were studied. Tests

were performed in the laboratory before and after the proposed changes and the results

obtained are shown at the end of the text.

Keywords: Instrumentation, Energy Measurement, Building Automation, Electronics.

٧

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	
1.1 OBJETIVO	2
1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	2
2 REVISÃO TEÓRICA	
2.1 CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA	
2.1.1 Potência ativa	
2.1.2 Potência aparente	
2.1.3 Potência reativa	
2.2 IMPEDÂNCIA	
2.3 EXATIDÃO	5
2.4 PRECISÃO	5
2.5 FILTRO DE MÉDIA MÓVEL	6
3 MATERIAIS	7
3.1 SA9903B	7
3.1.1 Entradas analógicas	
3.1.2 Comunicação SPI	9
3.1.3 Pino FMO – detecção de passagem por zero	9
3.2 OPTOACOPLADOR 6N137	10
3.3 ARDUINO MEGA	11
3.4 AMBIENTE DE TESTE	12
4 ENSAIOS COM A PRIMEIRA VERSÃO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO DE EN	ERGIA14
4.1 ACOMPANHAMENTO DO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO COM OSCILO	OSCÓPIO E
TRANSFORMADOR ISOLADOR	14
4.2 CHAVEAMENTO DOS OPTOACOPLADORES	16
4.3 TESTES DE MEDIÇÃO NO LABORATÓRIO DE CONVERSÃO DE ENE	RGIA18
5 PROJETO E INSTRUMENTAÇÃO PARA REVISÃO DO MÓDULO DE MEDI	ÇÃO DE
ENERGIA	22
5.1 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO	22
5.2 REVISÃO DO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO	23
5.3 REVISÃO DO CIRCUITO DE ACOPLAMENTO	24
5.3.1 Fotoemissor	25
5.3.2 Ligações dos optoacopladores	26

5.3.3 Fotoreceptor	26
5.4 REVISÃO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA	26
5.4.1 Entradas Do Sensor De Corrente	27
5.4.2 Tensão de referência	27
5.4.3 Malha de resistores	28
5.5 REVISÃO DA AQUISIÇÃO DE DADOS	29
6 RESULTADOS	30
6.1 NOVA VERSÃO DO PROTÓTIPO	30
6.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO	31
6.3 ENSAIOS COM O ÓDULO REVISADO	36
6.3.1 Resultados gráficos	38
6.3.2 Análise dos gráficos	41
7 CONCLUSÃO	
7.1 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
7.2 TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS	
I DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E LISTA DE MATERIAIS	49
I.1 Circuito de Alimentaçã	49
I.2 Circuito de Acoplamento	50
I.3 Circuito de Medição	51
I.4 Lista de Materiais	52
II CÓDIGOS	53
II.1 Controle dos Optoacopladores (TesteOptos.ino)	53
II.2 Aquisição (aquisicao_sa9903b_Serial_v2.ino)	54
II.3 Média Móvel (media_movel.m)	56
II.4 Traçado dos Gráficos	56
II.4.1 Plotter2.m	56
II.4.2 createfigure.m	57
III DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	60
III.1 Códigos	60
III.2 Dados	60
III.3 Figuras Relatório	60
III.4 Imagens	60

	III.5 Relatório	60
IV	Resultados dos Ensaios – Gráficos	61
	IV.1 Módulo de Medição de Energia Primeira Versão	61
	IV.2 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada	62
	IV.3 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no	
	código	63
	IV.4 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no Cód	igo e
	Ajuste de Resistores	64

LISTA DE FIGURAS

2.1	Triângulo de potência	4
2.2	Comparativo entre precisão e exatidão	5
3.1	Diagrama de blocos do SA9903B	7
3.2	Divisor de tensão que ajusta o pino IVP	9
3.3	Forma de onda da saída FMO1	0
3.4	Esquemático do circuito integrado do optoacoplador 6n1371	1
3.5	Arduino Mega1	2
3.6	Esquema de ligação do módulo de medição de energia com as cargas do laboratório	
	1	2
3.7	Laboratório de conversão de energia – cargas em ação durante um ensaio1	3
4.1	Circuito de alimentação da primeira versão do módulo de medição de energia1	4
4.2	Esquema de ligação do osciloscópio ao módulo de medição de energia1	5
4.3	Sinal de alimentação fornecido pela fonte positiva em relação ao terra do circuito1	5
4.4	Sinal de alimentação fornecido pela fonte negativa em relação ao terra do circuito1	6
4.5	Circuito de acoplamento da primeira versão do módulo de medição de energia1	7
4.6	Sinal de alimentação fornecido pela fonte positiva com os optoacopladores ativos1	8
4.7	Sinal de alimentação fornecido pela fonte negativa com os optoacopladores ativos1	8
4.8	Esquema de ligação das cargas ao módulo de medição de energia e à bancada1	9
4.9	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com a primeira versão do módulo de	9
medi	ção de energia. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede,	
frequ	uência da rede, potência ativa e potência reativa2	0
5.1	Modelo utilizado para estudo do sistema2	3
5.2	Nova proposta para a fonte de alimentação2	4
5.3	Circuito do fotoemissor	5
5.4	Modelo do circuito do fotoreceptor2	6
5.5	Diagrama esquemático da seção de medição de energia2	7
5.6	Malha de resistores2	8
6.1	Módulo de medição de energia revisado. Montagem provisória em protoboard3	0
6.2	Formas de onda das fontes positiva (acima) e negativa (abaixo), com a fonte desligada	a
dos	demais circuitos3	1
6.3	Formas de onda da fonte positiva conectada ao restante do sistema. Optoacopladores	}
desli	gados acima, e ligados abaixo3	2
6.4	Formas de onda da fonte negativa conectada ao restante do sistema.	
Opto	acopladores desligados acima, e ligados abaixo3	3
6.5	Esquemático de ligação dos optoacopladores de saída, módulo após revisão3	4
6.6	Formas de onda da fonte de alimentação revista, com ligações corretas no circuito de	
acop	lamento3	5

6.7	Detalhe dos multímetros e do wattímetro utilizados para realizar o acompanhamento
dos t	estes
6.8	Ambiente de teste. Acima, ligações feitas entre o protótipo, equipamentos de medição
e a b	ancada. Abaixo, computador coletando os dados37
6.9	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado.
Da es	squerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede,
potêr	ncia ativa e potência reativa38
6.10	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado
e utili	zando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com três 120kΩ. Da esquerda
para	a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e
potêr	ncia reativa39
6.11	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado
e utili	zando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com um 150k Ω e dois 110k Ω .
Da e	squerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede,
potêr	ncia ativa e potência reativa39
6.12	Sobreposição do sinal original com o sinal filtrado para o experimento de potência
Ativa	40
6.13	Sobreposição do sinal original com o sinal filtrado em detalhe, carga resistiva40
I.1	Esquemático do Circuito de Alimentação
1.2	Esquemático do Circuito de Acoplamento50
1.3	Esquemático do Circuito de Medição51
IV.1	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com a primeira versão do módulo de
medi	ção de energia. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede,
frequ	ência da rede, potência ativa e potência reativa. Versão ampliada61
IV.2	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado.
Da es	squerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede,
potêr	ncia ativa e potência reativa. Versão ampliada62
IV.3	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado
e utili	zando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com três 120kΩ. Da esquerda
para	a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e
potêr	ncia reativa. Versão ampliada63
IV.4	Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado
e utili	zando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com um 150k Ω e dois 110k Ω .
Da e	squerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede,
potêr	ncia ativa e potência reativa. Versão ampliada64

LISTA DE TABELAS

3.1	Descrição dos principais pinos do SA9903B.	8
4.1	Características elétricas obtidas da Fig. 4.3	.16
4.2	Sequência das cargas utilizadas no ensaio.	.19
4.3	Parâmetros utilizados no ensaio	.19
4.4	Impedâncias e potências das cargas utilizadas no ensaio	.20
4.5	Valores de tensão, corrente e potência estimados durante o ensaio	.21
5.1	Valores utilizados para as grandezas do circuito do fototransmissor	.25
5.2	Valores dos resistores para o sensor de corrente	.27
5.3	Valores calculados para a corrente no pino IVP em dois cenários	.28
6.1	Médias e desvios-padrão referentes à primeira versão do módulo de medição (Fig.	
4.9).		.41
6.2	Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado (Fig. 6.9)	.42
6.3	Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado com dados em	
ponto	flutuante (Fig. 6.10).	.42
6.4	Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado com dados em	
ponto	o flutuante e malha com dois resistores 110k e um 150k (Fig. 6.11)	.43
l.1	Lista de materiais para montagem do módulo revisado	.52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

P	Potência ativa	
V	Tensão elétrica	[V]
1	Corrente elétrica	[A]
V	Fasor tensão elétrica	[V]
I	Fasor corrente elétrica	[A]
j	Unidade imaginária	
е	Número de Eulor, base dos logaritmos naturais	
Q	Potência reativa	[var]
Z	Impedância	[Ω]
R	Resistência	[Ω]
L	Indutância	[H]
С	Capacitância	[F]
y Sinal digital filtrado		
и	Sinal de entrada do filtro digital	
RSH	Resistência do resistor shunt	[Ω]
f	Frequência	[Hz]

Símbolos Gregos

φ	Defasagem entre a tensão e a corrente elétricas	[rad]
$arphi_V$	Fase da tensão	[rad]
$arphi_I$	Fase da corrente	[rad]
ω	Frequência agular	[rad/s]

Subscritos

med	Valor médio
е	Valor eficaz
série	associação em série
paralelo	associação em paralelo
R	Impedância de um resistor
L	Impedância de um indutor
C	Impedância de um capacitor
ss	Fonte de tensão negativa
dd	Fonte de tensão positiva
rms	Root mean square

max Valor máximo
min Valor mínimo

Sobrescritos

Conjugado complexo

Siglas

IED Intelligent Electronic Device

CA Corrente Alternada

CD Compact Disk

CI Circuito Integrado

CS Chip Select

DC Direct Current

DI Digital Input

DIP Dual In-Line

DO Digital Output

GND Ground

IDE Integrated Development Environment

LARA Laboratório de Robótica e Automação

LED Light-Emitting Diode

MISO Master Input Slave Output

MOSI Master Output Slave Input

PC Personal Computer

RMS Root Mean Square

SCK Source Clock

SPI Serial Peripheral Interface

SS Slave Select

UnB Universidade de Brasília

USB Universal Serial Bus

1 INTRODUÇÃO

Para se entender a motivação para o desenvolvimento de um dispositivo medidor de energia elétrica basta olhar o contexto da Automação Predial, que busca implantar o conceito do Edifício Inteligente.

O Edifício Inteligente utiliza uma rede para transferência de dados, em geral entre sistemas, com o intuito de se alcançar conforto, segurança e economia nos custos diretos e indiretos, pois a operação e manutenção representam a maior parcela dos investimentos aplicados durante a vida útil de uma construção. Dentre as redes utilizadas atualmente, existem várias que utilizam tecnologias sem fio para executar a comunicação entre seus dispositivos, como exemplo as já usuais redes Wi-Fi e Bluetooth, além de protocolos especializados para a automação, como o Z-Wave, o Zigbee, o RadioRA, o Enocean, entre outros.

O desejo de se medir o consumo e atuar (em tempo real) sobre aparelhos de ar condicionado do LARA, levou a equipe do laboratório a pesquisar no mercado a disponibilidade de tal solução.

O mercado fornece dispositivos *Dataloggers* que são implantados em instalações e realizam medições contínuas do consumo de energia, todavia não fornecem essas informações em tempo real.

Existem também os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, ou *IED*, utilizados em subestações que executam funções de proteção, permitem controle local, monitoram processos e se comunicam diretamente com sistemas supervisórios.

Apesar das tecnologias existentes, não foi encontrada uma solução de automação que permitisse a medição e atuação em tempo real em uma rede monofásica. Tal solução permitiria a identificação de variações no consumo de aparelhos, facilitando os processos de manutenção, bem como a execução de tarifação diferenciada.

Tendo essas considerações em mente, foi desenvolvido um módulo para medição de energia com transmissão sem fio (NEPOMUCENO, A. L. S.; COZENDEY, G. C.) na UnB em 2013, visando atender algo que não foi encontrado no mercado. O módulo foi projetado com o objetivo de medir o consumo de potência de uma carga em tempo real, e transmitir os dados para um programa supervisório. O projeto resultou em um protótipo que efetua as medidas de voltagem e frequência da rede elétrica, e potência ativa e reativa e que transmite os dados por um rádio XBee utilizando o protocolo Modbus. Todavia, como todo projeto em fase de prototipagem são necessários testes e revisões para fornecer melhores resultados da operação do dispositivo.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo do módulo de medição, levantando pontos na instrumentação eletrônica, e no projeto de modo geral, que carecem de melhorias. Sugerir e implementar melhorias no projeto para o que protótipo esteja adequado e forneça medições precisas e exatas. O módulo estudado foi projetado visando a comunicação sem fio com um PC, todavia as capacidades sem fio do módulo não serão abordadas neste texto.

O módulo de medição de energia é composto por três subsistemas:

- i. Circuito de alimentação;
- ii. Circuito de acoplamento;
- iii. Circuito de medição.

Cada um dos circuitos componentes do protótipo foi estudado individualmente e ao fim, com as modificações implementadas, foram realizados ensaios para avaliar o desempenho do módulo.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento segue a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2 é feita uma breve revisão teórica sobre alguns tópicos que foram utilizados na execução e redação deste documento;
- No Capítulo 3 são apresentados as características e funcionalidades dos principais componentes envolvidos no projeto. Também será apresentado o ambiente utilizado para realizar os ensaios;
- No Capítulo 4 é conduzido um estudo da primeira versão do módulo de medição de energia. Os dados coletados a partir do experimento realizado com o módulo serão exibidos neste capítulo;
- O Capítulo 5 consiste na análise e projeto de modificações para o estrutura eletrônica do módulo, atacando os principais problemas levantados no Capítulo 4;
- Os resultados obtidos s\u00e3o expostos no cap\u00edtulo 6 na forma de gr\u00e1ficos e tabelas extra\u00eddos de observa\u00e7\u00f3es e ensaios ap\u00e3s a implementa\u00e7\u00e3o do que foi projetado no Cap\u00edtulo 5;
- Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados após implementação das modificações.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados brevemente os conceitos de potência em circuitos de corrente alternada, impedância e uma breve descrição de filtragem por média móvel, tópicos utilizados durante a execução do trabalho.

2.1 CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

Circuitos de corrente alternada, CA, apresentam tensões elétricas com polaridade variante no tempo, e correntes elétricas com sentido variante no tempo. Toda a análise deste trabalho é feita para um sistema monofásico.

2.1.1 Potência ativa

A potência média em um sistema de corrente alternada é dada por:

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t)V(t)dt \tag{1}$$

Aonde I(t) e V(t) são respectivamente os valores da corrente e da tensão no instante t. No caso de sinais senoidais, o desenvolvimento da equação (1) resulta no produto dos valores eficazes de tensão e corrente e de um termo adicional denominado fator de potência:

$$P = V_e \cdot I_e \cdot \cos\varphi \tag{2}$$

O termo $cos \varphi$ representa o fator de potência, sendo φ o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. O valor eficaz de uma grandeza também é chamado de valor rms - root mean square, isto é, raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores.

A grandeza *P* na equação (2) é chamada potência ativa e representa a energia gasta em determinado intervalo de tempo.

2.1.2 Potência aparente

Ao se utilizar a notação complexa para a corrente e tensão é possível definir a expressão para a potência complexa **S**:

$$S = V \cdot I^* \tag{3}$$

Onde I^* é o conjugado do número complexo I. Na equação (3), V e I são fasores, descritos por:

$$\mathbf{V} = \sqrt{2}V_e e^{j\varphi_V} \tag{4}$$

$$\mathbf{I} = \sqrt{2}I_e e^{j\varphi_I} \tag{5}$$

O valor absoluto de **S** é chamado potência aparente:

$$|\mathbf{S}| = V_e I_e \tag{6}$$

2.1.3 Potência reativa

Ao se expandir a equação (3) para a forma retangular temos:

$$\mathbf{S} = V_{\rho}I_{\rho}\cos\varphi + jV_{\rho}I_{\rho}\sin\varphi = P + jQ \tag{7}$$

A equação (7) complementa a definição de potência ativa e apresenta um novo termo Q. Esse novo termo é denominado potência reativa e é dado por:

$$Q = V_e \cdot I_e \cdot sen\varphi \tag{8}$$

A potência reativa não executa trabalho útil, na verdade está relacionada à energia armazenada em elementos capacitivos e indutivos. É possível relacionar a potência aparente com as potências ativas e reativas na forma de um triangulo de potência, como está ilustrado na Fig. 2.1.

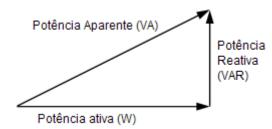


Figura 2.1. Triângulo de potência.

2.2 IMPEDÂNCIA

É definida como a razão entre o valor eficaz de tensão entre dois pontos de uma rede pelo valor eficaz da corrente que circula através dos mesmos pontos.

A impedância é um número complexo, onde sua parte real equivale a uma resistência enquanto a parte imaginária é chamada reatância e é determinada por elementos capacitivos e indutivos. Sejam R um elemento resistivo, L um elemento indutivo e C um elemento capacitivo, as impedâncias resultantes em regime permanente senoidal são dadas por:

$$Z_R = R \tag{9}$$

$$Z_L = j\omega L \tag{10}$$

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C} \tag{11}$$

A associação de impedâncias numa mesma rede é feita substituindo impedâncias em série por outra impedância de valor equivalente à soma das anteriores. No caso de impedâncias em paralelo, o equivalente é uma impedância equivalente à razão entre o produto e a soma

das anteriores. Sendo Z_1 e Z_2 impedâncias, as equações (12) e (13) mostram as fórmulas gerais para a associação em série e em paralelo, respectivamente:

$$Z_{\text{s\'erie}} = Z_1 + Z_2 \tag{12}$$

$$Z_{paralelo} = Z_1 || Z_2 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$
 (13)

2.3 EXATIDÃO

A exatidão é uma característica estática de instrumentos e está relacionada com a qualidade da medição, assegurando que a medida coincida com o valor real da grandeza considerada. O valor representativo deste parâmetro é o valor médio.

Quando o valor real ou correto é conhecido, a exatidão garante a rastreabilidade da medição. Isso significa que o valor pode passar de um laboratório para outro, sempre mantendo a medida exata.

2.4 PRECISÃO

A precisão diz respeito a dispersão dos vários resultados, correspondentes a repetições de medições quase iguais, em torno do valor central. É uma característica estática e é usualmente associado ao erro padrão.

Na Figura 2.1 é possível verificar a relação entre precisão e exatidão.

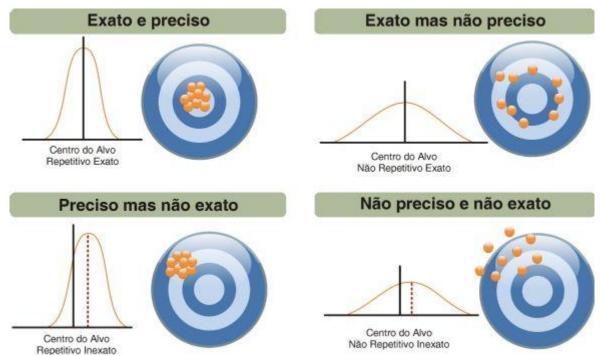


Figura 2.2. Comparativo entre precisão e exatidão.

2.5 FILTRO DE MÉDIA MÓVEL

Os sinais medidos nos experimentos apresentam uma parcela de ruído que é indesejável no processo de análise. Filtros são utilizados em diversas aplicações para lidar com a presença dos ruídos. Segundo [9] a filtragem é especialmente necessária em aplicações que envolvem conversores analógico-digital.

O filtro de média móvel é um filtro não recursivo simples que utiliza a média, neste caso aritmética, de uma quantidade fixa de amostras, resultando em um filtro passa baixas suave. O filtro pode ser facilmente implementado em software e é descrito pela equação (14):

$$y[n] = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^{N} u[n-k]$$
 (14)

Aonde:

y[n]: sinal filtrado;

n : tempo atual;

N+1: quantidade de amostras para a filtragem;

u[n]: valor medido no instante n, u[n-k] representa o conjunto dos valores

considerados em cada passo.

3 MATERIAIS

Neste capítulo são abordados os principais componentes utilizados no projeto e montagem dos protótipos do módulo de medição de energia. O local de realização dos ensaio também será abordado neste capítulo.

3.1 SA9903B

O SA9903B é o circuito integrado utilizado no projeto original do medidor de energia [5] por atender aos requisitos levantados na época do projeto e por sua disponibilidade em laboratório. Ele é um circuito integrado medidor de energia e potência monofásicas, fabricado pela empresa sul-africana Sames. A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do CI SA9903B.

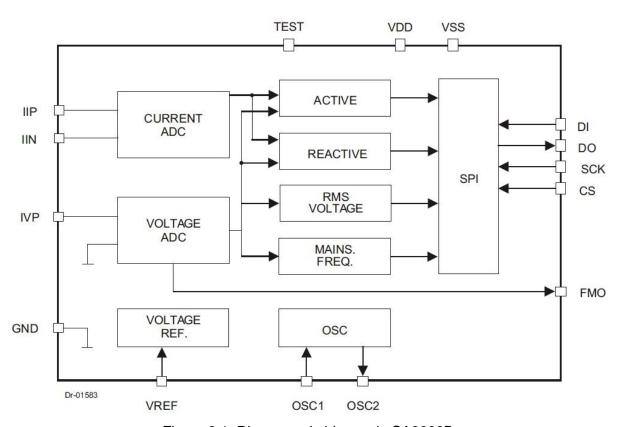


Figura 3.1. Diagrama de blocos do SA9903B.

O SA9903B utiliza o barramento SPI para comunicação, apresenta conversores analógicodigital embutidos para as medições de corrente e tensão, tem baixo consumo (abaixo de 25mW) e pode ser usado com diferentes tecnologias para sensores de corrente, por exemplo, pode trabalhar com um transformador de corrente ou com um resistor shunt. A Tabela 3.1 descreve os pinos mais importantes do SA9903B. Os pinos TP4, TP5, TP6, TEST, TP9 e TP16 são pinos de teste do fabricante, devem ser deixados desconectados com exceção do pino TEST que deve ser ligado a Vss para operação normal.

Tabela 3.1. Descrição dos principais pinos do SA9903B.

Pino	Símbolo	Descrição
20	GND	Terra analógico. A tensão neste pino deve ser o meio termo entre VDD e VSS.
8	VDD	Fonte de alimentação positiva. Tipicamente +2,5V caso um resistor shunt seja utilizado.
14	VSS	Fonte de alimentação negativa. Tipicamente $-2,5V$ caso um resistor shunt seja utilizado.
19	IVP	Entrada analógica de voltagem. A corrente neste pino deve ser $14\mu A$ à tensão nominal.
1,2	IIN,IIP	Entradas do sensor de corrente.
3	VREF	Tensão de referência. Deve ser ligada a um resistor de polarização de 24k conectado a VSS.
10,11	OSC1,OSC2	Conexões para um cristal oscilador.
12	SCK	Entrada de relógio (clock) serial.
13	DO	Saída dado serial.
15	FMO	Passagem por zero da voltagem. A saída FMO gera pulsos a cada borda de subida da tensão da rede.
17	DI	Entrada de dados serial.
18	CS	Chip Select.

3.1.1 Entradas analógicas

Os pinos IVP, IIN e IIP são as entradas analógicas do CI e são conectadas a circuitos conversores analógico-digital.

As entradas IIN e IIP recebem cada uma um canal vindo do resistor shunt utilizado em [5], onde o nível da corrente é ajustado por resistores R segundo a fórmula:

$$R = I_L/16\mu A.RSH/2 \tag{15}$$

Sendo:

 I_L : corrente máxima;

RSH: Valor da resistência do resistor shunt.

O resistor shunt utilizado é de 0.005Ω , a corrente máxima considera é de 40A, logo o valor das resistências é:

$$R = 40/16\mu A \cdot 0,005/2$$

$$R = 6,25k\Omega$$
(16)

A tensão que chega ao pino IVP deve ser dividida para $14V_{rms}$ por meio de um conjunto de resistores. Um outro resistor de $1M\Omega$ ajusta a corrente que entra no pino para $14\mu A$. O calculo de exemplo em [2] define uma margem de 2,3% para a queda de tensão e a partir dessa hipótese define que o divisor de voltagem deve ter os valores indicados na Fig. 3.2.

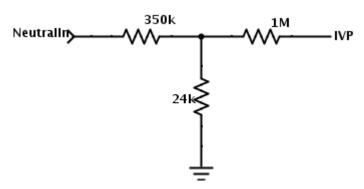


Figura 3.2. Divisor de tensão que ajusta o pino IVP.

3.1.2 Comunicação SPI

O barramento SPI, abreviação para "Serial Peripheral Interface", consiste em um protocolo de comunicação serial síncrono, opera em full duplex segundo uma arquitetura mestre/escravo.

O barramento especifica quatro sinais lógicos:

- i. SCLK: Clock serial sinal de saída do mestre;
- ii. MOSI: Master ouput, slave input sinal de saída do mestre;
- iii. MISO: Master input, slave output sinal de saída do escravo;
- iv. SS: *Slave select* sinal de saída do mestre.

Do ponto de vista do projeto, o SA9903B, elemento central do módulo de medição de energia é um elemento escravo, enquanto o microcontrolador que executa as leituras e demais processamentos é o mestre. Os sinais do barramento correspondem respectivamente aos pinos SCK, DO, DI e CS.

A comunicação é realizada de acordo com o pino CS, o SA9903B recebe dados pelo pino DI e transmite pelo pino DO sendo que a comunicação é sincronizada pelo pino SCK.

Todas as leituras feitas pelo SA9903B são armazenadas em registradores de 24 bits, cujos valores são transmitidos via SPI para o microcontrolador.

3.1.3 Pino FMO – detecção de passagem por zero

A saída FMO gera um sinal que segue a tensão da rede, isto é, gera pulsos à mesma frequência da rede elétrica. Ele é utilizado pelo microcontrolador para extrair o *timing* da rede. Este pino é essencial na correta determinação dos valores lidos de potência a partir

dos registradores.

A Figura 3.3 mostra como é a forma de onda do pino FMO e como ele está associado à tensão da rede.

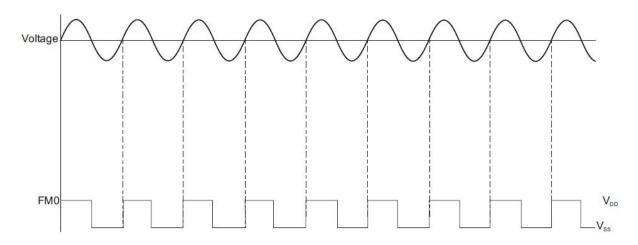


Figura 3.3. Forma de onda da saída FMO.

Mais detalhes quanto às especificações do SA9903B estão disponíveis em [1] e [2].

3.2 OPTOACOPLADOR 6N137

Optoacopladores são dispositivos compostos por um elemento emissor e um elemento receptor, funciona como um interruptor ativado pela luz emitida por um diodo led que satura outro componente optoeletrônico. Também são chamados optoisoladores pois são utilizados para isolar fisicamente partes de circuitos. Os optoacopladores também são úteis na tradução de níveis de sinais.

No projeto do medidor de energia foram utilizados optoacopladores 6n137 devido à alta velocidade, desempenho e disponibilidade em laboratório. Para cada um dos sinais do barramento SPI foi utilizado um CI 6n137.

A Figura 3.4 ilustra o esquemático do circuito integrado 6n137, composto por um diodo led, e um fotoreceptor ligado entre a fonte de alimentação e a base de um transistor.

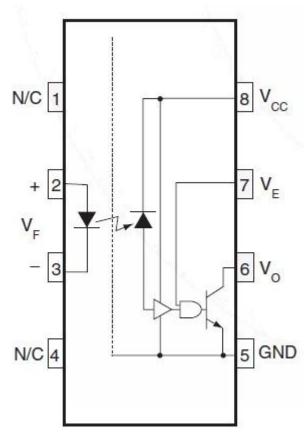


Figura 3.4. Esquemático do circuito integrado do optoacoplador 6n137.

3.3 ARDUINO MEGA

O Arduíno Mega é uma placa microcontroladora baseado no ATmega1280. É utilizado em diversas aplicações por simplificar o uso de um microcontrolador convencional, munido de uma linguagem de programação de alto nível baseada em C e extrema facilidade na transferência dos programas. Possui uma IDE própria para compilação e para carregamento do *bootloader*. O principal objetivo do Arduino é oferecer uma interface ágil entre o mundo físico e o computador através de sensoriamento e controle.

Neste trabalho o Arduino foi utilizado em duas etapas:

- Realização de testes com a sessão de acoplamento do sistema. Utilizando as saídas digitais do Arduino os optoacopladores de entrada do SA9903B foram ativados para testar seu consumo de corrente;
- ii. Coleta dos dados gerados pelo módulo medidor de energia durante os ensaios.

Existem várias versões do Arduino disponíveis comercialmente bem como uma variada gama de acessórios que integram a uma placa capacidades sem fio, ou conectividade com outros protocolos como o USB. Em [5] foram utilizadas expansões para o Arduino permitindo sua utilização com dispositivos XBee para explorar as funcionalidades sem fio no contexto da automação predial.

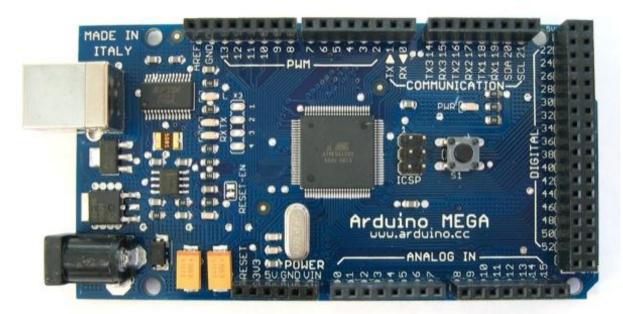


Figura 3.5. Arduino Mega.

3.4 AMBIENTE DE TESTE

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Conversão de Energia da Universidade de Brasília. Foram utilizadas cargas resistivas, indutivas e capacitivas do próprio laboratório a fim de se observar o comportamento dos protótipos frente a cargas bem definidas.

A Figura 3.6 mostra o esquema de ligação do módulo de medição às cargas. A fonte de tensão mostrada na figura corresponde à voltagem oferecida por uma das bancadas do laboratório.



Figura 3.6. Esquema de ligação do módulo de medição de energia com as cargas do laboratório.

A Figura 3.7 mostra o ambiente de teste durante a execução de um dos ensaios. É possível notar as cargas resistiva, indutiva e capacitiva na forma de gabinetes. Também é possível notar parte da bancada utilizada durante os experimentos.



Figura 3.7. Laboratório de conversão de energia – cargas em ação durante um ensaio.

4 ENSAIOS COM A PRIMEIRA VERSÃO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

Este capítulo apresenta um estudo do módulo de medição de energia desenvolvido visando atacar alguns problemas de hardware apontados em [5] nas seções de alimentação e acoplamento do módulo. O módulo também foi testado em laboratório com cargas bem definidas.

4.1 ACOMPANHAMENTO DO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO COM OSCILOSCÓPIO E TRANSFORMADOR ISOLADOR

O circuito de alimentação da primeira versão do modulo de medição de energia consiste basicamente em um par de diodos retificadores que atuam na onda completa da rede elétrica, sendo o sinal retificado regulado por um par de diodos zener conforme Fig. 4.1, os componentes D1 e D2 são os diodos de retificação, e os componentes D3 e D4 os diodos zener de regulação.

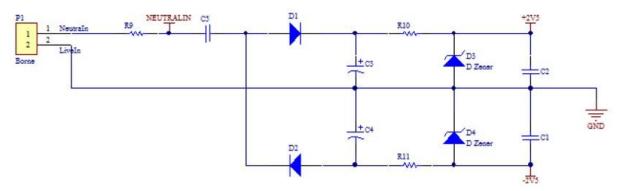


Figura 4.1. Circuito de alimentação da primeira versão do módulo de medição de energia.

Tal circuito foi adaptado de um circuito maior utilizado como aplicação típica do CI SAMES SA9903B encontrado em [2]. O objetivo deste circuito é tomar a tensão AC disponível na rede elétrica – representada nas linhas "Neutralln" e "Liveln" conectadas ao borne P1 do esquemático - e fornecer uma fonte simétrica DC de ±2,5 Volts destinados somente à alimentação do SA9903B, sendo o ponto de 0 Volts definido como o terra do circuito. O circuito também possui um resistor de proteção (R9), alguns capacitores para filtragem (C3, C4 e C5) e um par de capacitores na saída (C1 e C2). No contexto do módulo de medição de energia, o circuito da Fig. 4.1 é utilizado para alimentar tanto o CI SAMES SA9903B quanto o circuito de acoplamento do módulo.

Utilizando um transformador isolador de razão 1:1 foi possível observar as formas de onda produzidas pelo circuito de alimentação de um módulo (primeira versão) produzido no LARA. O esquema de ligação para o acompanhamento da fonte positiva está ilustrado na Fig. 4.2. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os sinais observados.

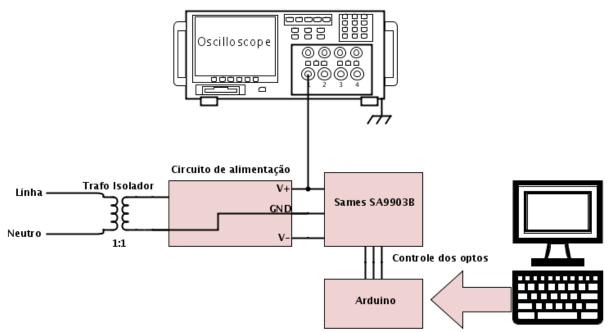


Figura 4.2. Esquema de ligação do osciloscópio ao módulo de medição de energia.

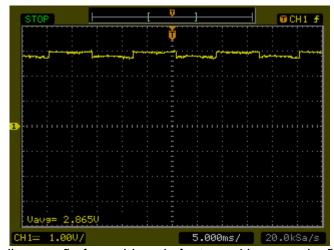


Figura 4.3. Sinal de alimentação fornecido pela fonte positiva em relação ao terra do circuito.

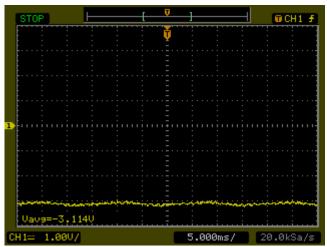


Figura 4.4. Sinal de alimentação fornecido pela fonte negativa em relação ao terra do circuito.

O transformador na Fig. 4.2 foi necessário pois a massa do osciloscópio é ligada diretamente ao terra da rede elétrica - o que é padrão de proteção neste tipo de equipamento - e uma medição direta no modulo provocaria um curto-circuito podendo danificar o mesmo. As Figuras 4.3 e 4.4 foram obtidas a partir de uma porta USB presente no osciloscópio.

Nota-se que a fonte de alimentação fornece um sinal com oscilações tanto na fonte positiva quanto na negativa. A fonte negativa sofre oscilações suaves sendo caracterizadas por um valor médio de -3,114 Volts enquanto fonte positiva sofre de oscilações mais bruscas e os parâmetros notados na Fig. 4.3 estão resumidos na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Características elétricas obtidas da Fig. 4.3.

Tensão máxima v _{max} [V]	2,980
Tensão mínima v _{min} [V]	2,770
Tensão média v _{med} [V]	2,865
Período T [ms]	16,65
Frequência f [Hz]	60,06

4.2 CHAVEAMENTO DOS OPTOACOPLADORES

O circuito de acoplamento permite a adaptação dos níveis de tensão entre o dispositivo sensor e o hardware de processamento fornecendo também um isolamento entre essas duas partes do módulo. A Figura 4.5 apresenta um esquemático de todo o circuito de acoplamento da primeira versão do módulo de medição de energia.

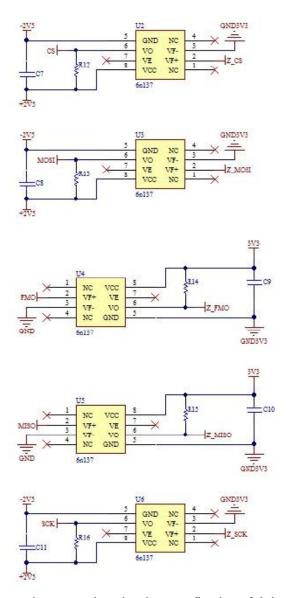


Figura 4.5. Circuito de acoplamento da primeira versão do módulo de medição de energia.

Os elementos U2 a U6 representam os optoacopladores 6N137, eles estão dispostos de maneira que os sinais no lado esquerdo da Fig. 4.5 são as conexões que vão para o Cl SA9903B enquanto os sinais no lado direito são as conexões que vão para o dispositivo de processamento. Nota-se que não existem limitadores de corrente nem nos terminais do transmissor nem nos terminais do fotoreceptor.

Os optoacopladores referentes aos sinais de entrada do SA9903B – CS, MOSI e SCK - compartilham o circuito de alimentação do módulo de medição de energia, o que está indicado na Fig. 4.5 pelos sinais de alimentação +2V5 e -2V5, já os optoacopladores referentes aos sinais de saída do SA9903B – MISO e FMO – são alimentados pelo próprio microcontrolador ajustando assim o nível de tensão adequado ao processamento.

A ativação dos optoacopladores responsáveis pelos sinais CS, MOSI e SCK implica na circulação de uma corrente pelos fototransistores que é fornecida pelo circuito de alimentação do módulo. Essa corrente, no ponto de vista do proposito do circuito de

alimentação da Fig. 4.1, é uma corrente "extra", pois a proposta do circuito da Fig 4.1 é alimentar apenas o CI SA9903B. Nas Figuras 4.6 e 4.7 é possível ver a implicação dessa corrente extra para o circuito de alimentação, comparado com as Fig. 4.3 e 4.4. As Figuras 4.6 e 4.7 foram obtidas através de uma placa Arduino fazendo a interface com o computador (ver Fig 4.2), o controle foi feito por meio do código exposto no Anexo II.1.

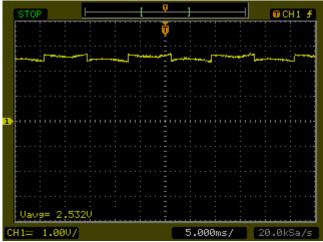


Figura 4.6. Sinal de alimentação fornecido pela fonte positiva com os optoacopladores ativos.

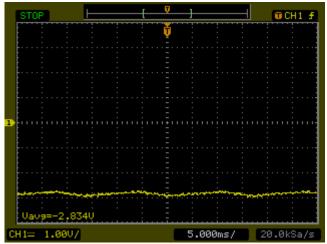


Figura 4.7. Sinal de alimentação fornecido pela fonte negativa com os optoacopladores ativos.

Ao mesmo tempo que é possível notar mudanças mínimas nas formas de onda, nota-se uma redução na tensão elétrica total fornecida de cerca de 0.7V indicando que o circuito de alimentação não supre adequadamente o circuito de acoplamento e o SA9903B simultaneamente.

4.3 TESTES DE MEDIÇÃO NO LABORATÓRIO DE CONVERSÃO DE ENERGIA

O ensaio realizado com a primeira versão do módulo de medição de energia consiste na utilização de cargas bem definidas, de naturezas resistiva, capacitiva e indutiva. Com auxílio

técnico no laboratório de conversão de energia, a bancada foi configurada para fornecer uma tensão alternada de 230 Volts RMS. As cargas do ensaio são alimentadas pela bancada do laboratório, sendo que o módulo de medição de energia se localiza entre a bancada e a carga (Fig. 4.8) e faz a medição através do resistor Shunt.



Figura 4.8. Diagrama de ligação das cargas ao módulo de medição de energia e à bancada.

A Tabela 4.2 mostra a sequência de cargas utilizadas no ensaio. Para cada combinação de cargas da Tab. 4.2 foram coletadas amostras durante um intervalo de aproximadamente 2 minutos totalizando aproximadamente 16 minutos de ensaio, com a troca das cargas realizada manualmente durante o experimento.

Tabela 4.2. Sequência das cargas utilizadas no ensaio.

Procedimento	Carga Atual
-	Aberto
Ligar <i>R</i>	R
Ligar <i>L</i>	RL
Ligar C	RLC
Desligar <i>R</i>	LC
Desligar C	L
Desligar L / Ligar C	С
Ligar <i>R</i>	RC

A Tabela 4.3 contém os parâmetros envolvidos no ensaio, bem como seus valores.

Tabela 4.3. Parâmetros utilizados no ensaio.

Parâmetros	Valor	Unidade
Tensão	225	[Vrms]
Frequência	60	[Hz]
R	234,5	[Ω]
L	585	[mH]
С	12	[µF]
Frequência angular (ω)	377,0	[rad/s]

A tensão da bancada foi configurada em 230 Volts RMS, mas caiu para o valor da Tab. 4.3 durante o ensaio.

A partir dos parâmetros R, L e C é possível determinar os valores teóricos esperados para as medições de potência relativas a cada tipo de carga. A Tabela 4.4 contém as impedâncias de tais elementos bem como os valores de potência ativa e reativa resultantes de cada carga.

T-1-1- 4 4	1		.1	Contract of the second second second
I aneia 44	impedancias e	notencias	nas carnas	utilizadas no ensaio.
i abola i. i.	ii i i poddi i oldo o	poteriolas	ado odigao	atilizadad no onodio.

Impedâncias			Potência		
Carga	 Ζ [Ω]	Arg(Z) [rad]	P [W]	Q [Var]	
R	234,50	0,000	215,88	0,00	
L	220,54	1,571	0,00	229,55	
С	221,05	-1,571	0,00	-229,02	
R//L	160,65	0,816	215,88	229,55	
R//C	160,85	-0,815	215,88	-229,02	
L//C	95,83	1,571	0,00	0,53	
R//L//C	234,50	0,002	215,88	0,53	

Além da bancada, foram utilizados instrumentos adicionais no ensaio: um par de multímetros digitais, um wattímetro analógico além da placa Arduino para coleta e transmissão dos dados via porta serial.

Ao final do ensaio, foram obtidos conjuntos de dados referentes a medições da tensão da rede, da frequência da rede e das potências ativa e reativa solicitadas pelas cargas. A partir de tais dados foram obtidos os gráficos da Fig. 4.9, que estão expostos em formato maior no Anexo IV.1.

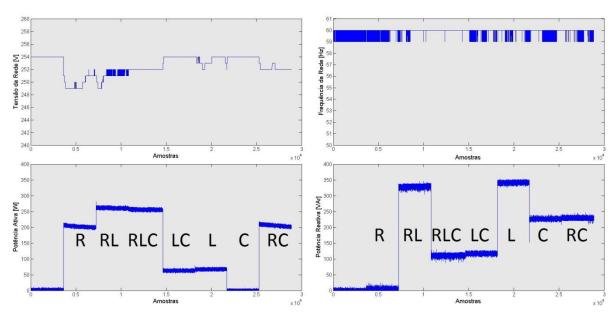


Figura 4.9. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com a primeira versão do módulo de medição de energia. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa.

Durante o ensaio também foram realizadas medidas de acompanhamento com os multímetros e o wattímetro do laboratório, a Tab. 4.5 contém os valores obtidos (a coluna referente à potência reativa foi calculada a partir das demais colunas).

Tabela 4.5. Valores de tensão, corrente e potência medidos durante o ensaio.

Carga	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência Ativa [W]	Potência Reativa [VAr]
Vazio	227,6	0	0	0,00
R	225	0,945	210	33,31
L	227,6	1,63	100	357,26
С	228,2	1,066	0	-243,26
R//L	225	1,968	250	365,47
R//C	227,5	1,426	215	-242,94
L//C	227,5	0,66	105	107,33
R//L//C	226,7	1,346	290	94,92

A partir deste estudo foi possível verificar que existe uma diferença de aproximadamente 15% entre a tensão medida e a tensão da rede. As medições de potência também estão distantes dos cálculos. As medidas de frequência apresentam oscilações entre 60 e 59Hz provavelmente devido a erros de quantização do procedimento.

5 PROJETO E INSTRUMENTAÇÃO PARA REVISÃO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

Cada bloco constituinte do sistema final é estudado para garantir que as interfaces entre os elementos atendam aos requisitos individuais e que as especificações dos componentes são atendidas. A partir de uma visão geral dos instrumentos envolvidos as sessões foram dividas atacando cada um dos elementos envolvidos.

5.1 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

Ao analisar a primeira versão do módulo de medição de energia foi possível levantar os principais elementos que constituem o sistema final. Do ponto de vista da instrumentação do sistema, cada bloco desempenha uma função que contribui para o correto funcionamento do módulo de medição, isto é, fornecer medições de potência para uso por sistemas subsequentes.

A Figura 5.1 mostra uma representação, em diagrama de blocos, da estrutura da primeira versão do módulo de medição de energia. Neste modelo, vemos vários subsistemas do módulo de medição. Cada bloco da Fig. 5.1 possui requisitos e especificações para que possa desempenhar suas funções. A instrumentação do trabalho consiste na correta escolha de elementos (instrumentos) que atendam a esses requisitos e especificações. Não atender os requisitos de um bloco pode comprometer de alguma forma seu funcionamento, até mesmo o funcionamento de outro bloco e, consequentemente, os resultados obtidos.

O objetivo da Fig. 5.1 é descrever os componentes e os instrumentos de interface de maneira a organizar o raciocínio e definir as frentes de estudo. Definimos então os seguintes tópicos baseado na Fig. 5.1.:

- Correta alimentação de energia do sistema;
- ii. Atender especificações do SA9903B;
- iii. Proteção dos optoacopladores;
- iv. Correta aquisição dos dados gerados.

Conforme levantado no Capítulo 4, a fonte de alimentação apresenta formas de onda oscilantes e redução do nível de tensão quando solicitada pelo SA9903B e pelo circuito de acoplamento, o que resulta em flutuações frequentes numa situação de operação devido ao chaveamento constante dos optoacopladores. A instabilidade das formas de onda proporcionada pela fonte também afeta o próprio CI SA9903B, pois ele necessita de um sinal derivado da fonte positiva no seu pino VREF. O SA9903B também tem uma ligação

com a rede elétrica através da malha de resistores especificada na documentação do próprio dispositivo. A malha de resistores é ligada ao pino IVP. Por fim, os optoacopladores esquentam demasiadamente durante a operação e muitos dentre os disponíveis no laboratório foram encontrados queimados. A alta taxa de perda de Cls 6N137 e a alta temperatura podem ser fruto de não existir controle para o nível de corrente que entra nos fotoemissores.

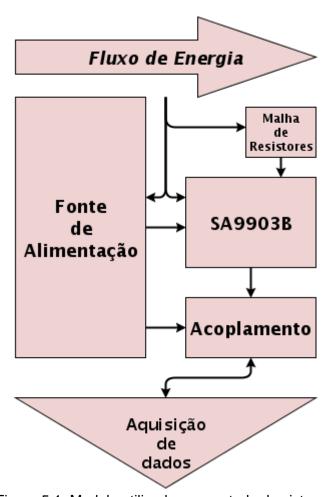


Figura 5.1. Modelo utilizado para estudo do sistema.

5.2 REVISÃO DO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO

A fonte utilizada na primeira versão do módulo (Fig. 4.1) é sugerida em [2], como forma de alimentação do CI SA9903B. O documento especifica que o SA9903B consome menos que $25 \, mW$, então a corrente total consumida a 5 Volts é aproximadamente $5 \, mA$. Não há nenhum comentário sobre a capacidade dessa fonte.

No circuito de acoplamento a demanda total dos três optoacopladores que são alimentados pela fonte é $36 \, mA$ na situação de consumo máximo, cada resistor de pull-up consome mais

5 mA, totalizando aproximadamente 51 mA fora o consumo do SA9903B. Como evidenciado, a regulação proporcionada pelos diodos zener é comprometida sendo necessária a substituição deles por outra forma de regulação de tensão.

A fonte de tensão exibida na Fig. 5.2 utiliza um regulador de tensão LM78L05 e é apresentada em [1], como alimentação de um sistema composto não apenas pelo SA9903B. O componente Z1 é um varistor para proteção contra picos.

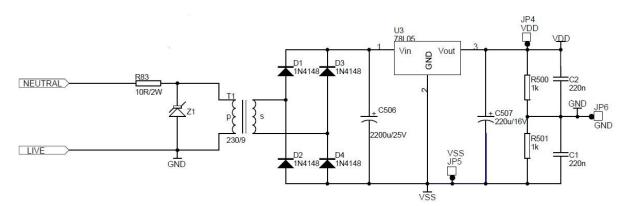


Figura 5.2. Nova proposta para a fonte de alimentação.

Graças ao regulador LM78L05, a fonte da Fig. 5.2 fornece até $100 \, mA$ de corrente, além de possuir um transformador abaixador que também funciona como um isolamento para a fonte de alimentação.

5.3 REVISÃO DO CIRCUITO DE ACOPLAMENTO

Como discutido anteriormente, o circuito de acoplamento, principalmente na sessão dos emissores, não foi calculado de maneira a garantir que as correntes envolvidas sejam adequadas às especificações dos fototransmissores.

Lembrando que toda análise aqui feita se refere aos segmentos do circuito de acoplamento que são alimentados de maneira interna ao módulo, ou seja, os fotoemissores relativos aos pinos de saída do CI SA9903B (FMO e MISO) e os fotoreceptores dos pinos de entrada (MOSI, CS e SCK).

O modelo da Fig. 5.3 aponta dois aspectos que foram modificados em relação à primeira versão do módulo de medição de energia:

- i. A Figura 5.3 ilustra a presença de uma resistência *R*, ausente no projeto inicial, em conjunto com as demais grandezas elétricas envolvidas no processo de fototransmissão, sendo R a resistência de polarização para o fototransmissor;
- ii. A Figura 5.3 nos mostra que o circuito do fototransmissor é ligado entre as tensões positiva e negativa da fonte de alimentação.

5.3.1 Fotoemissor

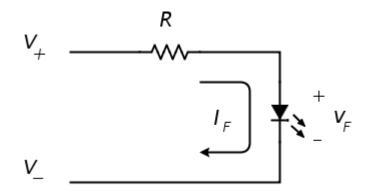


Figura 5.3. Circuito do fotoemissor.

A Tabela 5.1 nos dá os valores típicos das grandezas da Fig. 5.3.

Tabela 5.1. Valores utilizados para as grandezas do circuito do fototransmissor.

Símbolo	Valor
I_F	10 mA
V_{\digamma}	1,8 V
$V_{\scriptscriptstyle +}$	2,5 V
V.	-2,5 V

A corrente máxima que pode circular no fotoemissor é de $50\,mA$ e a partir dos valores da Tab. 5.1 temos que:

$$I_F < 50 \, mA$$

$$\frac{(V_+ - V_-) - V_F}{R} < 50 \, mA$$

$$R > 64 \, \Omega$$
 (17)

Supondo operação com os valores da Tab. 5.1:

$$R = \frac{(V_{+} - V_{-}) - V_{F}}{I_{F}}$$

$$R = 320 \,\Omega \tag{18}$$

A partir das equações (17) e (18) foi escolhido o valor de R como 390 Ω , valor comercial disponível no laboratório.

5.3.2 Ligações dos optoacopladores

Na primeira versão do módulo de medição de energia, o cátodo dos fotoemissores dedicados aos pinos de saída do SA9903B, FMO e MISO (saída de dados serial), estavam ligados ao nó de terra do circuito, conforme pode ser visto na Fig. 4.5. Tal ligação foi identificada como a causa das formas de onda apresentadas pelas fontes de tensão positiva e negativa nas Fig. 4.6 e Fig. 4.7, respectivamente. Por isso que na Fig. 5.3 a corrente que percorre o diodo emissor de luz retorna para a fonte negativa, essa mudança na ligação do circuito resolveu o problema de oscilação das fontes.

5.3.3 Fotoreceptor

A Figura 5.4 contém um modelo simplificado para a sessão do fotoreceptor. A corrente máxima pelo circuito é de 50mA, temos então:

$$I < 50 \, mA$$

$$\frac{V}{R} < 50$$

$$R > 100\Omega$$
(19)

Este aspecto do projeto inicial não foi alterado, pois já são utilizados resistores de $1k\Omega$ como pull-up.

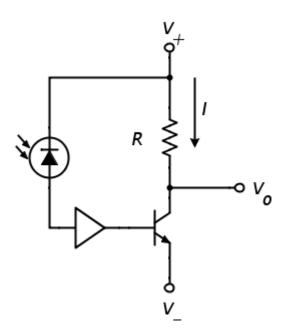


Figura 5.4. Modelo do circuito do fotoreceptor.

5.4 REVISÃO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA

Para o funcionamento do circuito de medição, os pinos IIN, IIP, VREF e IVP do medidor de energia devem ter suas entradas devidamente ajustadas. Um esquemático do circuito de

medição está ilustrado na Fig. 5.5, que foi retirada de [1]. O elemento sensor utilizado foi o resistor shunt, todavia o esquemático da Fig. 5.5 também sugere que um transformador de corrente possa substituir o resistor.

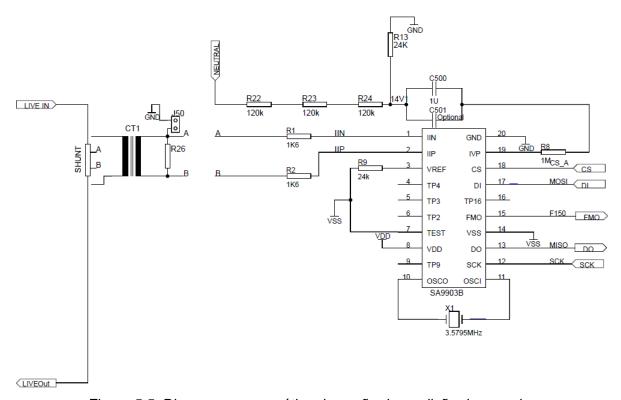


Figura 5.5. Diagrama esquemático da seção de medição de energia.

5.4.1 Entradas do sensor de corrente

Os pinos IIN e IIP são as entradas do sensor de corrente. Ambos os pinos devem ter uma corrente de $16\mu A_{rms}$, valor ajustado pelo resistor shunt (RSH) e um par de resistores (R1 e R2) que devem ser calculados. A Tabela 5.2 mostra os valores utilizados em [5], que resultou em um erro de 0,8% para as correntes de $16\mu A_{rms}$. Devido ao baixo erro, este aspecto do projeto não foi modificado.

Tabela 5.2. Valores dos resistores para o sensor de corrente.

Símbolo	Valor
RSH	5 mΩ
R1=R2	$6,2~k\Omega$

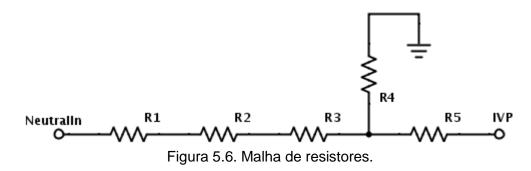
5.4.2 Tensão de referência

O pino VREF configura a tensão de referência do CI, um resistor de $24~k\Omega$ conectado à fonte de tensão negativa ajusta a condição ótima de operação. O valor de tensão no pino está

dentro da faixa aceitável, entre 1,1 volts e 1,3 volts, portanto esse aspecto do projeto não foi modificado.

5.4.3 Malha de resistores

O pino IVP é a entrada do sensor de voltagem e deve receber uma corrente de $14\mu A_{rms}$, ajustada pela malha de resistores na parte superior da Fig. 5.5 e em detalhe na Fig. 5.6 notar a mudança na numeração dos resistores, toda referencia nesta seção será feira em relação à numeração exposta na Fig. 5.6.



Através de R1, R2 e R3 é possível que a tensão no nó de união das resistências R4 e R5 seja $14 V_{rms}$, de modo que basta utilizar R5 como $1 M\Omega$ para que a corrente entrando no pino IVP seja $14 \mu A_{rms}$. Utilizando o método exposto em [2] R4 deve ser escolhido como 24 k Ω , e R1, R2 e R3 devem ser ajustados de acordo com a tensão da rede.

Em [5] foi levantado um ponto quanto à erros de medição associados à tolerância deste circuito. Como durante os ensaios existia uma variação na tensão da bancada, os valores de R1, R2 e R3 foram alterados a fim de se observar como as medições seriam alteradas. Sendo *V* a tensão no nó de união das resistências R4 e R5, ao analisarmos o divisor de tensão temos a relação entre as resistências:

$$R1 + R2 + R3 = R4//R5 \frac{NeutralIn - V}{V}$$
 (20)

Foram considerados dois casos, o primeiro apresenta as três resistências com o mesmo valor, e é o recomendado na documentação, o segundo apresenta uma proximidade maior caso a tensão da rede seja mais elevada. A Tabela 5.3 mostra os valores de resistores escolhidos para os dois casos e os valores calculados para o IVP.

Tabela 5.3. Valores calculados para a corrente no pino IVP em dois cenários.

Cenário 1						Cenário 2	
Res	istências	Rede [V]	IVP [µA]	Resistências		Rede [V]	IVP [μA]
R1	120kΩ	225	13,75	R1	150kΩ	225	13,40
R2	120kΩ	230	14,06	R2	110kΩ	230	13,70
R3	120kΩ	237	14,49	R3	110kΩ	237	14,12

5.5 REVISÃO DA AQUISIÇÃO DE DADOS

O software desenvolvido para se trabalhar com a primeira versão do módulo de medição coleta os dados do medidor de energia via comunicação serial SPI, processa os dados adequadamente e os armazena em um vetor do tipo inteiro sem sinal. É possível notar na Fig. 4.9 que o tipo de dados escolhido para as variáveis medidas não comporta bem a medição de potência reativa, pois a mesma pode apresentar valores negativos. Para as novas medições foram consideradas variáveis do tipo ponto flutuante, que contabilizam o sinal e a precisão dos cálculos.

Também foi removido o fator de correção utilizado no programa. A finalidade desse fator era oferecer uma calibração para algumas medições.

O código utilizado está no Anexo II.2.

6 RESULTADOS

Nesta sessão serão apresentados resultados na forma de gráficos e dados obtidos através dos ensaios realizados com o novo protótipo do módulo de medição de energia. Apesar de o protótipo estar implementado de forma provisória, é possível notar diferenças em relação às informações observadas no capítulo 4, e entre as configurações utilizadas durante o experimento. Todas as imagens e informações deste capítulo são referentes ao módulo revisado, referências à configuração antiga são explicitadas.

6.1 NOVA VERSÃO DO PROTÓTIPO

As modificações de projeto consideradas no capítulo anterior foram implementadas para teste, a Fig. 6.1 contém o protótipo resultante. Na parte superior a esquerda da Fig. 6.1 está a fonte de alimentação, na parte superior direita o circuito de medição e na parte inferior a direita está o circuito de acoplamento. No Anexo I encontram-se os esquemáticos e lista de materiais para o módulo revisado.

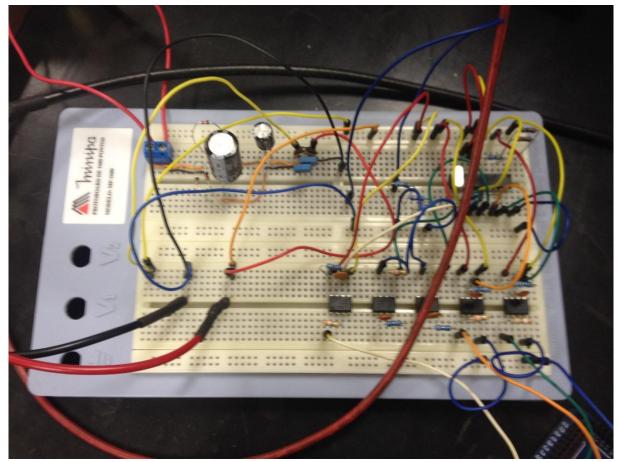


Figura 6.1. Módulo de medição de energia revisado. Montagem provisória em protoboard.

6.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

O resultado observado para as fontes de alimentação positiva e negativa pode ser visto na Fig. 6.2 para a situação em que não temos nenhum circuito sendo alimentado. A fonte positiva está na metade superior da figura 6.2, enquanto a fonte negativa está na metade inferior. Pode-se notar que os valores fornecidos pela fonte são ligeiramente maiores do que o especificado, isto $\acute{\rm e}$, $\pm 2,5V$.

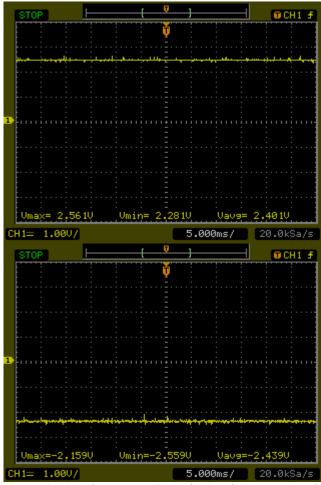


Figura 6.2. Formas de onda das fontes positiva (acima) e negativa (abaixo), com a fonte desligada dos demais circuitos.

A partir da Fig. 6.2 pode-se inferir que o circuito de alimentação parece satisfatório, todavia, a observação com a fonte sem cargas não é suficiente para concluir a análise. Ainda é possível observar a recorrência de fenômenos característicos da primeira versão do módulo de medição de energia quando conectamos as saídas da fonte de alimentação ao circuito de medição e ao circuito de acoplamento.

Conforme levantado no capítulo 4, as voltagens fornecidas pela fonte de alimentação apresentavam dois problemas:

- i. Oscilações na sua forma de onda;
- ii. Variação no nível médio da voltagem fornecida.

Na Figura 6.3 pode-se observar que o acionamento dos optoacopladores responsáveis pelos sinais CS, MOSI e SCK do sistema de medição não mais solicita a fonte de alimentação além de sua capacidade. A parte superior da Fig.6.3 mostra o caso em que os optoacopladores alimentados pelo circuito de alimentação estão desligados, enquanto a parte inferior mostra o caso em que os mesmos dispositivos estão ligados.

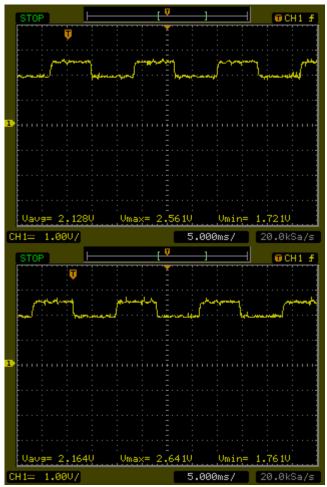


Figura 6.3. Formas de onda da fonte positiva conectada ao restante do sistema. Optoacopladores desligados acima, e ligados abaixo.

O acionamento dos optoacopladores foi feito pelo código exposto no Anexo II.1, utilizando o Arduino como interface com o computador.

A observação da fonte negativa fornece uma análise semelhante. A forma de onda da fonte negativa não tem seu nível de tensão alterado quando os optoacopladores responsáveis pelos sinais CS, MOSI e SCK são acionados, conforme pode ser visto na Fig. 6.4.

Por meio das Fig. 6.3 e Fig. 6.4 vemos que o problema da variação do nível de tensão devido ao consumo de corrente pelos dispositivos foi resolvido. É possível ver com facilidade que o valor médio dos sinais de ambas as formas de onda corresponde a $\pm 2,5V$, porém o fato de observarmos a existência desse valor médio tão claramente mostra que o problema restante se tornou mais visível, a amplitude das oscilações foi elevada, e os sinais

que deveriam ser constante se assemelham a ondas quadradas, em contrapartida às leves oscilações da versão anterior do módulo.

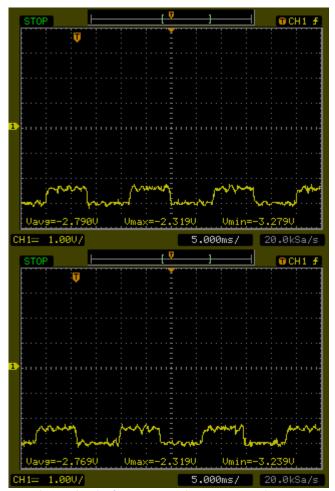


Figura 6.4. Formas de onda da fonte negativa conectada ao restante do sistema. Optoacopladores desligados acima, e ligados abaixo.

A diferença na forma das oscilações em relação ao observado no capítulo 4 provavelmente resulta na mudança estrutural da fonte de alimentação. É interessante observar que as oscilações da fonte positiva estão em fase com as oscilações da fonte negativa.

Foi observado no projeto original que as ligações dos sinais de saída do circuito de medição (FMO e DO) dos optoacopladores estavam retornando ao terra do circuito de alimentação, que corresponde ao ponto médio entre as fontes positivas e negativas e que está ligado diretamente aos sinais da rede. O problema das oscilações foi resolvido após modificar a conexão desses elementos de tal maneira que os sinais de saída retornem para a fonte negativa. A origem do problema foi identificada graças ao pino FMO, que gera um sinal alternado de mesma frequência da rede (60Hz) pois detecta os instantes que o tensão da rede passa pelo valor 0V. Todas as formas de onda das fontes oscilavam justamente na frequência de 60Hz. Dado este contexto, foi possível concluir que a ligação ao terra ao invés da ligação à fonte negativa estava provocando as oscilações.

A Figura 6.5 nos mostra o esquemático da ligação revista para o pino FMO, que também se aplica ao pino de saída de dados digitais. Nota-se a presença do resistor de polarização de 390Ω. O nível de tensão de 3.3V representa a alimentação do microcontrolador utilizado, neste caso, o próprio ATmega1280 do Arduino.

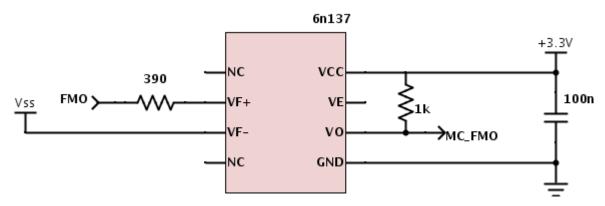


Figura 6.5. Esquemático de ligação dos optoacopladores de saída, módulo após revisão.

A Figura 6.6 mostra as formas de onda observadas após a modificação da ligação dos optoacopladores responsáveis pelos sinais de saída do circuito de medição. Nota-se que os níveis de tensão estão abaixo do proposto, o que se deve à voltagem utilizada para se obter a figura. O resultado registrado na Fig. 6.5 foi obtido no laboratório de conversão de energia da Universidade de Brasília onde a bancada fornece níveis de tensão abaixo do projetado.

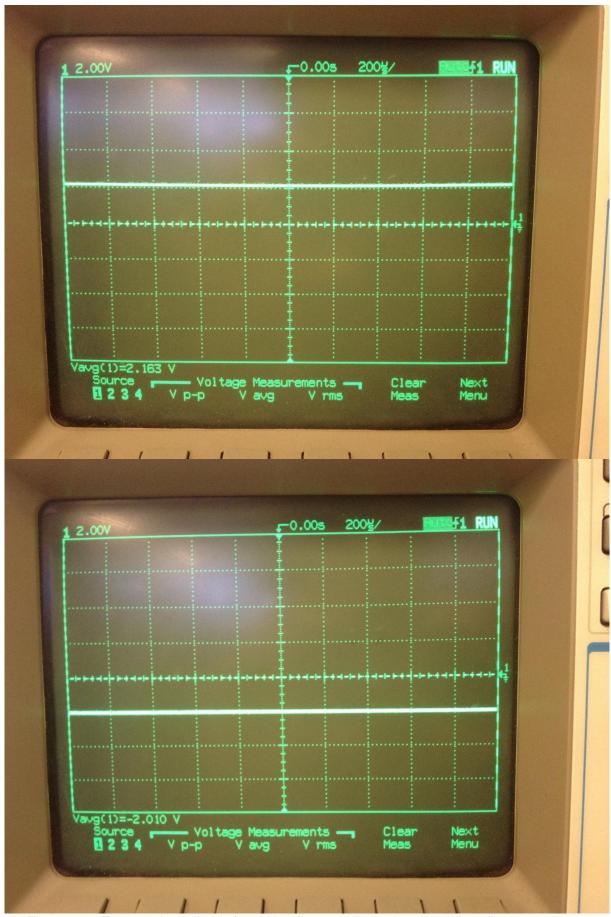


Figura 6.6. Formas de onda da fonte de alimentação revista, com ligações corretas no circuito de acoplamento.

6.3 ENSAIOS COM O MÓDULO REVISADO

Utilizando o protótipo da Fig. 6.1 foram executados ensaios no mesmo formado do realizado na sessão 4.3. O ambiente de execução dos ensaios pode ser observado nas Fig. 6.7 e Fig. 6.8.

A Figura 6.8 mostra em detalhe a bancada durante a execução dos ensaios. É possível notar a presença do resistor shunt que foi o elemento utilizado para se medir a corrente para o SA9903B. Foram coletados valores de Tensão, Corrente e Potência Ativa durante os ensaios, os instrumentos utilizados podem ser observados na Fig. 6.7 e na Fig. 6.8. O wattímetro utilizado não oferecia muita precisão nas medidas.

Na Figura 6.7 é possível ver o processo de coleta dos dados.

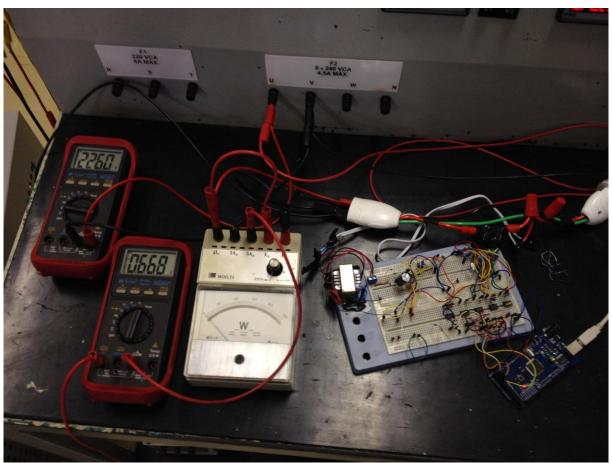


Figura 6.7. Detalhe dos multímetros e do wattímetro utilizados para realizar o acompanhamento dos testes.

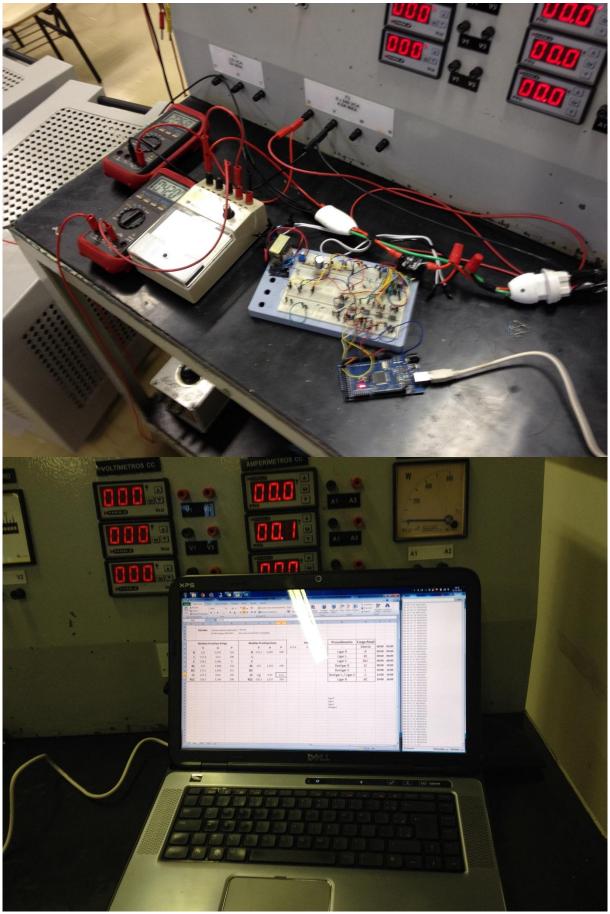


Figura 6.8. Ambiente de teste. Acima, ligações feitas entre o protótipo, equipamentos de medição e a bancada. Abaixo, computador coletando os dados.

6.3.1 Resultados gráficos

Foram executados no total três ensaios com o módulo revisado:

- i. Módulo revisado sem alteração no software;
- ii. Módulo revisado com software modificado para comportar os dados obtidos;
- iii. Módulo revisado com software modificado para comportar os dados obtidos com alterações na malha de resistores que permite a medição da tensão da rede.

A partir dos dados obtidos foram montados os gráficos das Fig. 6.9, Fig. 6.10 e Fig. 6.11. Cada gráfico expõe:

- i. Voltagem da rede superior esquerdo;
- ii. Frequência da rede superior direito;
- iii. Potência ativa inferior esquerdo;
- iv. Potência reativa inferior direito.

Visualmente é possível notar diferenças no desempenho de cada configuração. O ensaio referente à Fig. 6.9 – sem alterações no software - apresenta menos variação nos valores de voltagem e frequência, menos ruído na medição da potência reativa, e diminui as inclinações nas medidas da potência ativa vistas na Fig. 4.9.

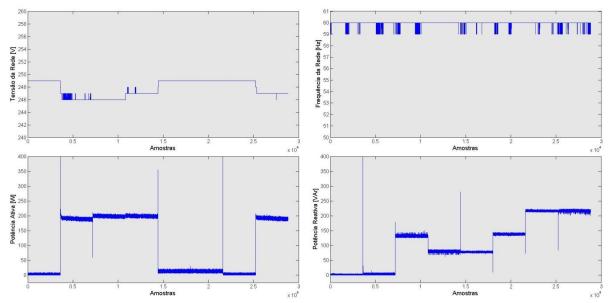


Figura 6.9. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa.

É possível notar através das Fig. 6.10 e Fig 6.11 que a alteração do tipo de variável utilizado é crucial para que as medições sejam corretas. A potência reativa em especial pode assumir valores negativos, que não foram considerados para a primeira versão do módulo.

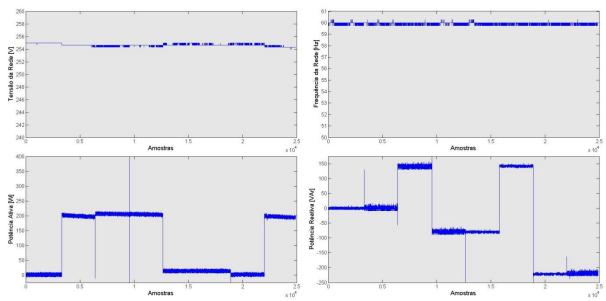


Figura 6.10. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado e utilizando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com três 120kΩ. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa.

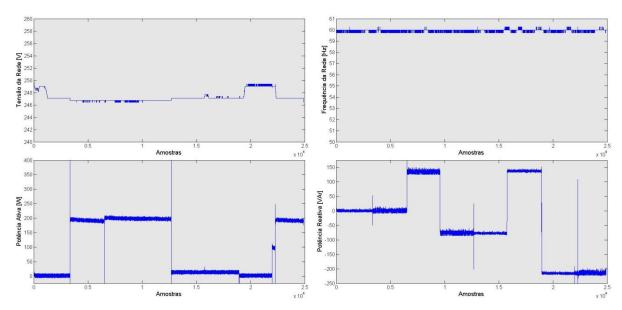


Figura 6.11. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado e utilizando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com um $150k\Omega$ e dois $110k\Omega$. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa.

As grandes variações nas medidas das potências podem ser provenientes da existência de muito ruído no processo, devido às tolerâncias dos componentes e à operação dos conversores ADC, por exemplo.

A fim de minimizar a presença de ruído, foi aplicado um filtro de média móvel, com 16 amostras nos sinais obtidos. A Figura 6.12 mostra uma comparação entre o sinal filtrado em vermelho e o sinal original em azul.

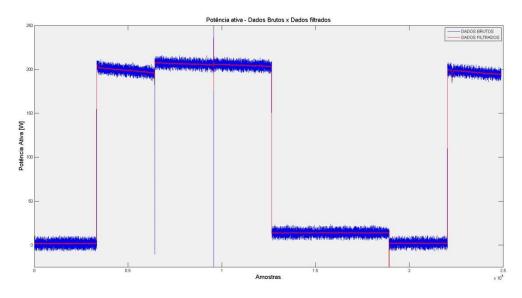


Figura 6.12. Sobreposição do sinal original com o sinal filtrado para o experimento de potência Ativa.

A aplicação do filtro pode ser vista em detalhe na Fig. 6.13, para o ensaio com a carga resistiva.

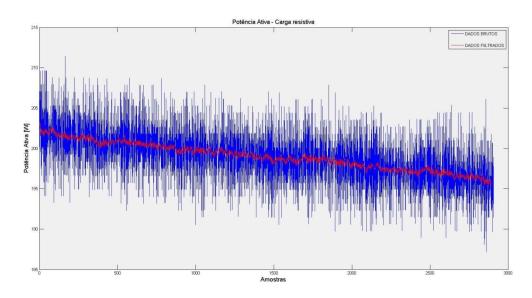


Figura 6.13. Sobreposição do sinal original com o sinal filtrado em detalhe, carga resistiva.

A aplicação de um filtro simples como o de média móvel forneceu um sinal com muito mais qualidade, sendo possível concluir que existem muitas componentes de alta frequência nos sinais obtidos.

6.3.2 Análise dos gráficos

A partir dos gráficos das Fig. 6.9, 6.10 e 6.11, foi possível montar as Tab. 6.1, Tab. 6.2, Tab. 6.3 e Tab. 6.4.

A Tabela 6.1 se refere ao ensaio com a primeira versão do módulo de medição de energia. Foram separados os dados referentes a cada etapa do ensaio, identificadas na primeira coluna da tabela abaixo do campo "Carga" de acordo com cada carga utilizada. Para cada tipo de carga é mostrado o valor da média e do desvio padrão para as potências ativa e reativa. Mais a direita na Tab. 6.1 estão os resultados referentes aos dados filtrados, à esquerda estão os resultados referentes aos dados brutos obtidos. A Tab. 6.1 também contém a média e o desvio padrão para as medições de voltagem e frequência. Comparando as médias antes e após a filtragem, nota-se que não há mudança, já os desvios-padrão são reduzidos drasticamente, como esperado, e indicam o nível de melhoria da dispersão dos dados obtidos.

Tabela 6.1. Médias e desvios-padrão referentes à primeira versão do módulo de medição (Fig. 4.9).

Ensaio: I	Ensaio: Primeira versão do módulo de medição de energia								
	ı	DADOS E	RUTO	RUTOS Desvio		DADOS FILTRADOS			
Grandeza			D					Desvio	
	Mé	édia	Pa	adrão	Me	Média		Padrão	
Voltagem		252,54		1,56		252,54		1,55	
Frequência		59,95		0,23		59,95		0,08	
Potência	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	
Carga	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	
R	203,05	2,79	3,88	4,34	203,04	2,79	2,08	0,43	
L	67,70	343,47	3,21	4,33	67,70	343,47	0,28	0,55	
С	2,07	227,04	1,97	3,91	2,07	227,04	0,57	0,50	
R//L	261,79	332,38	3,50	5,60	261,79	332,38	0,73	1,01	
R//C	206,09	226,52	4,16	4,60	206,08	226,52	2,50	0,55	
L//C	63,57	119,03	3,17	4,11	63,57	119,03	0,25	0,43	
R//L//C	256,56	114,76	3,44	5,09	256,56	114,76	0,50	0,56	

Seguindo o mesmo raciocínio aplicado para a Tab. 6.1, temos na Tab. 6.2 os resultados para o ensaio com módulo revisado e software sem alteração (Fig. 6.9). A Tab. 6.3 fornece os resultados para o ensaio com módulo revisado e software alterado (Fig. 6.10) e a Tab. 6.4, os resultados para o ensaio com módulo revisado, software alterado e resistores alterados (Fig. 6.11).

Tabela 6.2. Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado (Fig. 6.9).

Ensaio: Módulo atualizado								
		DADOS B	RUTO	S	DADOS FILTRADOS			
Grandeza			Desvio				Desvio	
	Mé	edia	Padrão		Média		Padrão	
Voltagem		247,78		1,28		247,78		1,27
Frequência		59,99		0,10		59,99		0,03
Potência	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa
Carga	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]
R	190,24	1,38	3,97	2,30	190,23	1,38	1,57	0,38
L	13,11	138,20	3,62	1,94	13,11	138,20	0,26	0,27
С	2,80	216,62	2,40	2,01	2,80	216,62	0,51	0,57
R//L	198,31	134,30	3,67	3,18	198,31	134,30	0,72	0,36
R//C	191,52	213,84	3,85	3,10	191,52	213,84	1,31	0,45
L//C	13,08	77,66	3,60	1,85	13,08	77,66	0,25	0,18
R//L//C	198,53	76,96	3,66	3,16	198,53	76,96	0,69	0,35

Tabela 6.3. Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado com dados em ponto flutuante (Fig. 6.10).

Ensaio: Módulo e tipo de dados atualizados, malha com 3x 120k								
		DADOS E	RUTO	S	DADOS FILTRADOS			
Grandeza			Desvio				Desvio	
	Mé	édia	Padrão		Média		Padrão	
Voltagem		254,66		0,22		254,66		0,20
Frequência		59,99		0,07		59,99		0,02
Potênc	a Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa
Carga	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]
R	199,01	1,17	3,85	4,22	199,01	1,17	1,65	0,88
L	13,83	141,91	3,39	2,38	13,82	141,91	0,27	0,47
С	2,01	-221,73	3,34	2,20	2,01	-221,72	0,29	0,45
R//L	206,22	141,21	3,37	4,09	206,23	141,21	0,70	0,76
R//C	196,44	-218,35	3,58	3,96	196,43	-218,35	1,50	1,01
L//C	13,84	-79,73	3,35	2,21	13,84	-79,73	0,27	0,41
R//L//C	204,54	-78,36	3,41	4,07	204,54	-78,36	0,74	0,79

Tabela 6.4. Médias e desvios-padrão referentes ao módulo de medição revisado com dados em ponto flutuante e malha com dois resistores 110k e um 150k (Fig. 6.11).

Ensaio: Módulo e tipo de dados atualizados, malha com 150k + 2x 110k									
	ı	DADOS B	RUTO	S	DADOS FILTRADOS				
Grandeza			Desvio					Desvio	
	Mé	édia	Pa	adrão	Mé	édia	Padrão		
Voltagem		247,30		0,83		247,30		0,82	
Frequência		60,00		0,06		60,00		0,02	
Potência	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	Ativa	Reativa	
Carga	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	P[W]	Q[VAr]	
R	192,57	0,93	3,82	3,86	192,56	0,93	1,79	0,71	
L	13,45	137,56	3,32	2,23	13,45	137,56	0,27	0,50	
С	1,95	-215,52	3,33	2,16	1,94	-215,53	0,28	0,52	
R//L	199,53	135,69	3,41	4,12	199,53	135,69	1,09	0,83	
R//C	192,45	-213,21	3,39	3,79	192,44	-213,22	1,07	0,85	
L//C	13,40	-77,26	3,28	2,14	13,40	-77,26	0,27	0,42	
R//L//C	197,65	-75,84	3,23	4,08	197,66	-75,84	0,50	0,69	

Nota-se que ao considerar o sinal dos dados obtidos nos ensaios a dispersão das medidas de tensão e frequência foi reduzida, e para essas grandezas o filtro utilizado ofereceu pouca melhoria quanto à dispersão.

7 Conclusão

7.1 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O módulo de medição de energia desenvolvido no LARA foi estudado e ensaios foram realizados após alterações na estrutura da instrumentação eletrônica do mesmo. A estrutura de instrumentação do módulo permite a medição de parâmetros físicos - como voltagem, corrente e frequência -, geração e transmissão de sinais e conversão de níveis de voltagem para utilização com diversos dispositivos. As modificações provenientes deste trabalho resultaram em uma versão revisada do módulo de medição de energia, com resultados em níveis aceitáveis de exatidão e precisão quando levados em consideração os níveis de tolerância das cargas disponíveis para ensaio.

No total, foram realizados quatro ensaios:

- i. Ensaio com a primeira versão do módulo de medição.
- ii. Ensaio com a versão revisada do módulo de medição.
- iii. Ensaio com a versão revisada do módulo de medição e alteração no programa de aquisição dos dados.
- iv. Ensaio com a versão revisada do módulo de medição e alteração no programa de aquisição dos dados. Ajuste no medidor de energia com outro arranjo de resistores para a entrada do sensor de voltagem.

Devido à alta estabilidade da frequência da rede elétrica brasileira é possível interpretar as oscilações como erros de quantização nas operações com 24 bits utilizadas nas medições. A medida de tensão em todos os casos apresenta um *offset* do valor real, com alta precisão nas medidas — pode-se considerar a precisão alta pois nos resultados em que o nível de tensão variou mais de fato existiram flutuações nos níveis de tensão devido as limitações do ambiente de teste. A diferença entre a tensão medida e a esperada persiste desde o desenvolvimento inicial sugerindo que um procedimento de calibração seja planejado e aplicado. Dentre os cenários testados para o ajuste do sensor de voltagem, a configuração com três resistores de $120k\Omega$ apresentou melhores resultados e é a recomendada para aplicações às condições nominais, podendo ser facilmente alterada para considerar diferentes faixas de tolerância e valores nominais de operação.

Foram obtidos resultados melhores para as medições de potência ativa e reativa, sendo mais visíveis os resultados para cargas resistivas e indutivas, bem como uma leve redução no ruído das medidas. Apesar da leve redução de ruído, este ainda é proeminente nas medidas de potência, por isso foi aplicado um filtro de média móvel.

Visto que a utilização de um filtro simples como o de média móvel melhora bastante as medidas, deve-se buscar implementar algum algoritmo de filtragem no programa de leitura

para melhorar a resposta do sistema. Outro aspecto computacional que deve ser analisado é o tipo de variável considerado nos programas. O ideal é que seja utilizado um tipo de variável com sinal para diferenciar cargas reativas positivas e negativas. Variáveis do tipo inteiro com sinal devem ser consideradas em oposição ao ponto flutuante.

A fonte de alimentação proposta supre adequadamente o circuito de medição e a parte do circuito de acoplamento responsável pelas entradas do circuito de medição. Caso se deseje utilizar outro projeto de fonte, basta que a demanda não exceda $100 \, mA$, assim é garantido que a fonte não sofrerá na regulação da tensão.

A utilização de resistores de polarização no circuito de acoplamento ofereceu proteção para os fotoemissores e ofereceu um controle para o consumo de corrente por estes componentes. A ligação dos pinos de saída do circuito de medição, principalmente do sinal de detecção de passagem por zero, estava modificando as formas de onda do circuito de alimentação – o ponto médio da fonte simétrica (terra) estava oscilando.

Os resultados obtidos mostram que o projeto de instrumentação apresentado deve ser considerado nas próximas iterações do módulo de medição de energia.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

O próximo passo na evolução do módulo de medição de energia envolve a utilização de um microcontrolador embarcado. O Arduino é excente para prototipagem, mas é um excesso de hardware e de funcionalidades para esta aplicação. Poderiam ser utilizados módulos ZigBit por exemplo, também em desenvolvimento no LARA.

A utilização de tecnologias sem fio também pode ser explorada, por exemplo, na criação de dispositivos que se integram oferecendo uma rede de controle semelhante às utilizadas nos edifícios inteligentes.

Ainda é possível projetar e executar testes de calibração com o protótipo de medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAMES, Evaluation Board for the SA9903B Energy Metering IC.
- [2] SAMES, SA9903B-Single Phase Power / Energy IC with SPI Interface.
- [3] DATASHEET Single-Channel: 6N137 High Speed 10Mbit/s Logic Gate Optocouplers.
- [4] MATOS, L. G.; FILHO, N. C. M. Economia de Energia e Gravação Remota de Dispositivos ZigBee Visando a Automação Predial. 2013. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF.
- [5] NEPOMUCENO, A. L. S.; COZENDEY, G. C. Desenvolvimento de um Módulo de Medição de Energia Wireless com Transmissor em Tempo Real de Parâmetros para Cargas de até 9kW. 2013. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF.
- [6] SPI Wikipedia, the free encyclopedia. Dezembro de 2014. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus.
- [7] Impedância elétrica Wikipedia, a enciclopédia livre. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Imped%C3%A2ncia_el%C3%A9trica.
- [8] Mário Ferreira Alves, "ABC do Osciloscópio", sebenta publicada na editorial do Instituto Superior de Engenharia do Porto, 3ª Edição, Fevereiro de 2007. Disponível em: http://www.ceset.unicamp.br/~leobravo/TT%20305/O%20Osciloscopio.pdf.
- [9] Lima, Charles Borges de AVR e Arduino: técnicas de projeto / Charles Borges de Lima, Marco Valério Micrim Villaça. 2. Ed Florianópolis: Ed. Dos autores 2012.
- [10] ATMEL, 8-bit Atmel Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash.
- [11] DATASHEET LM78LXX Series 3-Terminal Positive Regulators.
- [12] ARDUINO HomePage. Dezembro 2014. Disponível em: http://www.arduino.cc.
- [13] IRWIN, J. David Análise de Circuitos em Engenharia / J. David Irwin ; tradução Luis Antônio Aguirre, Janete Furtado Aguirre ; revisão técnica Antonio Pertence Júnior São Paulo ; MAKRON Books, 2000.

- [14] Rubio, M. G. Curso de Instrodução à Instrumentação em Engenharia Módulo Básico. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT. Divisão de Engenharia Mecânica. Divisão de Tecnologia de Transportes. Divisão de Engenharia Civil. São Paulo, 2000. Disponível em: http://libertas.pbh.gov.br/~danilo.cesar/outros/concurso_ufmg/Curso%20de%20Introdu%C3%A7%C3%A30%20em%20engenharia.pdf.
- [15] ROTEIRO Ensaio 1: Medições Monofásicas Utilizando resistores, indutores, capacitores e lâmpadas. Departamento de Engenharia Elétrica (ENE). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF.
- [16] EnOcean Disponível em https://www.enocean.com/en/home/
- [17] The ZigBee Alliance Disponível em http://www.zigbee.org/
- [18] The Internet of Things is powered by Z-Wave Disponível em http://z-wavealliance.org/
- [19] Intelligent Electronic Device : Definition Subnet Disponível em: http://www.subnet.com/resources/dictionary/Intelligent-Electronic-Device.aspx

ANEXOS

I Diagramas Esquemáticos e Lista de Materiais

- I.1 Circuito de Alimentação
- I.2 Circuito de Acoplamento
- I.3 Circuito de Medição
- I.4 Lista de Materiais

II Códigos

- II.1 Controle dos Optoacopladores (TesteOptos.ino)
- II.2 Aquisição (aquisicao_sa9903b_Serial_v2.ino)
- II.3 Média Móvel (media_movel.m)
- II.4 Traçado dos Gráficos
 - II.4.1 Plotter2.m
 - II.4.2 createfigure.m

III Descrição do Conteúdo do Cd

- III.1 Códigos
- III.2 Dados
- III.3 Figuras Relatório
- III.4 Imagens
- III.5 Relatório

IV Resultados dos Ensaios - Gráficos

- IV.1 Módulo de Medição de Energia Primeira Versão
- IV.2 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada
- IV.3 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no Código
- IV.4 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no Código e Ajuste de Resistores

I DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E LISTA DE MATERIAIS

I.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO

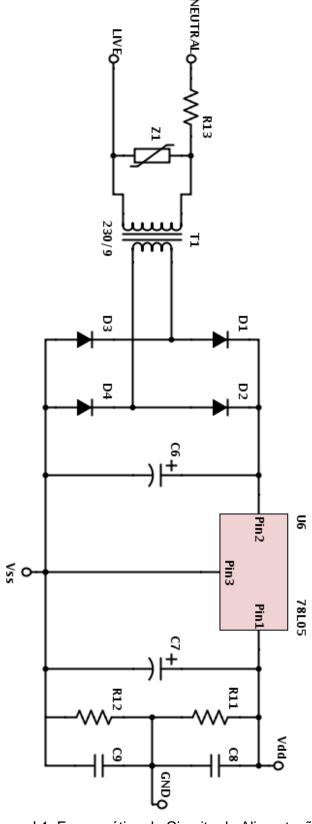


Figura I.1. Esquemático do Circuito de Alimentação.

I.2 CIRCUITO DE ACOPLAMENTO

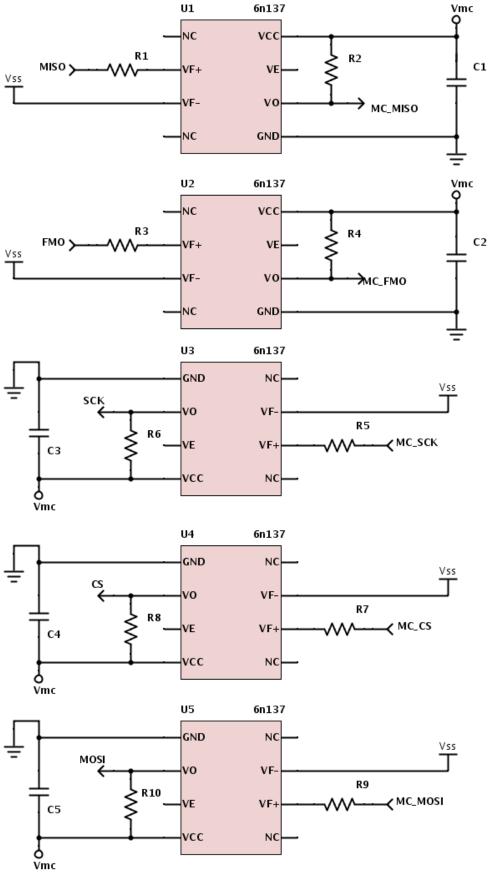


Figura I.2. Esquemático do Circuito de Acoplamento.

I.3 CIRCUITO DE MEDIÇÃO

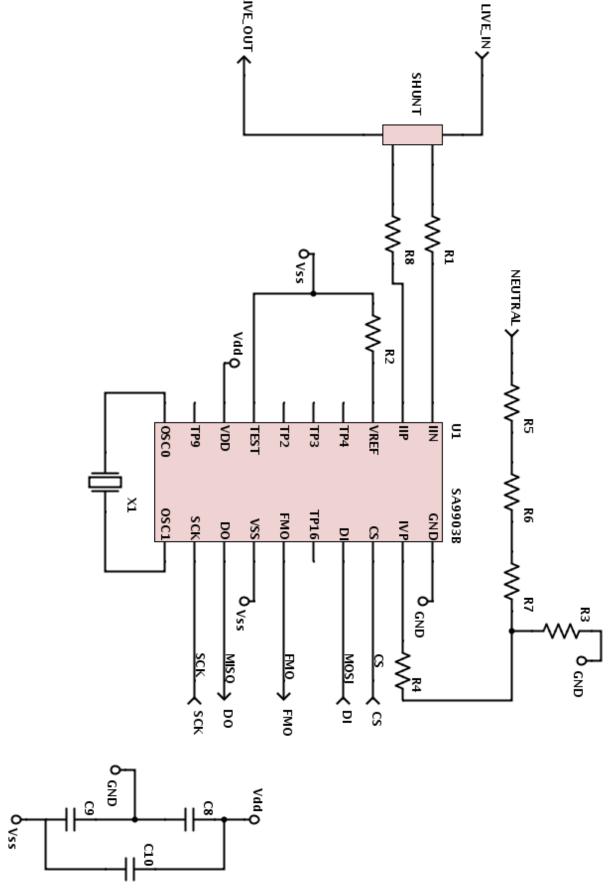


Figura I.3. Esquemático do Circuito de Medição.

I.4 LISTA DE MATERIAIS

Tabela I.1. Lista de materiais para montagem do módulo revisado.

Componente	Valor	Descrição
C1, C2, C3, C4, C5	100nF/16V	Capacitor cerâmico
C6	2200u/25V	Capacitor eletrolítico
C7	220u/16V	Capacitor eletrolítico
C8, C9	220nF	Capacitor cerâmico
C10	1μF	Capacitor cerâmico
D1, D2, D3, D4	1N4148	Diodo de silício
R1, R3, R5, R7, R9	390Ω	1/4 W 5%
R2, R4, R6, R8, R10	1kΩ	1/4 W 5%
R11, R12	1kΩ	1/4 W 5%
R13	10Ω	2 W 5%
R14, R15	6,2kΩ	1/4 W 1%
R16, R17	24kΩ	1/4 W 1%
R18	1ΜΩ	1/4 W 1%
R19, R20, R21	120kΩ	1/4 W 1%
SHUNT	200 mV/40A (5mΩ)	Resistor Shunt (TGHGCR0050FE-ND)
T1	Transformador	9V, 1.5VA
U1, U2, U3, U4, U5	6N137	PDIP8
U6	78L05	TO-92
U7	SA9903B	PDIP20
X1	3.5795 MHz	Cristal oscilador
Z1	S14 / 275	Varistor

II CÓDIGOS

II.1 CONTROLE DOS OPTOACOPLADORES (TesteOptos.ino)

```
Autor: Leonardo Almeida Cunha
Email: lalmcunha@gmail.com
Testa 3 Pinos
 22 -> Tecla 2
 24 -> Tecla 4
 26 -> Tecla 6
 * /
//Globais
int option;
int read1=0;
int read2=0;
int read3=0;
//int teste;
// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
 pinMode(22, OUTPUT);
 pinMode(24, OUTPUT);
 pinMode (26, OUTPUT);
 Serial.begin(9600);
 while(!Serial1);
}
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  if (Serial.available()>0) {
  option=Serial.read();
  option-=48;
  switch(option) {
    case 2:
      if(read1) {
        Serial.print("Desativando LED");
        Serial.println(option, DEC);
        digitalWrite(22,LOW); //*
        read1=0; }
      else {
        Serial.print("Ativando LED");
        Serial.println(option, DEC);
        digitalWrite(22, HIGH);
        read1=1; }
      break;
    case 4:
      if(read2) {
        Serial.print("Desativando LED");
        Serial.println(option, DEC);
```

```
digitalWrite(24,LOW);
        read2=0; }
      else {
        Serial.print("Ativando LED");
        Serial.println(option, DEC);
        digitalWrite(24, HIGH);
        read2=1; }
      break;
    case 6:
      if(read3) {
        Serial.print("Desativando LED");
        Serial.println(option,DEC);
        digitalWrite(26,LOW);
        read3=0; }
      else {
        Serial.print("Ativando LED");
        Serial.println(option, DEC);
        digitalWrite(26, HIGH);
        read3=1; }
      break;
    default:
    break;
  }
}
```

II.2 AQUISIÇÃO (aquisicao_sa9903b_Serial_v2.ino)

```
Autores: André Luiz Siega Nepomuceno e Gabriel Calache Cozendey
Email: andrerm2k@hotmail.com / gcozendey@outlook.com
Este código é livre para cópia.
 */
 /*
Modificado por: Leonardo Almeida Cunha
 Email: lalmcunha@gmail.com
 */
#include "sa9903b.h"
#include <SPI.h> //Biblioteca utilizada na implementação do ModBus, não é
necessária para o fim deste trabalho
//Número de identificação do nó escravo.
#define SLAVE ID 1
//Tempo de amostragem utilizado
#define SAMPLE TIME 20
//Descrição das variáveis no registrador holding. Note que REGISTER SIZE
apenas define o tamanho desse vetor.
enum {
  ERRORS, VOLTAGE, FREQUENCY, ACTIVE, REACTIVE, REGISTER SIZE };
SA9903B sa9903b;
//unsigned int reg[REGISTER SIZE] = {0}; //Tipo de variável utilizado no
trabalho original
```

```
float reg[REGISTER_SIZE] = {0}; //Tipo de variável corrigido
void setup ()
  sa9903b.Setup();
  //Configurar porta serial
  Serial.begin(9600);
}
int flag = 0;
int temp=0;
unsigned long starttime;
unsigned long currenttime;
int inicio=1;
void loop ()
  sa9903b.Run();
if (Serial.available()>0) {
   flag=Serial.read();
    flag-=48;
  if(flag){
   Serial.println("\nComunicacao Serial Ligada");
    if(inicio){
      starttime=micros();
      inicio=0;
    }
  }
   Serial.println("\nComunicacao Serial Desligada");
}
    // Atualiza os registradores de holding e MODBUS
    if (sa9903b.GetUpdatedStatus())
      reg[VOLTAGE] = sa9903b.GetVoltage();
      req[FREQUENCY] = sa9903b.GetFrequency();
      reg[ACTIVE] = sa9903b.GetActive(); /*Considerada valor com sinal para
as medições de potência*/
      reg[REACTIVE] = sa9903b.GetReactive();
      currenttime=micros()-starttime;
      //Enviar por Serial
      Serial.print(reg[VOLTAGE]);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(reg[FREQUENCY]);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(reg[ACTIVE]);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(reg[REACTIVE]);
      Serial.print(" ");
      Serial.println(currenttime) ;
```

```
delay(SAMPLE_TIME);

}
}
```

II.3 MÉDIA MÓVEL (media_movel.m)

```
%Filtro de média móvel
function vm=media_movel(v,k)
n=length(v);
for i=2:n-k+1
    vm(i)=mean(v(i:i+k-1));
end
```

II.4 TRAÇADO DOS GRÁFICOS

II.4.1 Plotter2.m

```
%%%Tirar dos comentários o processo que se deseja fazer.
%%%O padrão habilitado traça os gráficos para o ensaio do módulo revisado
%%%com várias em ponto flutuante.
응응응
%%%10 = 1.0 primeira versão
%%%20 = 2.0 segunda versão
%%%Seleção do ensaio
%V=M10;
%V=M20 2;
V=M20 float 120k;
%V=M20 float 150k;
%%%Comandos para traçar os gráficos individualmente
%subplot(2,2,1);
%plot(V(:,1))
%subplot(2,2,2);
%plot(V(:,2))
%subplot(2,2,3);
%plot(V(:,3))
%subplot(2,2,4);
%plot(V(:,4))
%%%Usar este comando para plotar na formatação
createfigure (V(:,1),V(:,2),V(:,3),V(:,4))
```

```
%%%Plotar dados individuais (etapas do ensaio)
%V2=RL M10;
%V2=M20 float 120k PATIVA R;
%plot(V2(:,2))
%%%Plotar com média móvel
%subplot(2,2,1);
%plot(media movel(V(:,1),16))
%subplot(2,2,2);
%plot(media movel(V(:,2),16))
%subplot(2,2,3);
%plot(media movel(V(:,3),16))
%subplot(2,2,4);
%plot(media movel(V(:,4),16))
%%%Traçar gráfico da média móvel
TEMP=media movel(V(:,2),16);
%plot(TEMP)
```

II.4.2 createfigure.m

```
%%%Código gerado pelo Matlab para ajusatar a formatação das figuras.
```

```
function createfigure(Y1, Y2, Y3, Y4)
%CREATEFIGURE (Y1, Y2, Y3, Y4)
% Y1: vector of y data
  Y2: vector of y data
  Y3: vector of y data
% Y4: vector of y data
% Auto-generated by MATLAB on 17-Nov-2014 23:30:03
% Create figure
figure1 = figure;
% Create axes
axes1 = axes('Parent', figure1,...
    'Position',[0.041458333333333 0.553191489361702 0.448125
0.425428988968856],...
    'FontSize',12,...
    'FontName', 'Arial', ...
    'Color',[0.905882352941176 0.905882352941176 0.905882352941176]);
%% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim(axes1,[0 30000]);
%% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes1,[240 260]);
box(axes1, 'on');
hold(axes1, 'all');
% Create plot
plot(Y1, 'Parent', axes1);
% Create xlabel
```

```
xlabel('Amostras', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Arial');
% Create ylabel
ylabel('Tensão da Rede [V]','FontSize',14,'FontName','Arial');
% Create axes
axes2 = axes('Parent', figure1,...
    'Position',[0.54166666666667 0.553191489361702 0.447708333333329
0.425428988968857],...
    'FontSize', 12, ...
    'FontName', 'Arial',...
    'Color',[0.905882352941176 0.905882352941176 0.905882352941176]);
%% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes2,[50 61]);
box(axes2, 'on');
hold(axes2, 'all');
% Create plot
plot(Y2, 'Parent', axes2);
% Create xlabel
xlabel('Amostras','FontSize',14,'FontName','Arial');
% Create ylabel
ylabel('Frequência da Rede [Hz]','FontSize',14,'FontName','Arial');
% Create axes
axes3 = axes('Parent', figure1,...
    'Position', [0.041458333333333 0.0643166032873444 0.448125
0.425045098840315],...
    'FontSize',12,...
    'FontName', 'Arial', ...
    'Color',[0.905882352941176 0.905882352941176 0.905882352941176]);
%% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes3,[0 400]);
box(axes3, 'on');
hold(axes3, 'all');
% Create plot
plot(Y3, 'Parent', axes3, 'Color', [0 0 1]);
% Create xlabel
xlabel('Amostras','FontSize',14,'FontName','Arial');
% Create ylabel
ylabel('Potência Ativa [W]', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Arial');
% Create axes
axes4 = axes('Parent', figure1,...
    'Position',[0.54166666666667 0.064316603287345 0.447708333333333
0.425045098840315],...
    'FontSize',12,...
    'FontName', 'Arial', ...
    'Color',[0.905882352941176 0.905882352941176 0.905882352941176]);
box(axes4, 'on');
hold(axes4, 'all');
% Create plot
plot(Y4, 'Parent', axes4);
% Create xlabel
```

```
xlabel('Amostras','FontSize',14,'FontName','Arial');
% Create ylabel
ylabel('Potência Reativa [VAr]','FontSize',14,'FontName','Arial');
```

III DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

III.1 CÓDIGOS

Códigos fonte em linguagem C proprietária do Arduino para os códigos executados na plataforma. Scripts dos códigos executados no Matlab.

III.2 DADOS

Contém o Espaço de trabalho do Matlab (Dados_Ensaios_FINAL) com todas os dados obtidos nos experimentos armazenados em variáveis seguindo a descrição:

- M10 Módulo de Medição de Energia Primeira Versão;
- M20 Módulo de Medição de Energia Versão Revisada;
- M20_FLOAT_120K Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no Código;
- M20_FLOAT_150K Módulo de Medição de Energia Versão Revisada com Modificação no Código e Ajuste de Resistores.

III.3 FIGURAS RELATÓRIO

Contém as figuras utilizadas no relatório.

III.4 IMAGENS

Contém imagens e fotografias organizadas por seus conteúdos.

III.5 RELATÓRIO

Cópia em PDF do Relatório do Trabalho de Graduação

IV Resultados dos Ensaios - Gráficos

IV.1 MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA PRIMEIRA VERSÃO

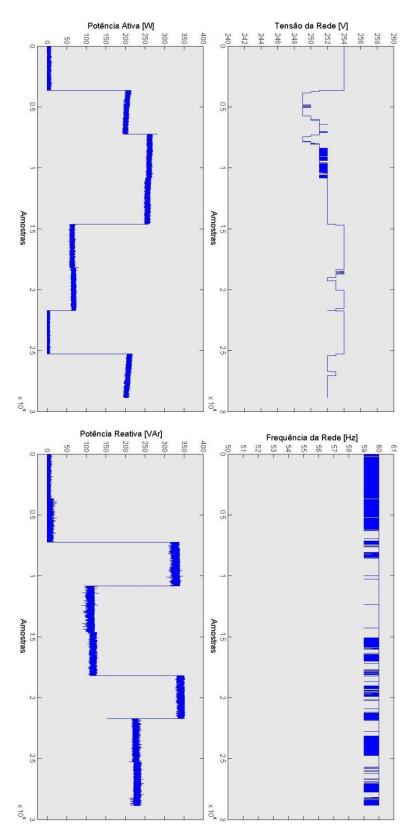


Figura IV.1. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com a primeira versão do módulo de medição de energia. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa. Versão ampliada.

IV.2 MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA VERSÃO REVISADA

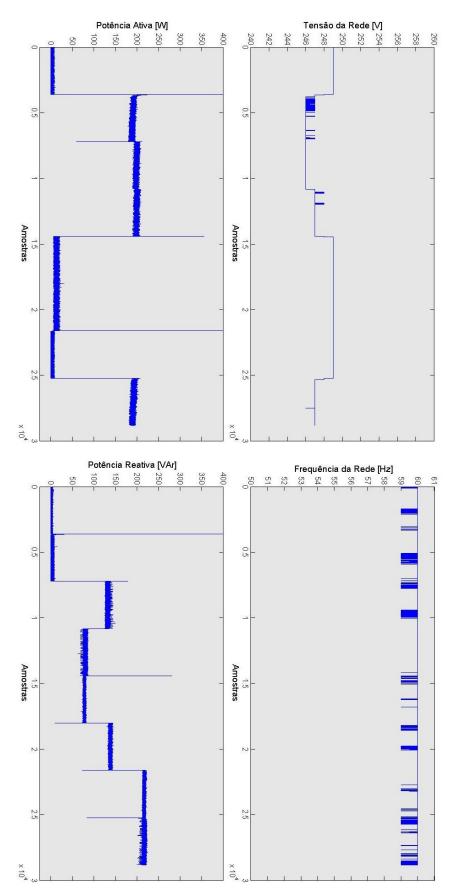


Figura IV.2. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa. Versão ampliada.

IV.3 MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA VERSÃO REVISADA COM MODIFICAÇÃO NO CÓDIGO

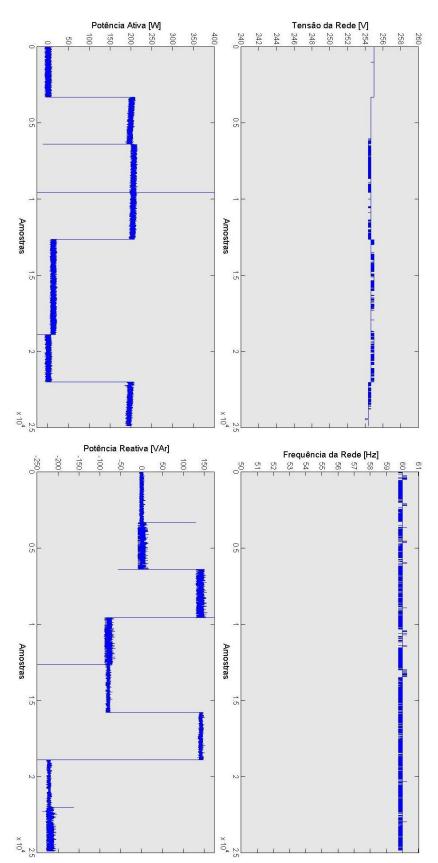


Figura IV.3. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado e utilizando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com três $120k\Omega$. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa. Versão ampliada.

IV.4 MÓDULO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA VERSÃO REVISADA COM MODIFICAÇÃO NO CÓDIGO E AJUSTE DE RESISTORES

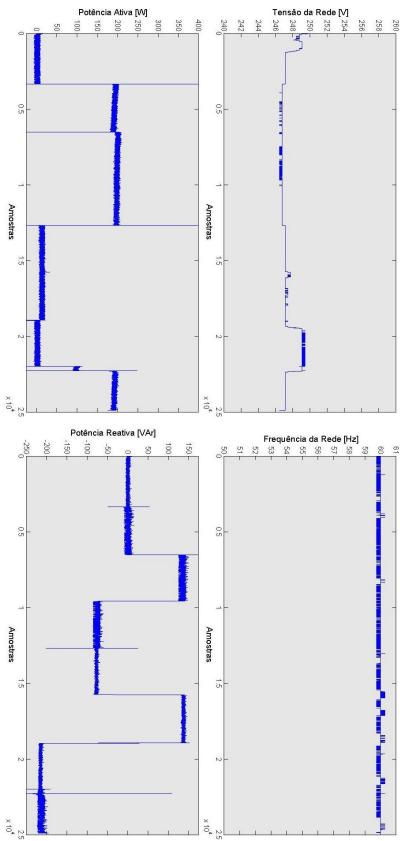


Figura IV.4. Gráficos obtidos a partir das medições realizadas com o módulo de medição revisado e utilizando dados do tipo ponto flutuante. Malha de resistores com um $150k\Omega$ e dois $110k\Omega$. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: Voltagem da rede, frequência da rede, potência ativa e potência reativa. Versão ampliada.