

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Dissertação de Mestrado

Projeto e Implementação de Dispositivo  
Eletrônico Inteligente Flexível para  
Aplicações em *Smart Grid*



Tállyson da Silva Santos

João Pessoa-PB, Brasil  
Março – 2018

## Projeto e Implementação de Dispositivo Eletrônico Inteligente Flexível para Aplicações em *Smart Grid*

Resumo: Segundo a Agência Internacional de Energia, “uma *Smart Grid* é uma rede de eletricidade que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração, encontrando uma variedade de demandas e usuários. Essas redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stake holders* do mercado de eletricidade, de forma a otimizar a utilização e operação dos ativos no processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantêm a confiabilidade, resiliência e a estabilidade do sistema.” Nesse contexto e visando a integração e convergência dos diferentes sistemas para incorporar uma infraestrutura de uma *Smart Grid*, esse trabalho apresenta a modelagem matemática, o projeto e a implementação de um dispositivo eletrônico inteligente flexível. Esse dispositivo proposto difere dos dispositivos existentes por possuir flexibilidade, podendo realizar a aquisição de diferentes variáveis (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.) com diferentes valores de condicionamento para os sinais, ajuste este realizado por *software*. O dispositivo eletrônico inteligente pode funcionar como um medidor inteligente, como um controlador dinâmico (local) e/ou como um controlador de supervisão, melhorando assim a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens do dispositivo proposto são: baixo custo, versatilidade (as mudanças podem ser feitas por *software*), alta capacidade de processamento (processador ARM), recursos de comunicação (arquitetura de rede híbrida), fácil integração (interoperabilidade), fácil manutenção (modularidade) e escalabilidade.

Palavras-chaves: *Smart Grid*, Dispositivo Eletrônico Inteligente, Condicionamento de sinais.

## Design and Implementation of a Flexible Intelligent Electronic Device for Smart Grid Applications

Abstract: According to the International Energy Agency/USA (IEA): “a smart grid (SG) is an electricity grid that uses digital technology to monitor and manage the transportation of electricity from all sources of generation, finding a variety of demands and users. These networks will be able to coordinate the needs and capabilities of all generators, operators, end-users and stake holders of the electricity market in order to optimize the use and operation of the assets in the process, minimizing environmental costs and impacts while maintaining reliability, resilience and stability of the system”. In this context and looking for the integration and convergence of different systems to incorporate an infrastructure of a SG, this work presents the mathematical modeling, design and implementation of a flexible intelligent electronic device (IED). The proposed IED differs from the existing IEDs presenting flexibility, being able to realize the acquisition of different variables (voltage, current, temperature, pressure, etc.) with different conditioning values, furthermore, the conditioning is carried out by software. The IED can operate as a smart meter, as a dynamic controller (local) and/or as a supervisory controller, thus improving the efficiency, reliability and security of the system. Other advantages of the proposed IED are: low cost, versatility (changes can be made by software), high processing capacity (ARM processor), communication features (hybrid network architecture (HNA)), easy integration (interoperability), easy maintenance (modularity) and scalability.

Keywords: Smart Grid, Intelligent Electronic Device, Signal Conditioning.

**TÁLLYSON DA SILVA SANTOS**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO INTELIGENTE  
FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES EM *SMART GRID***

**JOÃO PESSOA**

**2018**

**TÁLLYSON DA SILVA SANTOS**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO INTELIGENTE  
FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES EM *SMART GRID***

Dissertação de Mestrado apresentado ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da  
Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Salvadori  
Co-Orientador: Prof. Dr. Lucas V. Hartmann

**JOÃO PESSOA**

**2018**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S237p Santos, Táallyson da Silva.

Projeto e implementação de dispositivo eletrônico  
inteligente flexível para aplicações em smart grid /  
Táallyson da Silva Santos. - João Pessoa, 2018.  
62 f. : il.

Orientação: Fabiano Salvadori.

Coorientação: Lucas V Hartmann.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia elétrica. 2. Condicionamento de sinais.  
3. Dispositivo eletrônico inteligente. I. Salvadori,  
Fabiano. II. Hartmann, Lucas V. III. Título.

UFPB/BC

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO INTELIGENTE**  
**FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES EM SMART GRID**

Elaborado por

**TÁLLYSON DA SILVA SANTOS**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica.**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**PROF. DR. FABIANO SALVADORI (Presidente)**

**PROF. DR. LUCAS VINICIUS HARTMANN**

*Camila Seibel Gehrke*  
**PROF. DR. CAMILA SEIBEL GEHRKE**

*Antonio Augusto Lisboa de Souza*  
**PROF. DR. ANTONIO AUGUSTO LISBOA DE SOUZA**

João Pessoa/PB, 01 de março de 2018

Aos meus pais, Edmilson José dos Santos e Valdileide da Silva Santos, a eles todos  
os créditos...

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por essa oportunidade na minha vida.

Ao Prof. Dr. Fabiano Salvadori, pela orientação desse trabalho e pelos ensinamentos nesse período do mestrado.

Ao Prof. Dr. Lucas Hartmann, pela co-orientação e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Camila Gehrke, pelas contribuições para a realização dos testes experimentais.

Aos colegas de pós-graduação, pela ajuda na obtenção dos resultados do trabalho.

À CAPES, pelo financiamento do projeto.



“Honra teu pai e tua mãe, para que sejas feliz e tenhas vida longa sobre a terra.”  
Ef 6,2.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVO.....	13
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	14
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 INTRODUÇÃO. ....	16
2.2 IED DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DISTRIBUÍDA.....	16
2.3 IED PARA O CONTROLE DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	18
2.4 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E COMUNICAÇÃO DE SINAIS.....	19
2.5 MEDIDOR INTELIGENTE DE ENERGIA.....	20
2.6 SISTEMA DE MEDIÇÃO INTELIGENTE PARA APLICAÇÕES EM <i>SMART GRID</i> .....	22
2.7 TRANSDUTOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA MEDIDOR INTELIGENTE .....	23
2.8 CONCLUSÃO.....	25
<b>3 ESTRUTURA DO IED FLEXÍVEL DESENVOLVIDO.....</b>	<b>27</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	27
3.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE .....	27
3.2.1 Tiva™ C Series Connected Launchpad (EK-TM4C1294XL) .....	27
3.2.2 Circuito de condicionamento de sinal .....	28
3.2.3 Modelagem Matemática do Módulo .....	31
3.3 CONCLUSÃO.....	34
<b>4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>36</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	36
4.2 DESCRIÇÃO .....	36
4.3 RESULTADOS .....	37
4.4 CONCLUSÃO.....	56
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA (FONTE: [18]) .....	17
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE TAREFAS ENTRE OS <i>HARDWARES</i> DO IED (FONTE: [19]) .....	18
FIGURA 3 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (FONTE: [6]) .....	19
FIGURA 4 - ESQUEMÁTICO DA PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS (FONTE: [20]) .....	21
FIGURA 5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO PROPOSTO (FONTE: [21]) .....	22
FIGURA 6 - CIRCUITO DOS TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE (FONTE: [22]) .....	24
FIGURA 7 - TIVA™ C SERIES TM4C1294 (FONTE: [23]) .....	28
FIGURA 8 - CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL .....	29
FIGURA 9 - MÓDULOS COM QUATRO CANAIS .....	31
FIGURA 10 - ANÁLISE DAS TENSÕES E CORRENTES DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL .....	32
FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DA SIMULAÇÃO .....	36
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA .....	37
TABELA 1 - VALORES DE GANHO E <i>OFFSET</i> CONFIGURADOS NO <i>SOFTWARE</i> .....	38
FIGURA 13 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-5 V .....	39
FIGURA 14 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-5 V .....	39
FIGURA 15 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-10 V .....	40
FIGURA 16 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-10 V .....	40
FIGURA 17 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE $\pm 5$ V .....	41
FIGURA 18 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE $\pm 5$ V .....	41
FIGURA 19 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE $\pm 10$ V .....	42
FIGURA 20 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE $\pm 10$ V .....	42

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE $V_{OUT}$ PARA O PRIMEIRO TESTE .....	43
TABELA 3 - FREQUÊNCIAS DO SINAL DE ENTRADA PARA CADA FREQUÊNCIA DE CORTE .....	43
FIGURA 21 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_1 = 60$ HZ.....	44
FIGURA 22 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_1 = 60$ HZ..	44
FIGURA 23 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_2 = 200$ HZ.....	45
FIGURA 24 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_2 = 200$ HZ	45
FIGURA 25 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_3 = 500$ HZ.....	46
FIGURA 26 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_3 = 500$ HZ	46
FIGURA 27 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_4 = 1$ KHZ .....	47
FIGURA 28 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_4 = 1$ KHZ .	47
FIGURA 29 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_5 = 2$ KHZ .....	48
FIGURA 30 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_5 = 2$ KHZ .	48
FIGURA 31 - SIMULAÇÃO PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_6 = 5$ KHZ .....	49
FIGURA 32 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA $F_C = 1$ KHZ E $F_6 = 5$ KHZ .	49
TABELA 4 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE $V_{OUT}$ PARA $F_C = 1$ KHZ.....	50
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DA FASE PARA $F_C = 1$ KHZ.....	50
FIGURA 33 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 1$ KHZ.....	51
FIGURA 34 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 2$ KHZ.....	52
FIGURA 35 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 5$ KHZ.....	52
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 10$ KHZ.....	53
FIGURA 37 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 20$ KHZ.....	53
FIGURA 38 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 50$ KHZ.....	54
FIGURA 39 - DIAGRAMA DE BODE PARA $F_C = 100$ KHZ.....	54
TABELA 6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA $F_S = 63,1$ HZ.....	55
TABELA 7 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA $F_S = F_C$ .....	55
FIGURA 40 - OPERAÇÃO DE MODO COMUM .....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{in-}$	Tensão de entrada negativa
$V_{in+}$	Tensão de entrada positiva
$V_{off}$	Tensão de <i>offset</i>
$V_-$	Tensão na entrada inversora do amplificador diferencial
$V_+$	Tensão na entrada não inversora do amplificador diferencial
$V'_{out}$	Tensão de saída do amplificador diferencial
$V''_{out}$	Tensão de saída do filtro RC passa-baixa
$V_{oFB}$	Tensão na entrada inversora do amplificador não inversor
$V_{out}$	Tensão de saída do circuito de condicionamento de sinal
$s$	Variável complexa da transformada de Laplace

## RESUMO

### PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO INTELIGENTE FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES EM *SMART GRID*

Segundo a Agência Internacional de Energia, “uma *Smart Grid* é uma rede de eletricidade que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração, encontrando uma variedade de demandas e usuários. Essas redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stake holders* do mercado de eletricidade, de forma a otimizar a utilização e operação dos ativos no processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantêm a confiabilidade, resiliência e a estabilidade do sistema.” Nesse contexto e visando a integração e convergência dos diferentes sistemas para incorporar uma infraestrutura de uma *Smart Grid*, esse trabalho apresenta a modelagem matemática, o projeto e a implementação de um dispositivo eletrônico inteligente flexível. Esse dispositivo proposto difere dos dispositivos existentes por possuir flexibilidade, podendo realizar a aquisição de diferentes variáveis (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.) com diferentes valores de condicionamento para os sinais, ajuste este realizado por *software*. O dispositivo eletrônico inteligente pode funcionar como um medidor inteligente, como um controlador dinâmico (local) e/ou como um controlador de supervisão, melhorando assim a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens do dispositivo proposto são: baixo custo, versatilidade (as mudanças podem ser feitas por *software*), alta capacidade de processamento (processador ARM), recursos de comunicação (arquitetura de rede híbrida), fácil integração (interoperabilidade), fácil manutenção (modularidade) e escalabilidade.

**Descritores:** *Smart Grid*, Dispositivo Eletrônico Inteligente, Condicionamento de sinais.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A FLEXIBLE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICE FOR SMART GRID APPLICATIONS**

According to the International Energy Agency/USA (IEA): “a smart grid (SG) is an electricity grid that uses digital technology to monitor and manage the transportation of electricity from all sources of generation, finding a variety of demands and users. These networks will be able to coordinate the needs and capabilities of all generators, operators, end-users and stake holders of the electricity market in order to optimize the use and operation of the assets in the process, minimizing environmental costs and impacts while maintaining reliability, resilience and stability of the system”. In this context and looking for the integration and convergence of different systems to incorporate an infrastructure of a SG, this work presents the mathematical modeling, design and implementation of a flexible intelligent electronic device (IED). The proposed IED differs from the existing IEDs presenting flexibility, being able to realize the acquisition of different variables (voltage, current, temperature, pressure, etc.) with different conditioning values, furthermore, the conditioning is carried out by software. The IED can operate as a smart meter, as a dynamic controller (local) and/or as a supervisory controller, thus improving the efficiency, reliability and security of the system. Other advantages of the proposed IED are: low cost, versatility (changes can be made by software), high processing capacity (ARM processor), communication features (hybrid network architecture (HNA)), easy integration (interoperability), easy maintenance (modularity) and scalability.

**Key words:** Smart Grid, Intelligent Electronic Device, Signal Conditioning.

## **1 INTRODUÇÃO**



## 1 INTRODUÇÃO

Redes Elétricas Inteligentes ou, em inglês *Smart Grids*, são um conceito moderno de rede de energia elétrica que objetiva, com sua infraestrutura, melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança, através do controle automatizado e tecnologias modernas de comunicação. Neste trabalho, os termos Redes Elétricas Inteligentes e *Smart Grid*, serão utilizados de forma concomitante. Em Redes Elétricas Inteligentes, informações confiáveis e em tempo real tornam-se o fator chave para o controle e gerenciamento do fluxo de potência, permitindo novas estratégias de gestão da rede e uma integração eficaz entre a Geração Distribuída (GD) e o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) [1], [2], [3] e [4].

O conceito de *Smart Grid* foi inicialmente utilizado em 2005 no artigo publicado por *Amin* e *Wollenberg* [5], os quais propuseram resolver problemas de interrupção no fornecimento de eletricidade aplicando a técnica de *self-healing* (autorrecuperação).

No conceito de redes elétricas inteligentes a gestão simultânea, em tempo real, de tarifas; das cargas flexíveis; da geração de energia elétrica a partir de energia solar e eólica e de outras fontes de geração distribuída; de veículos elétricos; de muitas formas de armazenamento de energia bem como a gestão *microgrid*, exigem um controle dinâmico avançado. Nas redes elétricas inteligentes, projeta-se que mais e mais fontes de energia renovável estarão localizadas no lado dos clientes, devido a preocupações ambientais e vantagens financeiras. Além disso, a geração de energia próximo aos locais onde é consumida permite reduzir significativamente as perdas nas linhas de transmissão associadas com o fornecimento de energia e aliviar significativamente o congestionamento devido à limitada capacidade destas redes.

Segundo a Agência Internacional de Energia, “uma *Smart Grid* é uma rede de eletricidade que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração, encontrando uma variedade de demandas e usuários. Essas redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stake holders* do mercado de eletricidade, de forma a otimizar a utilização e operação dos ativos no

processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantêm a confiabilidade, resiliência e a estabilidade do sistema” [6].

Conforme [7], os potenciais benefícios da *Smart Grid* são:

- Aumento do uso de fontes de energia renováveis, como fotovoltaica, eólica, geração solar, etc.;
- Otimização da capacidade de geração e transmissão, por meio da redução de perdas;
- Armazenamento de energia através de dispositivos como baterias, supercapacitores, ultracapacitores, etc.;
- Redução do congestionamento da transmissão de energia elétrica, apagões, interrupções forçadas, melhorando assim, a eficiência da rede elétrica;
- Gerenciamento do consumo de energia.

A implementação das *Smart Grid* envolve a transformação da rede de energia elétrica, com fluxo de energia unidirecional, para um sistema com uma tecnologia nova, constituído por sensores inteligentes, geração distribuída e sistema de armazenamento, sistemas de informação *back-end*, medidores inteligentes e redes de comunicação, permitindo o fluxo bidirecional de energia.

A implantação efetiva e eficaz de tecnologias de redes inteligentes requer benefícios bem definidos e quantificados (definição de valor-total). Dependendo da região, país ou das partes interessadas, esses benefícios podem ser quantificados nas áreas de desempenho técnico e de negócios, em termos de metas ambientais, da segurança do fornecimento de eletricidade e do crescimento macroeconômico e da sustentabilidade empresarial [8].

A revitalização da infra-estrutura elétrica é necessária e os esforços estão sendo alocados na modernização da rede, o que transforma a rede elétrica com dezenas de anos em redes elétricas inteligentes (*Smart Grid*). Esta transformação foi motivada por [9]:

- A infra-estrutura física da rede elétrica está envelhecendo e sobrecarregada. A demanda de eletricidade continua a aumentar, enquanto os investimentos em infra-estrutura de transmissão e distribuição de energia não acompanharam o crescimento da demanda;

- As preocupações com a mudança climática global (p. ex., o aquecimento global) e as emissões de carbono nos forçaram a visar metas mais agressivas de geração de energia renovável, especialmente eólica e solar, para atender às nossas necessidades de energia elétrica.

Neste sentido, a geração distribuída (GD) desempenha um papel fundamental. A GD, também chamada de geração descentralizada, produz e distribui energia elétrica a partir de uma quantidade significativa de fontes de energia de pequeno porte. Em oposição à geração centralizada (GC), as fontes utilizadas para gerar eletricidade encontram-se perto dos usuários finais. Essas fontes de energia de pequeno porte, chamados de recursos energéticos distribuídos (RED), podem ser geradores eólicos, geradores fotovoltaicos, células combustíveis, microturbinas, etc.. A capacidade dos REDs, atualmente, varia de 3 kW a 10 MW, em perspectiva, é consideravelmente menor do que a capacidade dos GCs existentes [10].

Pequenos sistemas de geração foram utilizados ocasionalmente em locais remotos e mais raramente para apoiar a confiabilidade da rede elétrica em pontos distantes. Com a abertura do processo de desregulamentação e a possibilidade de microgeração a concorrência no varejo tornou-se maior e o segmento de geração de energia está aberto à concorrência.

A geração distribuída possibilita a geração de quantidades menores de energia, porém próximo do ponto de demanda, servindo diretamente ao cliente, eliminando a necessidade de longas redes de transmissão e distribuição que devem satisfazer as necessidades de carga de pico e a futura expansão. Isso proporciona um melhor serviço a um custo menor e tem a vantagem adicional de ser ambientalmente amigável.

A inserção destas novas fontes de geração traz a necessidade de novas ferramentas de controle da rede elétrica. Para a realização deste controle são necessárias informações obtidas diretamente da rede e para tanto necessita-se monitorar a rede elétrica.

Os sistemas eletrônicos de monitoramento são capazes de proporcionar benefícios tangíveis e significativo retorno financeiro sobre o investimento. Os benefícios obtidos nestes casos podem ser classificados em termos de economia de energia, uso otimizado dos equipamentos e aumento da confiabilidade do sistema.

Além disso, os usuários destes sistemas acrescentam a necessidade de um elevado grau de segurança e adequação dos sistemas de suprimento de energia, juntamente com um funcionamento eficaz e econômico em termos operacionais e de manutenção [11].

Com o desenvolvimento dos dispositivos de processamento de sinais, cada vez mais os sistemas de monitoramento são embarcados em unidades constituindo o que se convencionou chamar de dispositivos eletrônicos inteligentes (do inglês *intelligent electronic devices (IED)*).

De acordo com [12] e [13] sistemas embarcados podem ser configurados para desempenhar uma ou qualquer combinação das tarefas listadas a seguir:

- Monitoramento do sistema;
- Proteção do sistema;
- Desempenho de atividades de controle central;
- Gerenciamento dos custos de energia;
- Manutenção do nível de tensão;
- Controle do fator e do fluxo de potência;
- Controle dos níveis de geração de energia;
- Controle do carregamento do sistema.

A utilização de sistemas integrados possibilita evitar graves prejuízos econômicos resultantes de falhas inesperadas, e melhorar a confiabilidade do sistema permitindo, além disso, a implantação de políticas de manutenção preventiva. Várias são as soluções/alternativas em termos de *hardware* e *software* para aplicação em sistemas integrados para os cenários mais variados [1], [12], [13], [14], [15] e [16].

Porém, algumas alternativas são baseadas em soluções proprietárias para sistemas dedicados baseados em comunicação com fio usando cabos e vários tipos de sensores. A instalação e manutenção desses sistemas é geralmente muito mais cara do que o custo dos próprios sensores. Além do que, estes sistemas são de difícil ampliação, devido, principalmente, a própria comunicação com fio e à falta de flexibilidade do *software* proprietário [16].

A construção de Redes Elétricas Inteligentes envolve a transformação das redes elétricas tradicionais para um sistema incorporando novas tecnologias, com

sensores inteligentes, sistemas de informação back-end, medidores inteligentes e redes de comunicações. Toda esta informação estará e deverá ser obtida na rede. Portanto, para a implantação de Redes Elétricas Inteligentes existe a necessidade de instrumentalização do sistema elétrico [13], [14].

Diante do que foi apresentado, com base no contexto das Redes Elétricas Inteligentes, este trabalho trata do projeto e implementação de um dispositivo eletrônico inteligente flexível. Esse dispositivo pode realizar a aquisição de diferentes variáveis (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.) com diferentes valores de condicionamento, os quais são ajustados por *software*. O dispositivo eletrônico inteligente pode funcionar como um medidor inteligente, como um controlador dinâmico (local) e/ou como um controlador de supervisão, melhorando assim a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens do dispositivo eletrônico proposto são: baixo custo, versatilidade (as mudanças podem ser feitas por *software*), alta capacidade de processamento (processador ARM), recursos de comunicação (arquitetura de rede híbrida), fácil integração (interoperabilidade), fácil manutenção (modularidade) e escalabilidade.

## 1.1 OBJETIVO

Estudar os dispositivos eletrônicos inteligentes existentes, observando as suas características relacionadas com a construção do *hardware* e o tipo de *software* de controle, e a aplicação desses dispositivos no contexto das redes elétricas inteligentes.

Projetar e testar um dispositivo eletrônico inteligente flexível para aquisição de diferentes variáveis (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.), com diferentes valores de condicionamento com ajustes realizados via *software*.

A partir desse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão desenvolvidos:

- Validar o circuito de condicionamento de sinal, por meio de testes com sinais senoidais, cujas amplitudes serão ajustadas para os níveis do conversor analógico-digital (CAD);
- Desenvolver um *software* não proprietário para o controle do dispositivo eletrônico inteligente;

- Avaliar os resultados experimentais através das simulações e do modelo matemático.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho está organizado em seis capítulos, que possuem subseções com temas específicos para uma melhor compreensão do assunto.

1. Introdução;
2. Revisão de literatura;
3. Estrutura do IED flexível desenvolvido;
4. Resultados de simulação e experimentais;
5. Conclusões;
6. Referências.

O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura, logo, serão citados trabalhos relacionados com o desenvolvimento de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes aplicados no contexto das Redes Elétricas Inteligentes.

O terceiro capítulo descreve a estrutura do Dispositivo Eletrônico Inteligente Flexível. Serão apresentados a plataforma microcontrolada e o circuito de condicionamento de sinais, e também será explicado o funcionamento do IED proposto com relação à aquisição do sinal.

O quarto capítulo trata dos resultados experimentais obtidos com o IED flexível. Esses resultados serão comparados com a simulação do circuito de condicionamento de sinais e com o modelo matemático que expressa o valor da tensão de saída.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e o sexto capítulo cita as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do trabalho.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO.

Neste capítulo serão apresentados dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Device* - IED) presentes na literatura. Serão analisadas as principais características, referentes a *hardware* e *software* destes dispositivos.

Os IEDs permitem coletar um conjunto de dados sobre o estado operacional da rede elétrica. Esses dados podem ser processados localmente no IED para decisão imediata sobre alterações de status urgentes ocorridas na rede elétrica, ou transmitidos para centros de controle remoto para análises e decisões futuras [17]. De acordo com Salvadori *et. al.* [14], IEDs podem ser configurados para executar uma ou qualquer combinação das tarefas listadas: (1) monitoramento do sistema; (2) proteção do sistema; (3) atividades de controle de supervisão; (4) controle de nível de tensão; (5) Controle de fator de potência; e (6) gerenciamento de fluxo de potência.

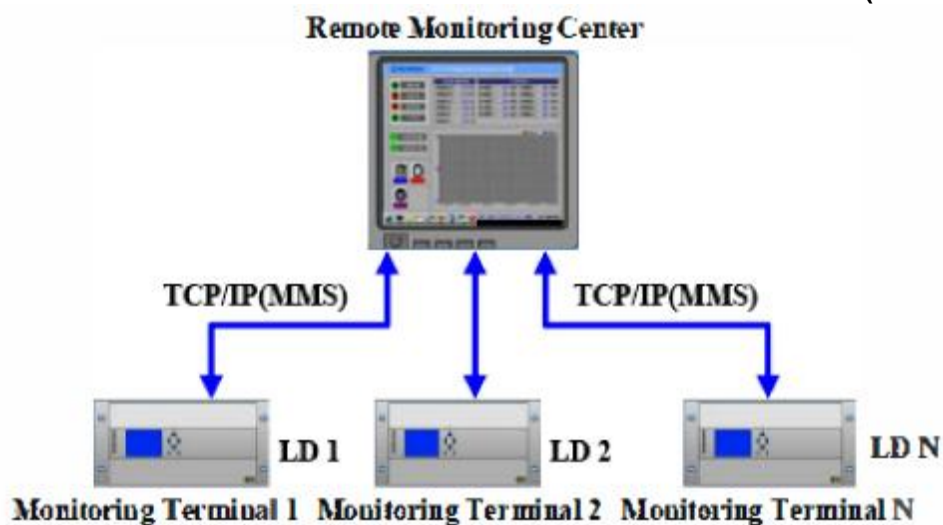
O projeto dos IEDs para informações confiáveis e em tempo real tornou-se o fator chave para o controle, aplicações de uso final, gerenciamento de carga e interconexão com outros dispositivos, permitindo novas estratégias de gerenciamento de rede e integração efetiva de geração distribuída e gerenciamento pelo lado da demanda [1]. Existem várias soluções/alternativas em termos de *hardware* e *software* para uso de IEDs em sistemas integrados para vários cenários [13].

### 2.2 IED DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DISTRIBUÍDA

Os autores em [18] desenvolveram um IED de monitoramento da qualidade da energia elétrica distribuída de alto desempenho baseado no padrão IEC 61850. Esse IED é constituído por três partes: terminal de monitoramento, redes de comunicação e centro de monitoramento, de acordo com a Figura 1.



FIGURA 1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA (FONTE: [18])



O terminal de monitoramento coleta informações de *status* da rede em tempo real. O MMS (*Manufacturing Message Specification*) representa a rede de comunicação para a transferência de dados. O centro de monitoramento armazena e analisa os dados da qualidade de energia, tais como parâmetros elétricos básicos, localização e reconhecimento da fonte de distúrbios, análise das causas do aumento de tensão, etc.

O terminal de monitoramento usa *Power PC*, *FPGA* e *DSP* como os processadores de núcleo de *hardware*. O *FPGA* controla a amostragem simultânea de oito canais de ADC de 14 bits, e o ADC é capaz de atingir uma taxa de amostragem de 20 MSPS, para detectar uma sobretensão relâmpago cujo tempo de frente de onda está entre 1 e 4 microssegundos. O *Power PC* pode capturar a forma de onda do distúrbio de qualidade de energia, realizar o processamento dos dados e analisar o sinal. O controlador *DSP* é usado para processar mensagens de dados.

De acordo com os autores, o IED tem a característica de estrutura simples, compatibilidade com outros dispositivos, coleta e troca informações em tempo real. No entanto, o uso de três núcleos (*PC*, *FPGA* e *DSP*) torna o sistema caro e complexo para o controle.

### 2.3 IED PARA O CONTROLE DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Em [19] foi proposto um dispositivo eletrônico inteligente que funciona em tempo real e monitora o *status* da interface entre a geração distribuída e a rede da concessionária.

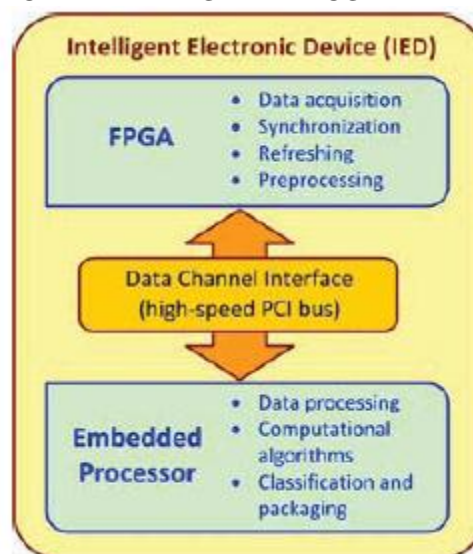
O IED foi implementado por meio do *CompactRIO* (NI cRIO-9074) da *National Instruments*, baseado na combinação de um processador de ponto flutuante *PowerPC*, com o sistema operacional em tempo real *VxWorks*, um *FPGA* de alto desempenho e módulos industriais de entrada/saída para a medição de potência e energia.

Para o protótipo foram utilizados os módulos de aquisição de dados NI 9227 e NI 9225, com 50 Ksps, resolução de 24 *bits* e conversão Delta-Sigma com pré-filtragem analógica.

A conexão entre o *FPGA* e os módulos de entrada/saída é direta, sem a presença de um barramento comum. A comunicação entre o *FPGA* e o processador embarcado de tempo real é através de um barramento PCI de alta velocidade. Na Figura 2 é possível visualizar um esquema do IED analisado.

Esse dispositivo para o controle da geração distribuída, diferente do IED proposto, possui arquitetura proprietária (*software* e *hardware*).

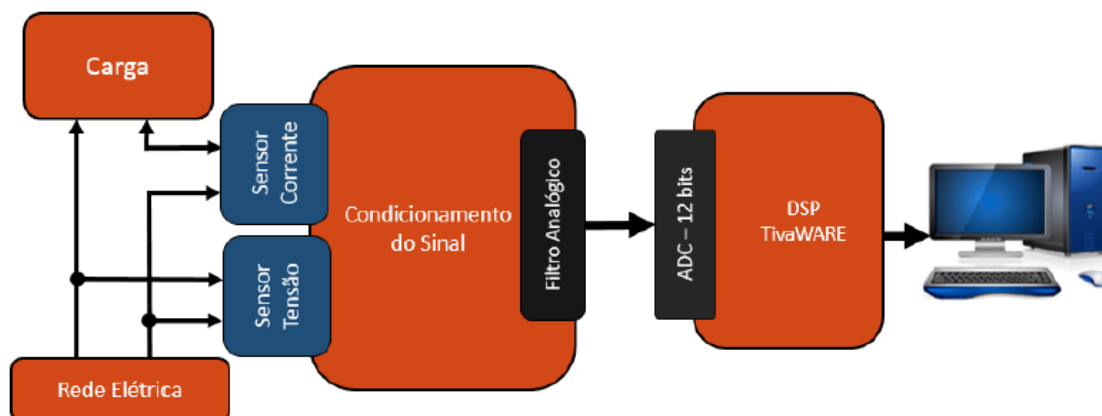
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE TAREFAS ENTRE OS HARDWARES DO IED (FONTE: [19])



## 2.4 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E COMUNICAÇÃO DE SINAIS

Em [6] o autor desenvolveu um sistema para aquisição, processamento e comunicação de sinais de tensão e corrente. O sistema é mostrado na forma de diagrama de blocos na Figura 3.

FIGURA 3 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (FONTE: [6])



O sistema é constituído por sensores de tensão e corrente, unidade de condicionamento do sinal com filtro analógico, plataforma *TivaWare* e unidade de monitoramento.

A unidade de condicionamento do sinal está relacionada com a adequação dos sinais de tensão e corrente de uma carga monofásica a níveis compatíveis com o conversor AD, que funciona com nível de tensão entre 0 V e 3,3 V. Essa unidade é constituída por dois circuitos, um para o sinal de tensão e outro para o sinal de corrente.

O circuito de condicionamento de tensão é formado por: um transformador de potencial que reduz a tensão de entrada a uma razão de 24:1; um potenciômetro de 10 k $\Omega$  ligado no secundário do transformador para ajuste da tensão de *offset*; um amplificador configurado como *buffer* para o casamento entre as impedâncias de entrada e saída; e um filtro passa-baixas com frequência de corte de 3,0 kHz.

O circuito de condicionamento de corrente é composto por: um sensor de corrente LA-25NP que fornece uma corrente de saída equivalente à corrente de entrada a uma razão de 1000:5; um resistor de 100  $\Omega$  para medir o sinal de corrente em uma tensão proporcional; um amplificador inversor para ajuste da tensão de

*offset* e adequação da tensão de saída para faixa de 0 a 3,3 V; e um filtro passa-baixas.

A plataforma *TivaWare*<sup>™</sup> realiza a digitalização e o processamento do sinal, e por meio do *software* desenvolvido no ambiente *Code Composer Studio* (CCS) da *Texas Instruments*<sup>™</sup>, calcula as grandezas elétricas: tensão eficaz, corrente eficaz, potência média, potência aparente e fator de potência; e também transmite os dados para a etapa de monitoramento através da comunicação serial, pela porta USB.

A unidade de monitoramento recebe os dados processados, permitindo ao usuário visualizá-los no computador. Este sistema apresenta como vantagens: baixo custo, utiliza sensor de tensão e de corrente, realiza a medição de tensão e corrente e amplitude do sinal de entrada (220 V – valor de pico).

Entre as desvantagens pode-se citar: ajuste da tensão de *offset* de forma manual, ganho de tensão unitário e apresenta apenas uma única frequência de corte (3 kHz).

## 2.5 MEDIDOR INTELIGENTE DE ENERGIA

O autor em [20] propôs um módulo medidor de energia residencial para medir o consumo de energia total. Foi desenvolvida uma montagem experimental para obter as curvas de tensão e corrente de cargas residenciais e parâmetros para identificação dessas cargas: potências ativa, reativa e aparente, fator de potência, tensão e corrente eficazes, e as 25 primeiras harmônicas dos sinais de tensão e corrente.

O módulo medidor é formado por uma placa de condicionamento de sinais, um módulo de aquisição de dados da National Instruments<sup>™</sup> (DAQ) NI USB-6211 e um *software* de aquisição desenvolvido em LabVIEW<sup>™</sup>.

A placa de condicionamento de sinais contém um sensor de tensão (divisor resistivo), um sensor de corrente (resistor shunt e transformador de corrente) e seus respectivos filtros *anti-aliasing*.

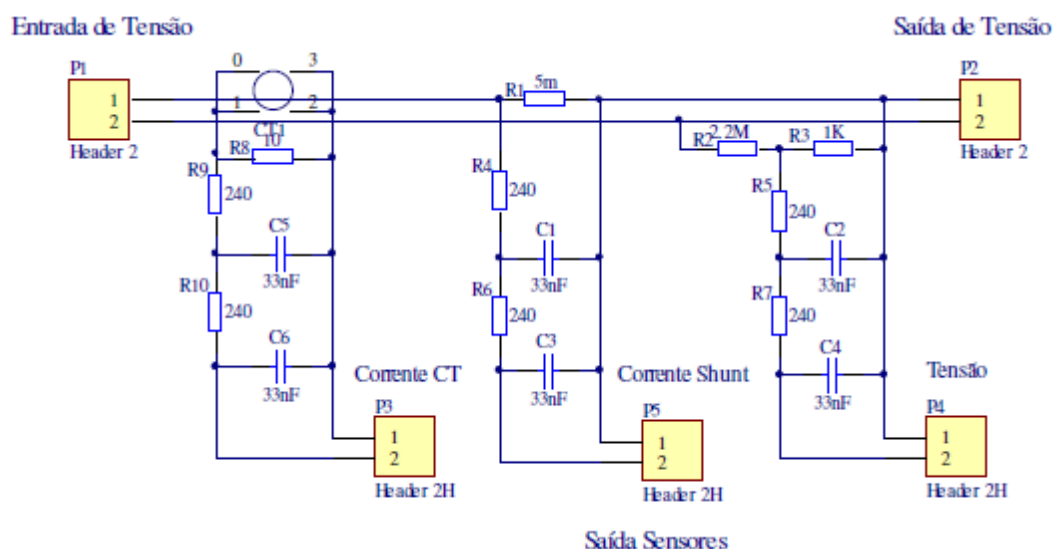
Para a medição do sinal de tensão é usado um divisor resistivo composto por resistores de 2,2 M $\Omega$  e 1,0 k $\Omega$ , ambos de 0,1% de precisão. Com essa configuração é possível medir tensões de até 310 VRMS.

Para a medição da corrente elétrica são utilizados um transformador de corrente (TC) e um resistor shunt. O TC usado possui relação de entrada/saída igual a 1000:1, precisão de 1% e fundo de escala de 40A RMS. A corrente induzida no TC é medida através de um resistor de  $10\ \Omega$  ligado nos terminais de saída do sensor.

Os sinais dos sensores de tensão e corrente são filtrados por filtros anti-aliasing RC passa-baixas de segunda ordem, antes da amostragem no módulo de aquisição de dados. Esses filtros foram projetados para medição das harmônicas dos sinais de tensão e corrente de até 25ª ordem, equivalente a 1500 Hz em redes de 60 Hz.

Os filtros foram implementados usando dois estágios RC idênticos compostos por um resistor de  $240\ \Omega$  e um capacitor de  $33\ \text{nF}$ , cada. Na Figura 4 é possível ver o esquemático da placa de condicionamento de sinais. Essa placa permite a leitura do sinal do TC, da corrente que passa pelo resistor shunt e da tensão no divisor resistivo.

**FIGURA 4 - ESQUEMÁTICO DA PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS (FONTE: [20])**



Como vantagens do sistema pode-se destacar: utiliza sensor de corrente, realiza a medição de tensão e corrente e a amplitude do sinal de entrada é de 310 Vrms. As desvantagens do sistema são: ajuste da tensão de *offset* de forma manual, ganho de tensão unitário e apresenta apenas uma única frequência de corte (4,69 kHz).

## 2.6 SISTEMA DE MEDIÇÃO INTELIGENTE PARA APLICAÇÕES EM SMART GRID

No trabalho [21], os autores apresentaram o projeto de um dispositivo de detecção para sistemas de medição AC.

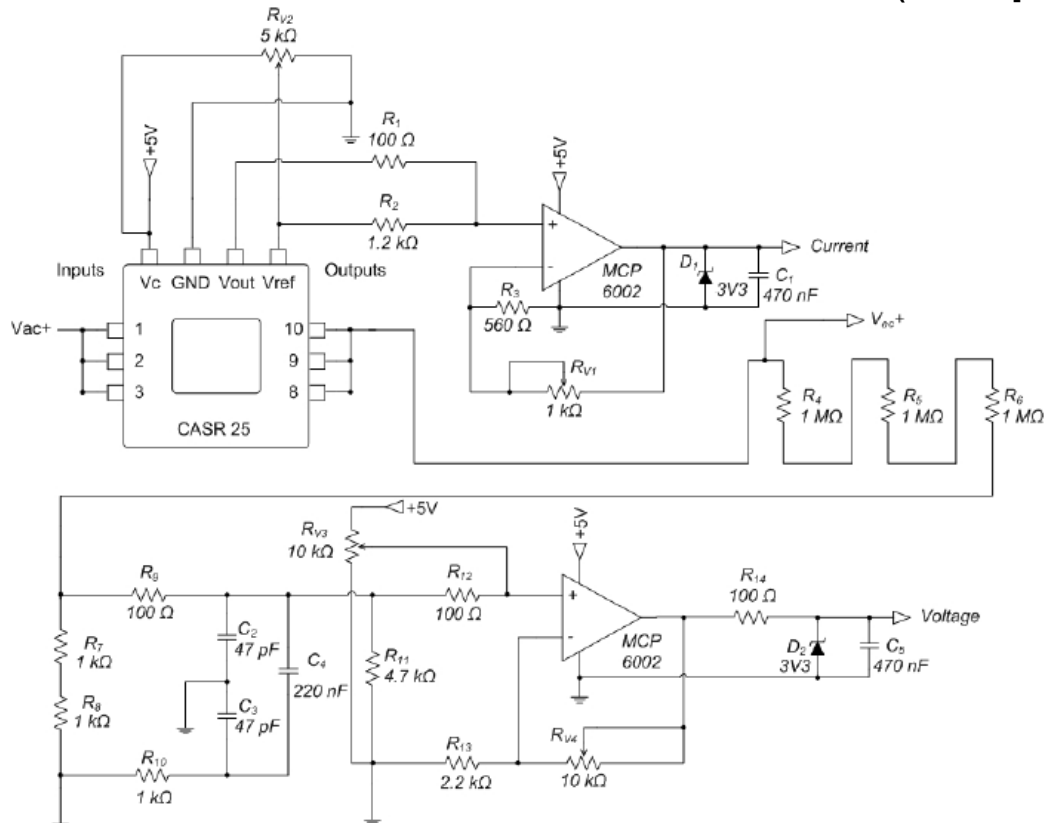
O dispositivo proposto pode ser visualizado na Figura 5. Ele é constituído pelo transdutor de corrente CASR25 e pelo amplificador operacional linear MCP6002.

O transdutor CASR25 é capaz de medir sinais de entrada como corrente contínua (DC), corrente alternada (AC) e sinais pulsados. Ele detecta correntes de até 25 A. Além disso, esse transdutor de corrente contém uma isolamento galvânica entre o circuito primário e o secundário.

O MCP6002 possui dois amplificadores que podem operar na faixa de 1,8 V até 6 V devido sua estrutura *rail-to-rail*.

O dispositivo de detecção é projetado para medir corrente de linha e tensão de linha pela conexão de somente uma fase.

**FIGURA 5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO PROPOSTO (FONTE: [21])**



A saída do transdutor de corrente é conectada no amplificador diferencial para obter o valor da corrente elétrica medida.

Conforme a Figura 5, para a medição de tensão AC, resistores em série e divisor de tensão são utilizados. Na sequência, o sinal é aplicado no filtro capacitivo antes do amplificador diferencial. Enquanto o potenciômetro  $R_{V3}$  é usado para ajustar a tensão de *offset*, o potenciômetro  $R_{V4}$  é utilizado para configurar o ganho do amplificador.

As taxas de conversão do dispositivo de detecção são ajustadas para 12,3 mV pico a pico para 1 Vrms e 127 mV para cada 1 A. Apresenta como vantagens: baixo custo, utiliza transdutor de corrente, realiza a medição de tensão e corrente e amplitude do sinal de entrada de 200 Vrms. Entre as desvantagens cita-se: ajuste da tensão de *offset* e do ganho de forma manual e apresenta apenas um filtro RC.

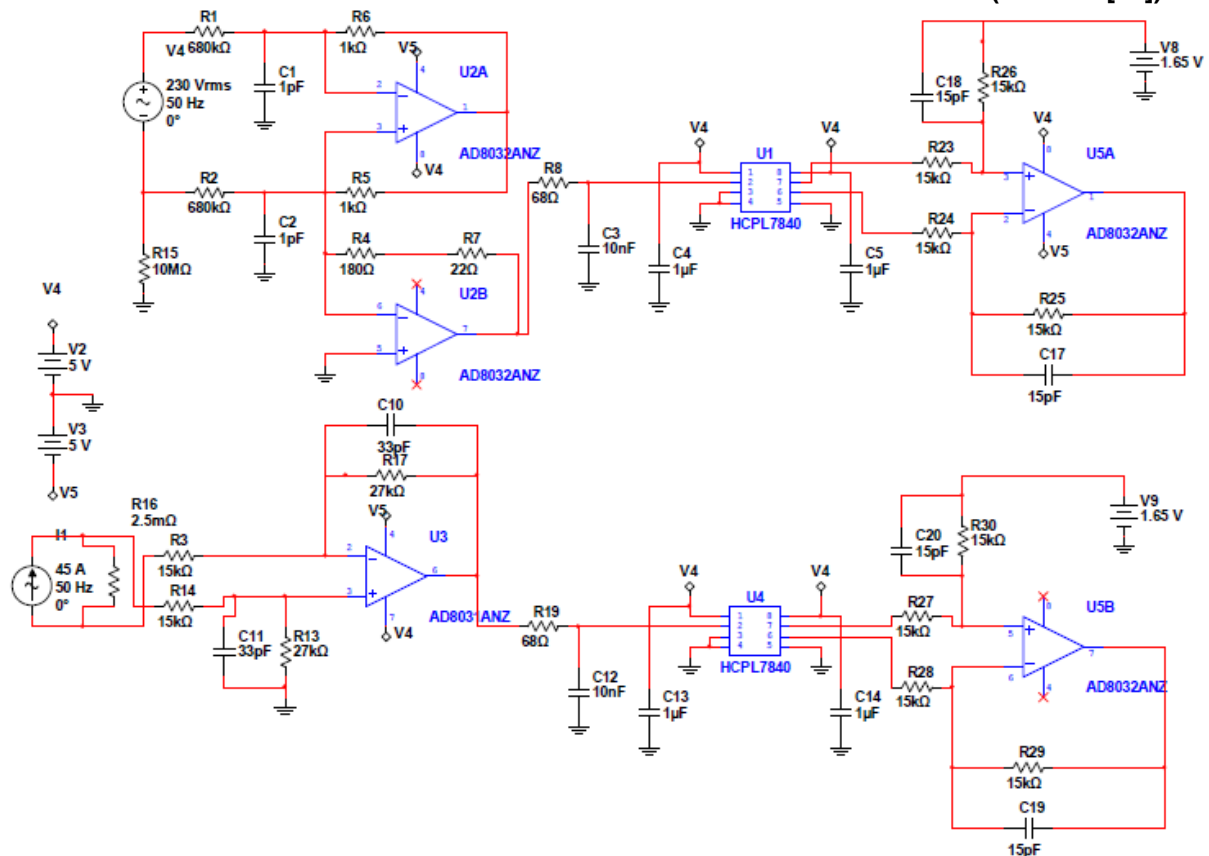
## 2.7 TRANSDUTOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA MEDIDOR INTELIGENTE

Os autores em [22] apresentaram uma implementação de um medidor inteligente com placa microcontrolada (Arduino) de baixo custo, equipado com um protótipo de transdutor de tensão e de corrente, que foi projetado como *shield* para a placa. O esquema do projeto eletrônico dos transdutores que combina o condicionamento analógico de tensão e corrente pode ser observado na Figura 6.

Os transdutores possuem três estágios: estágio de entrada, segundo estágio e estágio de saída.

O estágio de entrada para o transdutor de tensão é um divisor compensado ativo, o qual é formado por dois amplificadores operacionais. O primeiro amplificador (U2A) foi montado na configuração de fonte de corrente e o segundo (U2B) caracteriza-se por ser um amplificador de transresistência. Com relação ao transdutor de corrente, o estágio de entrada é composto por um resistor *shunt* de 2,5 mΩ e um amplificador diferencial com ganho igual a 1,8.

FIGURA 6 - CIRCUITO DOS TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE (FONTE: [22])



O segundo estágio separa com um isolamento óptico a seção de alta tensão da seção de baixa tensão por propósito de segurança. Esse estágio está presente nos dois transdutores, ele é constituído por um modulador acoplado opticamente para um demodulador e possui um filtro analógico RC de primeira ordem na sua entrada.

O estágio de saída, idêntico para os dois transdutores, possui um amplificador diferencial para eliminar a tensão de modo comum do segundo estágio. Esse amplificador tem ganho unitário e adiciona a tensão de entrada uma tensão de *offset* de 1,65 V. Então, a tensão de saída está na faixa de 0 V a 3,3 V, compatível com a entrada analógica do Arduino.

As vantagens do medidor inteligente são: baixo custo, utiliza transdutor de corrente, realiza a medição de tensão e corrente e a amplitude do sinal de entrada é de até 650 V (valor de pico). As desvantagens do medidor são: valor fixo da tensão de *offset* e do ganho, e apresenta apenas um filtro RC.



## 2.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi realizada a revisão de literatura sobre os dispositivos eletrônicos inteligentes. Para cada dispositivo citado, foi analisada a característica do *hardware* com relação ao condicionamento dos sinais de tensão e corrente, e também foram destacadas as vantagens e desvantagens. Conclui-se que esses dispositivos apresentam limitações nos seus *hardwares*, pois a tensão de *offset* e o ganho para o sinal de saída são valores fixos, além disso, possuem apenas um filtro RC com uma única frequência de corte. Então, para esses dispositivos eletrônicos, a mudança das características do sinal de entrada, com relação à amplitude e frequência, representa uma alteração dos componentes, como resistores e capacitores, para o condicionamento do sinal.

### **3      ESTRUTURA DO IED FLEXÍVEL DESENVOLVIDO**

### 3 ESTRUTURA DO IED FLEXÍVEL DESENVOLVIDO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a estrutura do IED flexível sendo destacadas as características do *hardware* e o seu funcionamento.

Para o desenvolvimento do IED flexível, foram considerados os seguintes aspectos: aquisição, condicionamento e filtragem do sinal. Então, na etapa de aquisição do sinal, os dados a serem coletados são definidos, depois o sinal é condicionado e filtrado. A amplitude dos sinais do sistema elétrico deve ser limitada aos níveis de entrada do conversor analógico-digital (CAD). Além disso, o sinal passa através de um filtro passa-baixa, que opera como filtro *anti-aliasing*.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE

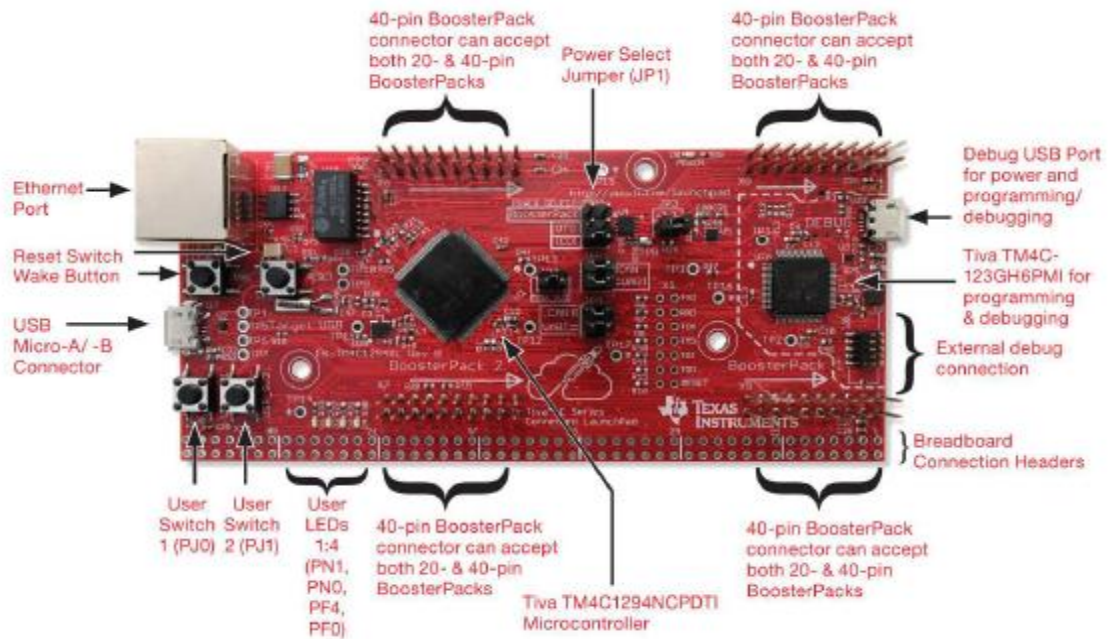
##### 3.2.1 Tiva™ C Series Connected Launchpad (EK-TM4C1294XL)

A Tiva™ C Series Connected Launchpad (EK-TM4C1294XL) é uma plataforma de baixo custo (aproximadamente US\$ 19,00) que utiliza microcontroladores ARM Cortex M4F. Constituída pelo microcontrolador TM4C1294NCPDTI, cujo chip possui seu MAC Ethernet 10/100 e PHY, USB 2.0, módulo de hibernação, modulação de largura de pulso e múltiplas conectividades seriais. Na Figura 7 é possível observar os principais componentes da placa, cuja tensão de alimentação é de 4,75 V a 5,25 V e as dimensões são 12,45 cm x 5,59 cm x 10,8 cm (comprimento x largura x altura).

As principais características do microcontrolador TM4C1294NCPDTI são:

- 120 MHz 32-bits ARM Cortex – M4F com ponto flutuante;
- 1 MB Flash, 256 KB SRAM, 6 KB EEPROM *on-chip*;
- ADCs (20 canais, 12 bits, 2 MSPS);
- Sensor de temperatura;
- 8 Timers de 32 bits;
- 8 Saídas PWMs;
- Múltiplas portas de comunicação serial (2 CAN, 8 UARTs, 4 SSI/SPI, 10 I<sup>2</sup>C).

FIGURA 7 - TIVA™ C SERIES TM4C1294 (FONTE: [23])



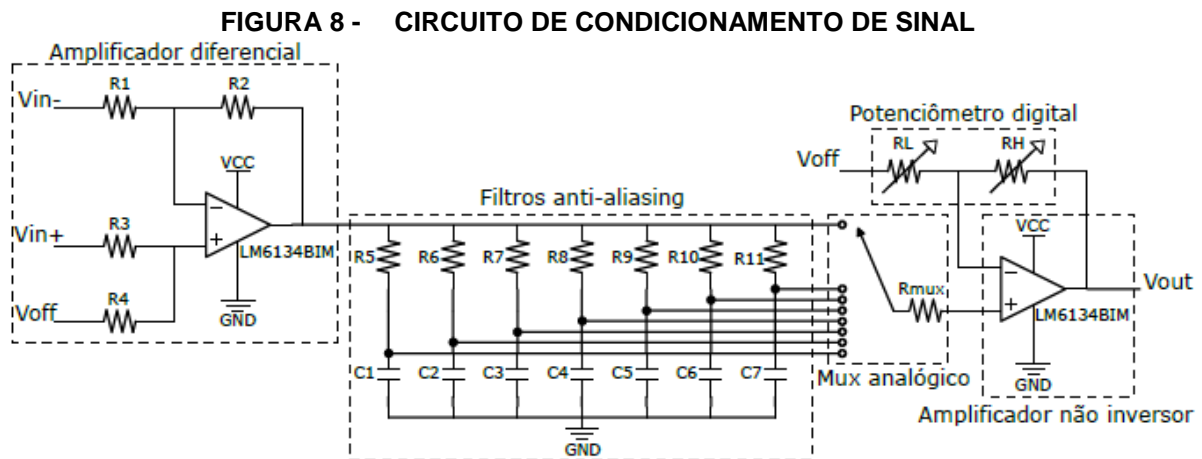
### 3.2.2 Circuito de condicionamento de sinal

O circuito de condicionamento de sinal é constituído pelos seguintes componentes:

- Amplificador diferencial ou subtrator;
- Filtro RC passa-baixa;
- Multiplexador / demultiplexador analógico de 8 canais SN74LV4051A;
- Amplificador de tensão não inversor;
- Registrador de deslocamento de 8 bits SN74HC595D;
- Potenciômetro digital MAX5408;
- Conversor digital – analógico AD5302.

Esse circuito caracteriza-se por apresentar 32 variações de ganho, 256 possibilidades de tensão de *offset* e 8 frequências de corte (passa tudo, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz e 100 kHz). A sua função é adequar o sinal de tensão de entrada, com amplitude de até 30 V de pico a pico, para níveis de tensão (entre 0 e 3,3 V) do conversor AD da plataforma Tiva™ C Series Connected Launchpad (EK-TM4C1294XL). Na Figura 8 observa-se o circuito de

condicionamento de sinal que é constituído pelas seções: atenuação diferencial, filtros *anti-aliasing*, mux analógico, potenciômetro digital e amplificador não inversor.



O primeiro estágio desse circuito é um amplificador diferencial, constituído pelos resistores R1 – R4 e o amplificador operacional mais a esquerda. O ganho é configurado para uma atenuação de 1:10, permitindo uma medição segura da tensão de entrada até 30 V (pico a pico). O amplificador diferencial foi escolhido para mitigar possíveis fontes de ruídos elétricos que podem degradar a qualidade do sinal medido.

O amplificador operacional LM6134BIM foi escolhido para a operação *rail-to-rail*, que permite uma fonte de alimentação única de 3,3 V, fornecida pela placa de desenvolvimento do microcontrolador. Esse amplificador possui boa proteção contra descarga eletrostática, que combinada com a alta impedância de entrada do circuito (1 M $\Omega$ ), serve como medida de proteção contra tensões transientes e sobretensão de entrada.

A amostragem de um sinal tem perda de informação inerente. O teorema de Nyquist afirma que, para que um sinal analógico seja devidamente reconstruído a partir do sinal amostrado, a frequência de amostragem deve ser superior a duas vezes a maior componente de frequência do sinal. Essa é uma estimativa otimista e, na prática, uma frequência de amostragem de 8 a 10 vezes a do sinal é sugerida. Em outras palavras, isso significa que qualquer frequência superior a 1/10 da taxa de amostragem deve ser removida do sinal de entrada antes da amostragem, o que é conseguido através de um filtro passa-baixa [24].

No entanto, uma aplicação diferente pode exigir taxas de amostragem diferentes e, portanto, diferentes frequências do filtro passa-baixa. O circuito mostrado na Figura 8 usa 8 filtros independentes com frequências de 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz e passa-tudo, e utiliza um multiplexador analógico para selecionar por *software* um dos filtros.

Todos os filtros estão conectados em paralelo à saída do amplificador diferencial, uma fonte de baixa impedância, portanto, não têm interferência entre si. Além disso, a saída do multiplexador analógico está conectada a uma entrada do amplificador de elevada impedância, portanto, a característica da resistência do multiplexador não tem impacto no sinal.

O circuito proposto emprega um potenciômetro logarítmico digital programável em uma configuração de amplificador operacional não inversor. O potenciômetro digital escolhido, MAX5408, propicia 32 configurações de ganhos diferentes selecionáveis através de uma interface SPI. Como a maioria dos potenciômetros digitais semicondutores, ele tem tolerâncias absolutas na ordem de 30%, mas possui tolerâncias de relação precisas.

A configuração do circuito amplificador não inversor foi escolhida exatamente porque o potenciômetro é conectado somente a fonte de baixa impedância e terminais de detecção de elevada impedância, cancelando assim a tolerância absoluta do dispositivo. Quando combinado com a atenuação fornecida pelo primeiro estágio de condicionamento, o ganho global pode ser programado de -20 dB a +42 dB, ou de 1:10 a 125:1, em passos de 2 dB.

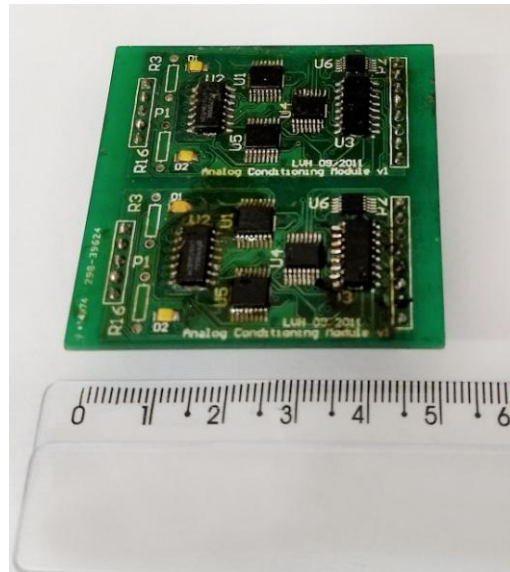
Muitos dos sinais de entrada desejados são bipolares e o microcontrolador só pode aceitar tensões positivas, então, um circuito de *offset* também foi utilizado. No esquema escolhido, nenhum circuito extra é necessário, já que tanto o amplificador diferencial de entrada quanto o amplificador de ganho aceitam uma referência de terra separada do resto do circuito.

A referência de terra do sinal é gerada com um conversor digital-analógico de 8 bits, AD5302, e pode ser usada para o *offset* do sinal de entrada de 0 V a +3,3 V. *Offsets* negativos, embora incomuns, podem ser alcançados ao inverter fisicamente a polaridade de entrada diferencial. O circuito de condicionamento de sinal é projetado como um módulo de *plug-in* para fácil teste e manutenção. Cada

módulo contém um par de canais, cada um com configurações independentes de ganho, *offset* e frequência.

A programação dos parâmetros do módulo pode ser feita através de uma única interface SPI de 32 bits, e vários módulos podem compartilhar o mesmo barramento SPI que requer apenas uma única linha dedicada para a seleção de escravos SPI. Um par de módulos com quatro canais é mostrado na Figura 9, em uma placa quadrada de 50 mm de lado.

**FIGURA 9 - MÓDULOS COM QUATRO CANAIS**

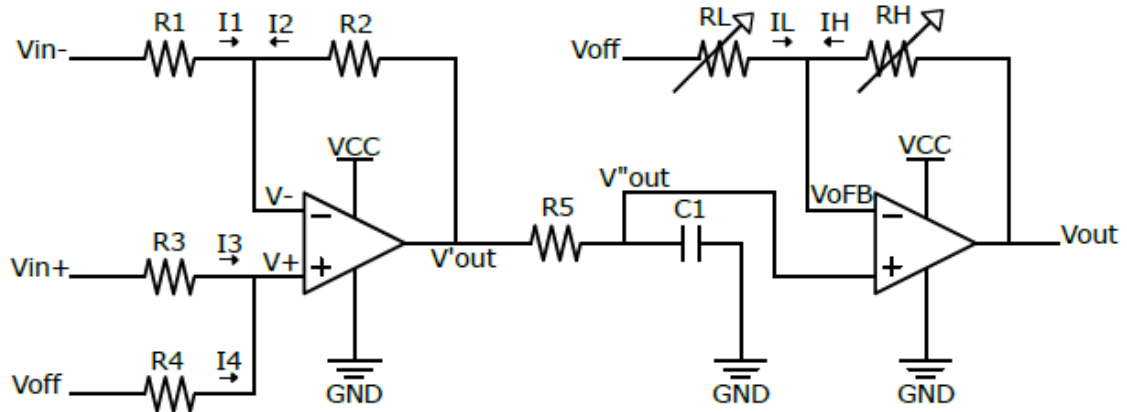


### 3.2.3 Modelagem Matemática do Módulo

O modelo matemático para o circuito de condicionamento de sinal foi desenvolvido a partir da análise da Figura 10. Para determinar a equação da tensão de saída ( $V_{out}$ ), foram usadas duas condições:

- Impedância de entrada infinita, logo, os amplificadores operacionais foram caracterizados como um amplificador ideal, assim, na análise matemática, a tensão na entrada não inversora é igual à tensão na entrada inversora e as correntes nessas duas entradas são iguais a zero.
- Lei de Kirchhoff para a corrente, ou seja, a soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, sistema ou nó é igual a zero.

**FIGURA 10 - ANÁLISE DAS TENSÕES E CORRENTES DO CIRCUITO DE CONDIÇÃOAMENTO DE SINAL**



Com base nessas duas condições, foram calculadas as tensões  $V^-$  (entrada inversora) e  $V^+$  (entrada não inversora) do amplificador diferencial, através das malhas formadas pelos resistores  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ,  $R_4$ .

$$I_1 + I_2 = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{Vin^- - V^-}{R_1} = -\frac{(V'_{out} - V^-)}{R_2} \quad \text{Eq. 2}$$

$$V^- = \frac{(R_2 Vin^-) + (R_1 V'_{out})}{R_1 + R_2} \quad \text{Eq. 3}$$

$$I_3 + I_4 = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

$$\frac{Vin^+ - V^+}{R_3} = -\frac{(V_{off} - V^+)}{R_4} \quad \text{Eq. 5}$$

$$V^+ = \frac{(R_4 Vin^+) + (R_3 V_{off})}{R_3 + R_4} \quad \text{Eq. 6}$$

Após calcular as tensões  $V^-$  e  $V^+$ , foi calculada a tensão de saída ( $V'_{out}$ ) do amplificador diferencial.

$$V^+ = V^- \quad \text{Eq. 7}$$

$$\frac{(R_4 Vin^+) + (R_3 V_{off})}{R_3 + R_4} = \frac{(R_2 Vin^-) + (R_1 V'_{out})}{R_1 + R_2} \quad \text{Eq. 8}$$

$$V'_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{(R_4 Vin^+) + (R_3 V_{off})}{R_3 + R_4}\right) - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) (Vin^-) \quad \text{Eq. 9}$$



Fazendo  $R_1 = R_3 = 1 \text{ M}\Omega$  e  $R_2 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$  e substituindo na Equação 9:

$$V'_{out} = (0,1)(V_{in}^+ - V_{in}^- + V_{off}) \quad \text{Eq. 10}$$

O passo seguinte foi calcular a tensão de saída ( $V''_{out}$ ) do filtro RC passa-baixa.

$$V''_{out} = \left( \frac{\frac{1}{(sC_1)}}{R_5 + \frac{1}{(sC_1)}} \right) (V'_{out}) \quad \text{Eq. 11}$$

$$V''_{out} = \left( \frac{1}{(sR_5C_1) + 1} \right) (V'_{out}) \quad \text{Eq. 12}$$

Para calcular a tensão de saída ( $V_{out}$ ), foi preciso determinar a tensão na entrada inversora ( $V_{oFB}$ ) do amplificador não inversor. Assim, igualando as equações de  $V''_{out}$  e  $V_{oFB}$ , foi possível definir a equação de  $V_{out}$ .

$$I_L + I_H = 0 \quad \text{Eq. 13}$$

$$\frac{V_{off} - V_{oFB}}{R_L} = - \frac{(V_{out} - V_{oFB})}{R_H} \quad \text{Eq. 14}$$

$$V_{oFB} = \frac{(R_H V_{off}) + (R_L V_{out})}{R_L + R_H} \quad \text{Eq. 15}$$

$$V''_{out} = V_{oFB} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\left( \frac{1}{(sR_5C_1) + 1} \right) (V'_{out}) = \frac{(R_H V_{off}) + (R_L V_{out})}{R_L + R_H} \quad \text{Eq. 17}$$

$$V_{out} = \left( 1 + \frac{R_H}{R_L} \right) \left( \frac{V'_{out}}{(sR_5C_1) + 1} \right) - \left( \frac{R_H}{R_L} \right) V_{off} \quad \text{Eq. 18}$$

Substituindo a Equação 10 na Equação 18, foi obtida a tensão de saída ( $V_{out}$ ).

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_H}{R_L}\right) \left( \frac{(0,1)(V_{in}^+ - V_{in}^-) + V_{off}}{(sR_5C_1) + 1} \right) - \left(\frac{R_H}{R_L}\right) (V_{off}) \quad \text{Eq. 19}$$

A partir da Equação 19, foi possível calcular a tensão de saída ( $V_{out}$ ) do circuito de condicionamento de sinal. Percebe-se que  $V_{out}$  depende da amplitude do sinal de entrada, o qual é reduzido pelo amplificador diferencial com uma atenuação de 1:10. A tensão de saída também está relacionada com os valores de resistência e capacitância do filtro RC passa-baixa.

### 3.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada a estrutura do IED flexível proposto. O circuito de condicionamento de sinal destaca-se pelas seguintes vantagens: baixo custo (US\$ 8.70), 8 frequências de corte, 256 valores de tensão de *offset* e 32 variações de ganho obtidas com o MAX5408. Logo, esse circuito é passível de uso para diferentes aplicações e pode realizar a aquisição de variáveis como tensão, corrente, temperatura, pressão, etc., e o condicionamento dessas variáveis é ajustado por *software*. Então, conclui-se que o IED proposto é mais vantajoso que os IEDs citados na revisão de literatura, com relação às frequências de corte, valores de tensão de *offset* e variações de ganho, além de ser competitivo em termos de custo financeiro.

Concluiu-se que a principal desvantagem do IED está relacionada com a ausência dos transformadores de tensão e corrente.

## **4      RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS**

## 4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

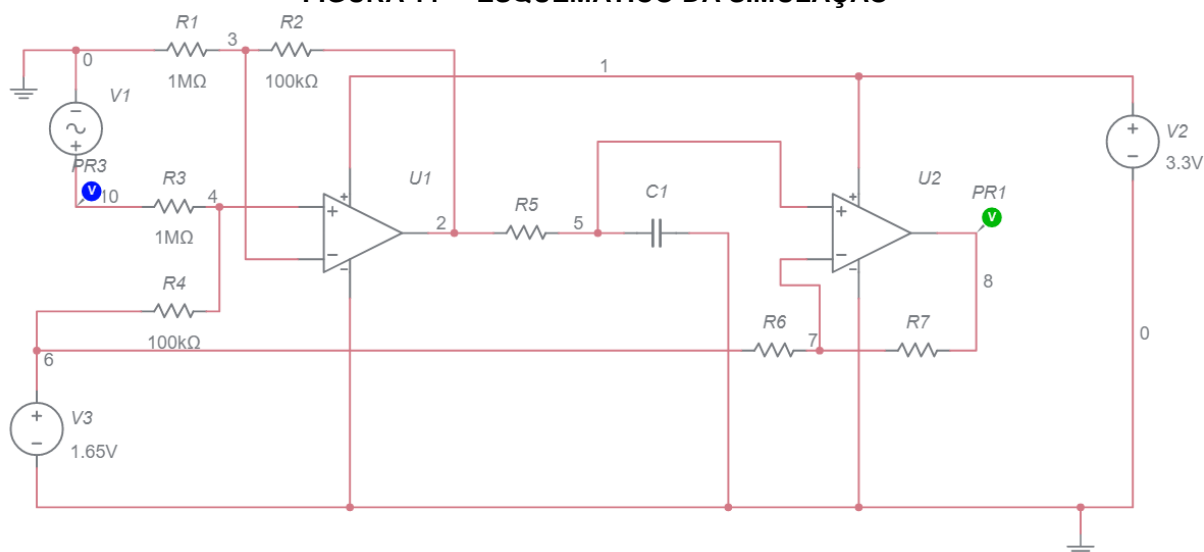
### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrito o sistema utilizado para a simulação do IED proposto e o *setup* usado para comprovação experimental. Também serão apresentados os resultados obtidos com o circuito de condicionamento de sinal. As medições experimentais serão comparadas com os valores da simulação e resultados calculados a partir do modelo matemático.

### 4.2 DESCRIÇÃO

A simulação do circuito de condicionamento de sinal foi realizada na versão gratuita do *Multisim Live* da *National Instruments*<sup>®</sup>. O *Multisim Live* usa o padrão industrial *SPICE* e possui uma biblioteca de componentes e recursos interativos. Foi utilizado no navegador *Google Chrome* para criar o esquemático do circuito e visualizar o seu comportamento com relação à tensão de saída e a resposta em frequência dos filtros RC passa-baixa, de acordo com as características de amplitude e frequência do sinal de entrada senoidal. Na Figura 11 pode-se observar o esquemático da simulação.

**FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DA SIMULAÇÃO**

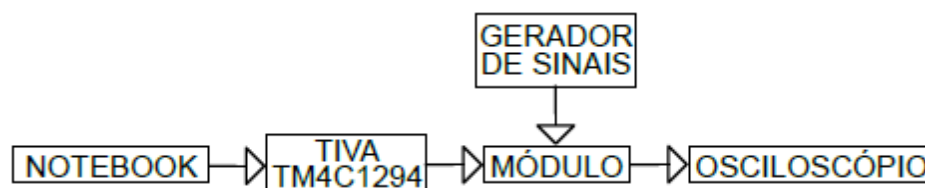


A configuração do circuito de condicionamento foi feita através de um código baseado na linguagem C, que foi desenvolvido na plataforma Energia<sup>MT</sup>. Nesse código foram possíveis definir os valores de condicionamento, como o ganho, a tensão de *offset* e a frequência de corte do filtro. Esse código foi gravado na Tiva<sup>TM</sup> C Series Connected Launchpad (EK-TM4C1294XL), que também forneceu a tensão de alimentação de 3,3 V para o circuito.

Nos testes experimentais com o circuito de condicionamento de sinal, foi utilizado um gerador de sinais da *Agilent*<sup>®</sup> 33220A para gerar sinais senoidais. Também foi usado um osciloscópio *Agilent InfiniiVision* DSO-X 3014A, para visualizar os sinais de entrada e saída desse circuito.

Como foi citado no tópico 3.2.2, o IED possui um par de módulos com quatro canais no total. Todos os canais foram testados, apresentando resultados similares, logo, serão destacados os resultados de apenas um canal. Na Figura 12 é ilustrado o diagrama de blocos do sistema proposto.

**FIGURA 12 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA**



#### 4.3 RESULTADOS

Inicialmente foram realizadas simulações no *Multisim Live*, e depois foram realizados experimentos objetivando corroborar os resultados obtidos das simulações. Os resultados experimentais foram obtidos utilizando o circuito de condicionamento de sinal em quatro testes.

No primeiro teste, foram analisados sinais de entrada com as seguintes amplitudes: 0-5 V, 0-10 V,  $\pm 5$  V e  $\pm 10$  V, com frequência de 60 Hz. Esse primeiro teste teve o objetivo de verificar a tensão de saída, a qual ficou na faixa de 0 V a 3,3 V, do circuito de condicionamento, conforme a amplitude do sinal de entrada.

Foi escolhida a frequência de corte do filtro de 1 kHz e foi definido no código o maior valor de ganho que não provocou a saturação do sinal de saída, de acordo com o ganho global de -20 dB e com a Equação 20.

$$ganho = -20 + 20(\log(\frac{3,3}{\frac{V_{pp}}{10}})) \quad \text{Eq. 20}$$

Na Tabela 1, observam-se os valores de ganho e *offset* conforme a amplitude do sinal de entrada. Com relação ao *offset*, o valor 12 é proporcional a 0,155 V e o valor 128 é proporcional a 1,65 V, de acordo com as Equações 21 e 22, respectivamente. Os resultados do primeiro teste podem ser visualizados nas Figuras 13 a 20.

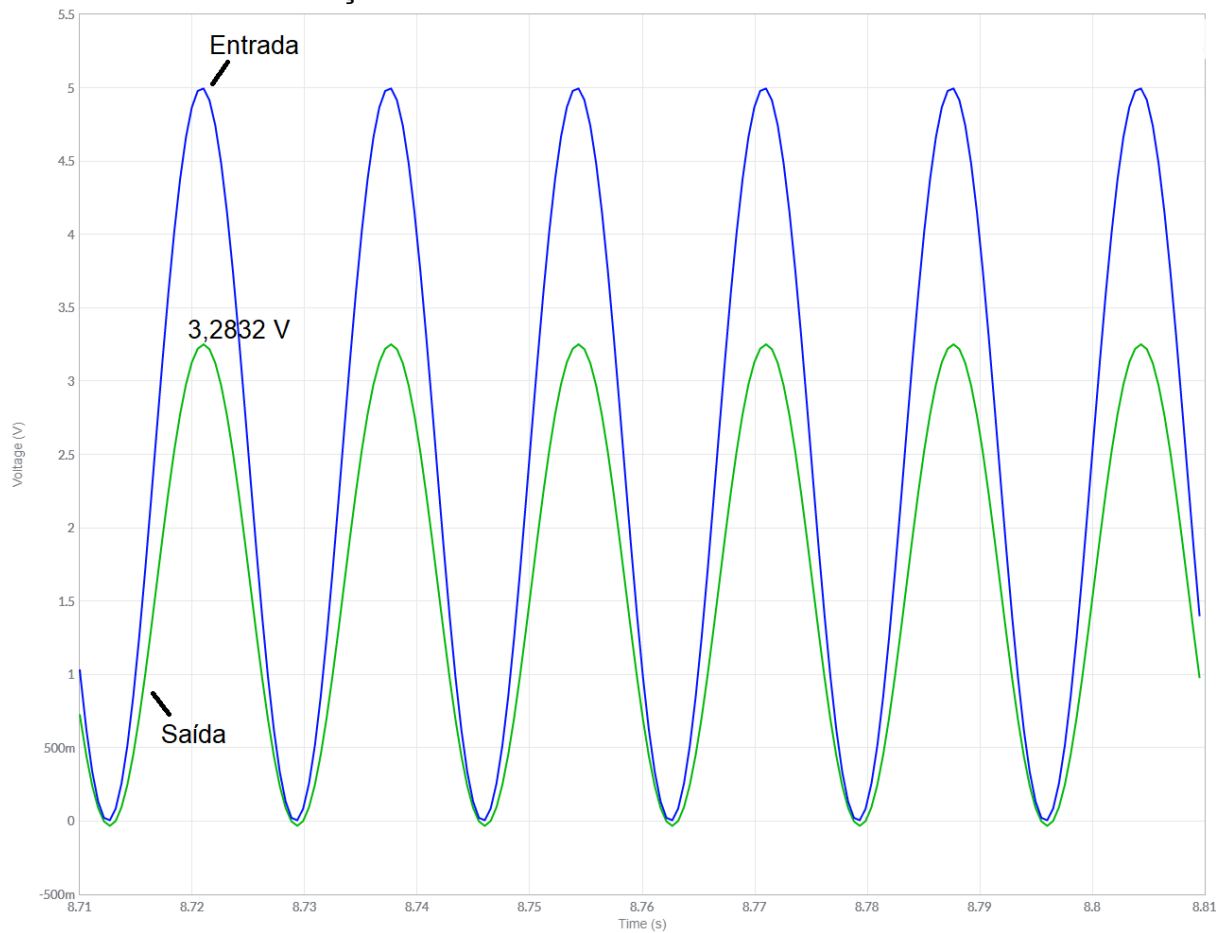
$$offset(12) = \frac{(0,155)(2^8)}{3,3} \quad \text{Eq. 21}$$

$$offset(128) = \frac{(1,65)(2^8)}{3,3} \quad \text{Eq. 22}$$

**TABELA 1 - VALORES DE GANHO E OFFSET CONFIGURADOS NO SOFTWARE**

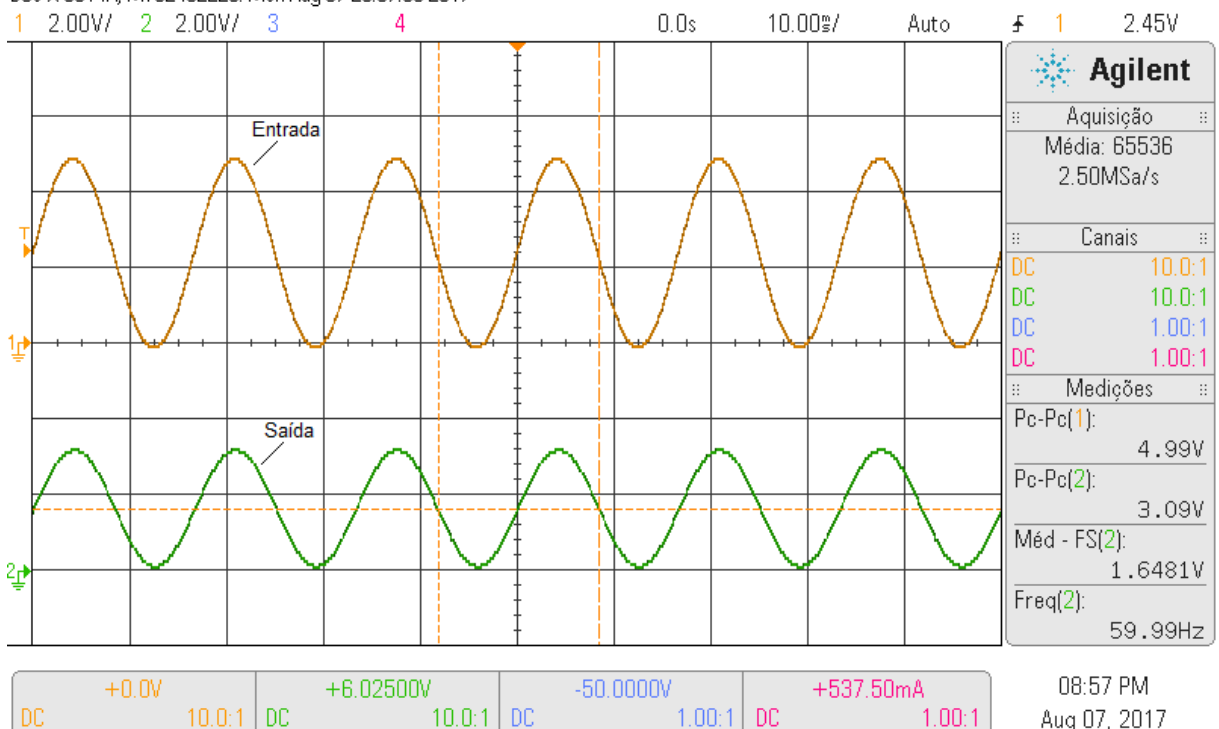
<b>Amplitude (V)</b>	<b>Ganho (dB)</b>	<b>Offset</b>
0-5	-4	12
0-10	-10	12
± 5	-10	128
± 10	-16	128

**FIGURA 13 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-5 V**

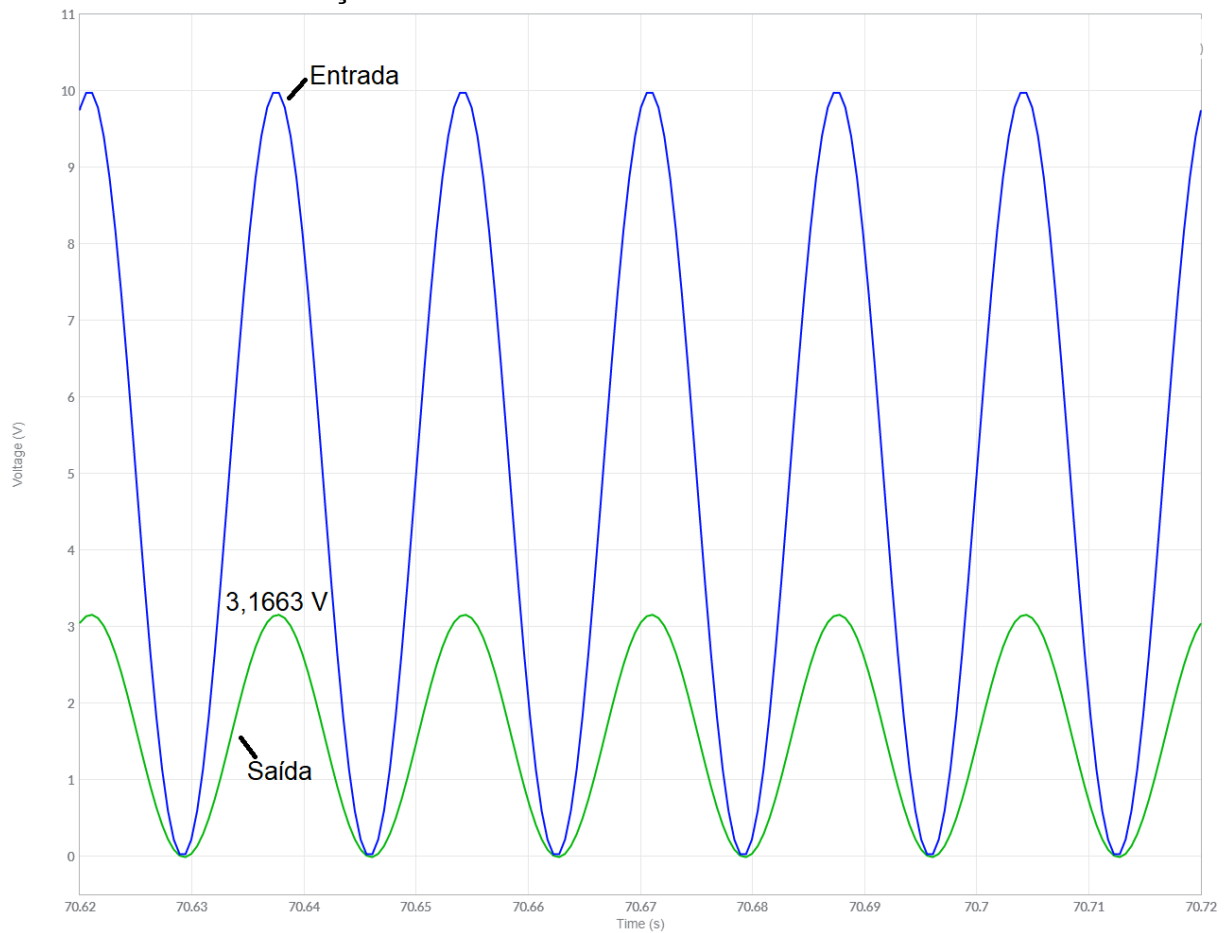


**FIGURA 14 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-5 V**

DSO-X 3014A, MY52492226: Mon Aug 07 20:57:35 2017



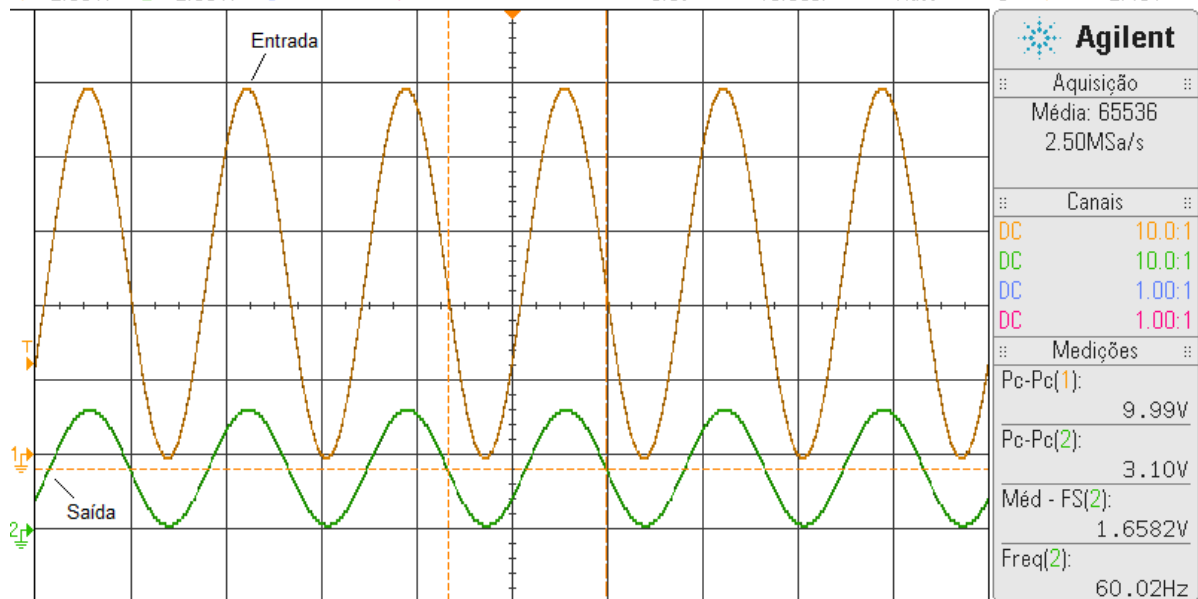
**FIGURA 15 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-10 V**



**FIGURA 16 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE 0-10 V**

DSO-X 3014A, MY52492226: Mon Aug 07 21:06:23 2017

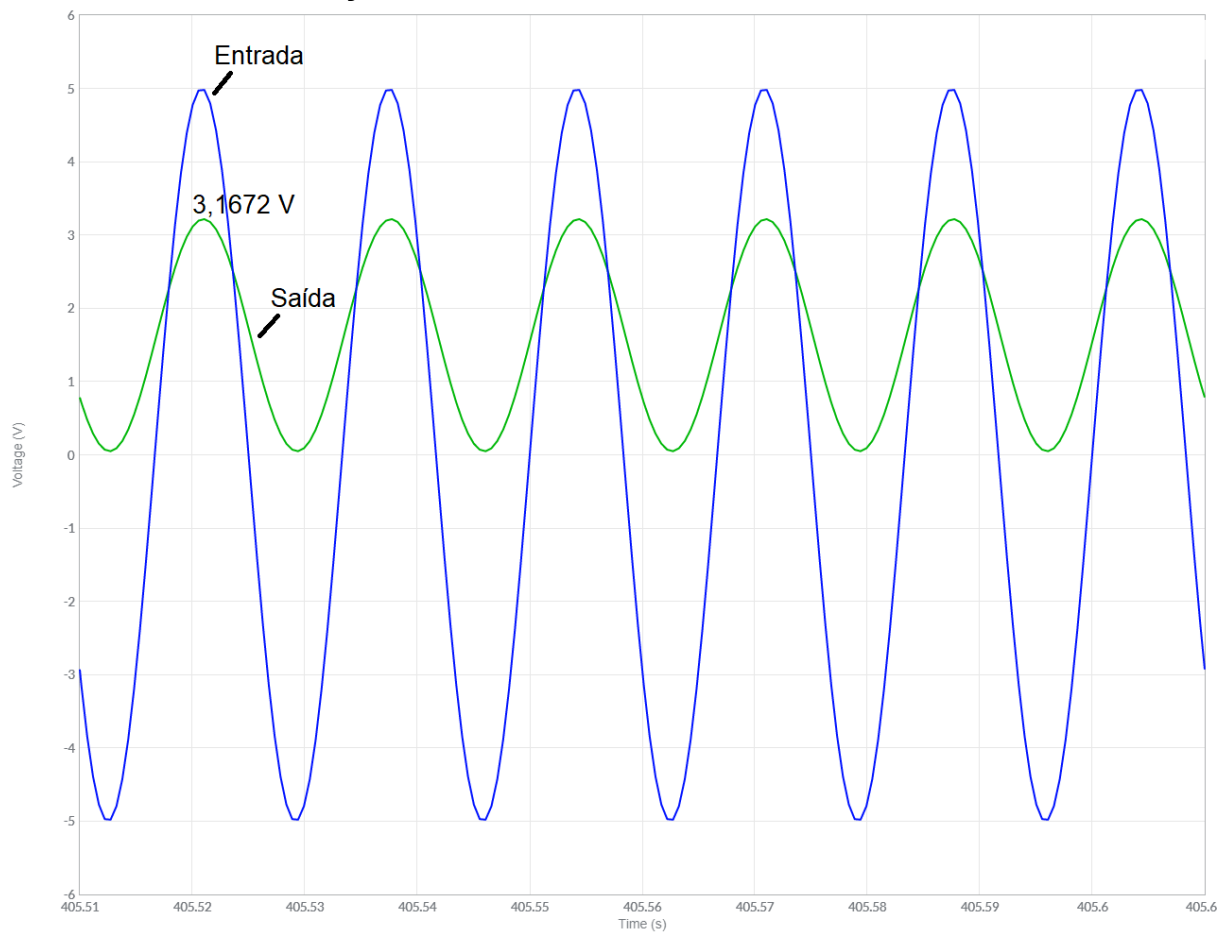
1 2.00V/ 2 2.00V/ 3 4 0.0s 10.00% Auto f 1 2.45V



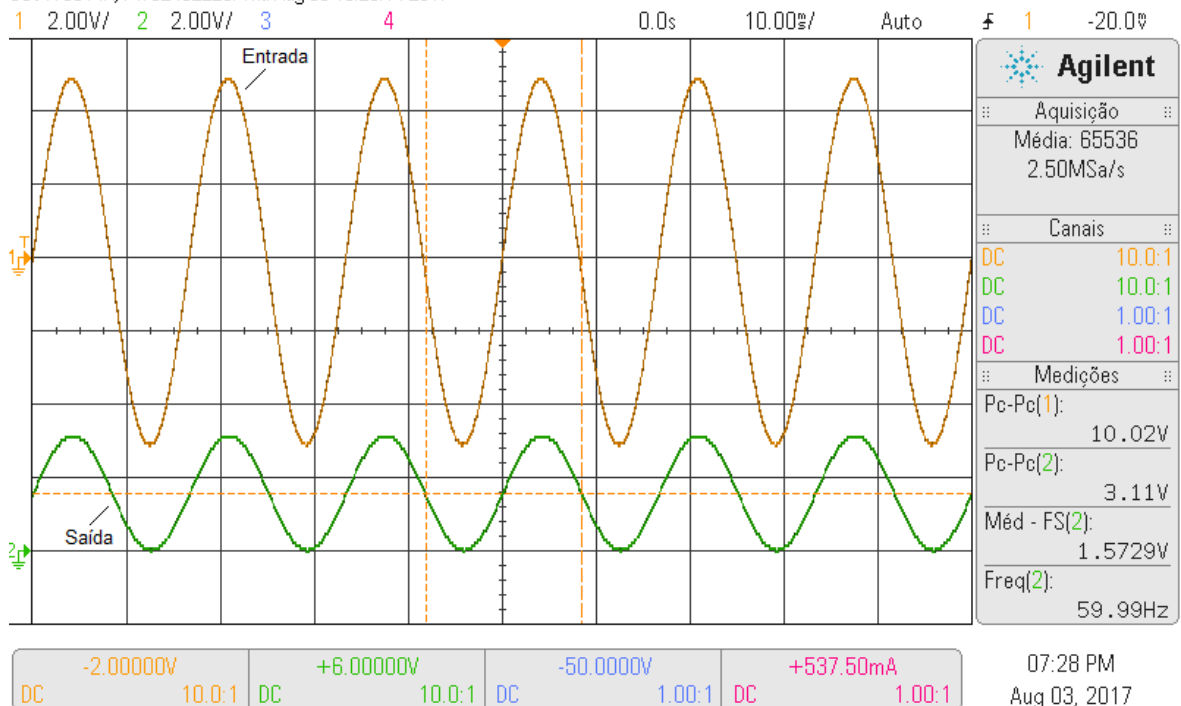
DC +4.00000V 10.0:1 DC +6.02500V 10.0:1 DC -50.0000V 1.00:1 DC +537.50mA 1.00:1

09:06 PM  
Aug 07, 2017

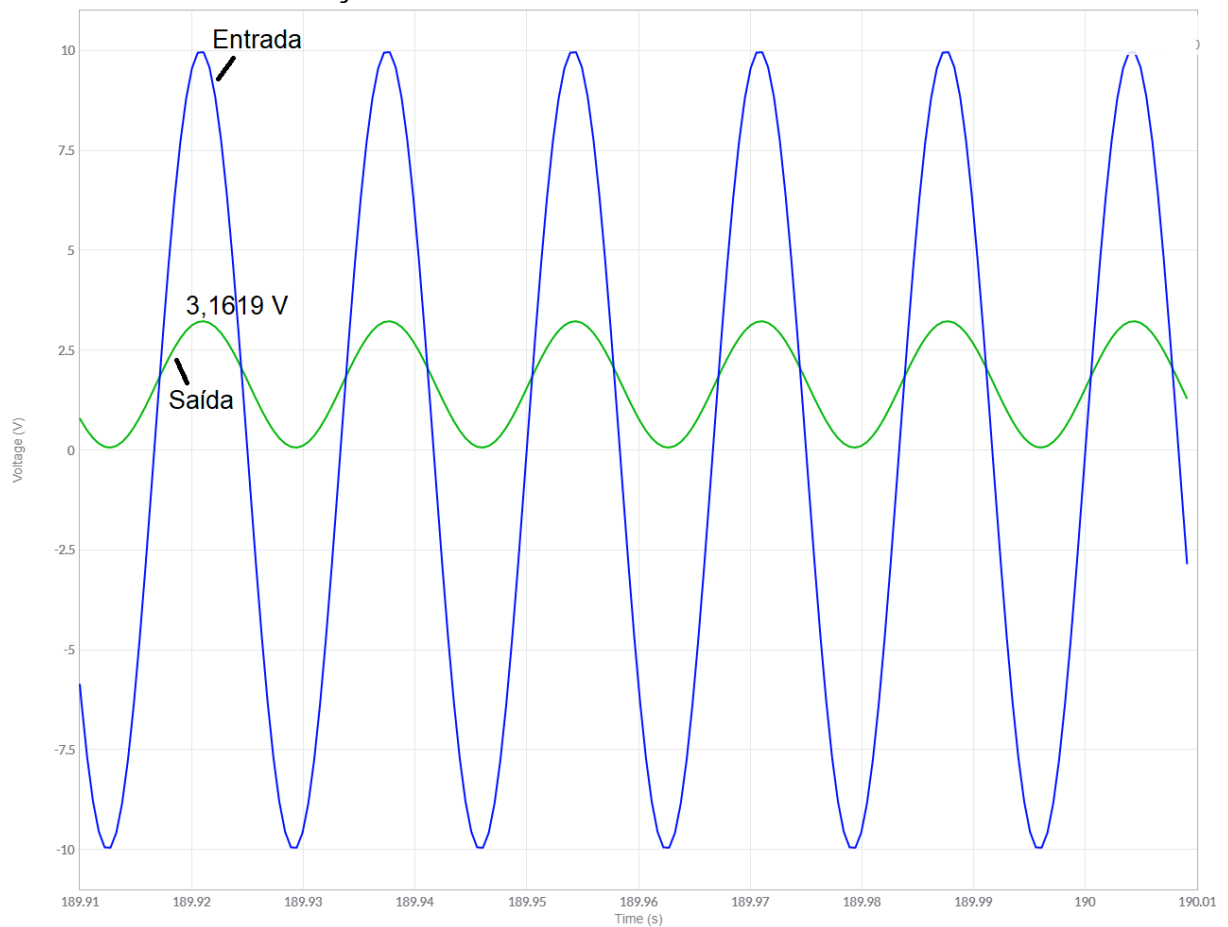


FIGURA 17 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE  $\pm 5$  V

 FIGURA 18 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE  $\pm 5$  V

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 19:29:14 2017

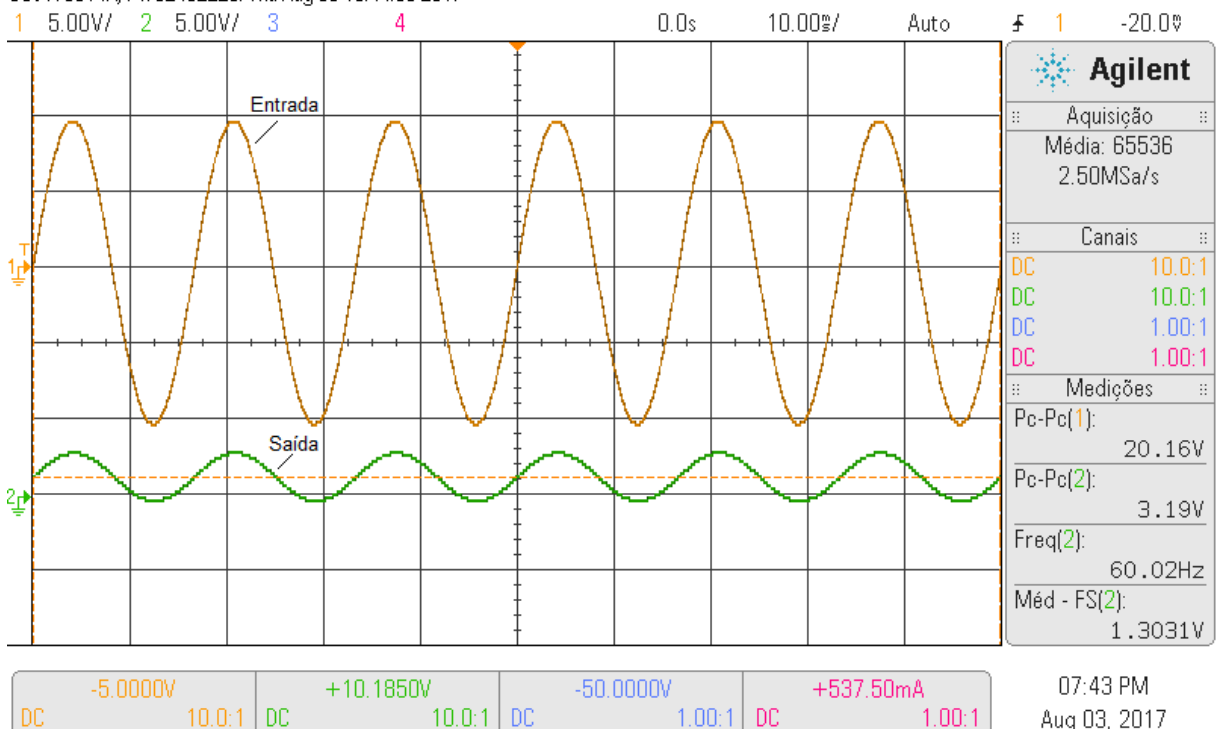


**FIGURA 19 - SIMULAÇÃO PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE  $\pm 10$  V**



**FIGURA 20 - SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE ENTRADA COM AMPLITUDE DE  $\pm 10$  V**

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 19:44:39 2017



Analizando as figuras do primeiro teste, percebeu-se que o valor pico-a-pico da tensão de saída ficou entre 0 V e 3,3 V. Na Tabela 2, são comparados os valores obtidos no primeiro teste para a tensão de saída ( $V_{out}$ ), com base no modelo matemático (Equação 19), simulação e medição experimental. Esses valores equivalem à tensão de pico-a-pico. Observa-se também o erro entre o valor calculado e o da simulação e o erro entre o valor da simulação e da medição experimental. O maior valor de erro foi de 0,19 V, quando a amplitude do sinal de entrada foi de 0-5 V.

**TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE  $V_{OUT}$  PARA O PRIMEIRO TESTE**

Amplitude (V)	Tensão de saída (V)			Erro (V)	
	Calculado (A)	Simulação (B)	Experimental (C)	(A-B)	(B-C)
0-5	3,2940	3,2832	3,09	0,01	0,19
0-10	3,1443	3,1663	3,10	-0,02	0,07
$\pm 5$	3,1443	3,1672	3,11	-0,02	0,06
$\pm 10$	3,2940	3,1619	3,19	0,13	-0,03

O segundo teste foi realizado utilizando-se um sinal de entrada senoidal com amplitude de  $\pm 5$  V e foi usada a frequência de corte ( $f_c$ ) do filtro de 1 kHz. Para esta frequência de corte, foram verificadas seis frequências do sinal de entrada, conforme a Tabela 3. Com os resultados de simulação e experimental, foi possível analisar o sinal de saída com relação à tensão de pico-a-pico. Então, à medida que a frequência do sinal de entrada foi alterada, percebeu-se a atenuação do sinal de saída. Também foi avaliada a defasagem entre os sinais de saída e entrada. Os resultados para  $f_c = 1$  kHz são destacados nas Figuras 21 a 32. Nas Tabelas 4 e 5 são comparados os valores do cálculo, simulação e experimental para a tensão de saída (pico-a-pico) e fase, respectivamente.

**TABELA 3 - FREQUÊNCIAS DO SINAL DE ENTRADA PARA CADA FREQUÊNCIA DE CORTE**

$f_c$ (Hz)	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)	$f_4$ (Hz)	$f_5$ (Hz)	$f_6$ (Hz)
1k	60	200	500	1k	2k	5k

FIGURA 21 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_1 = 60 \text{ HZ}$

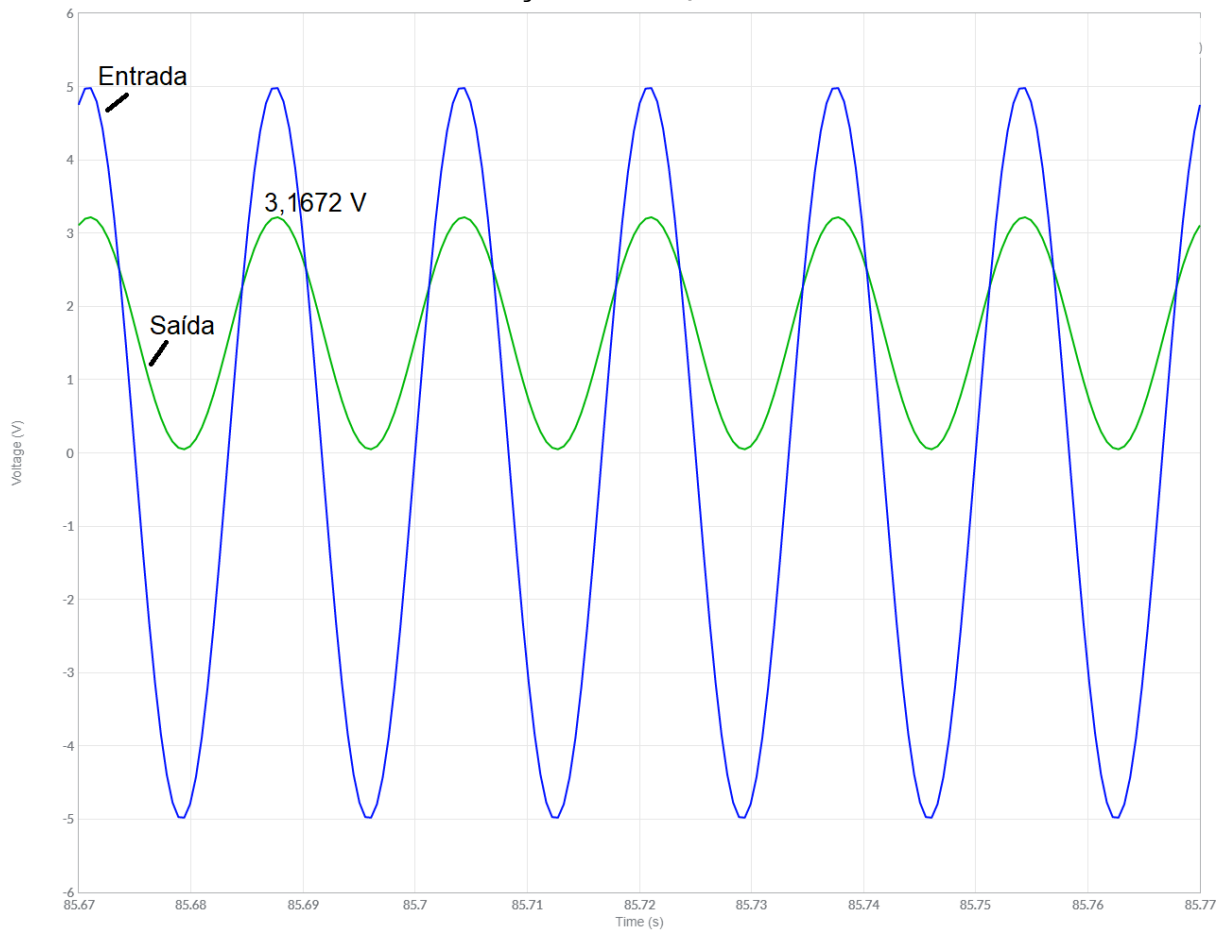
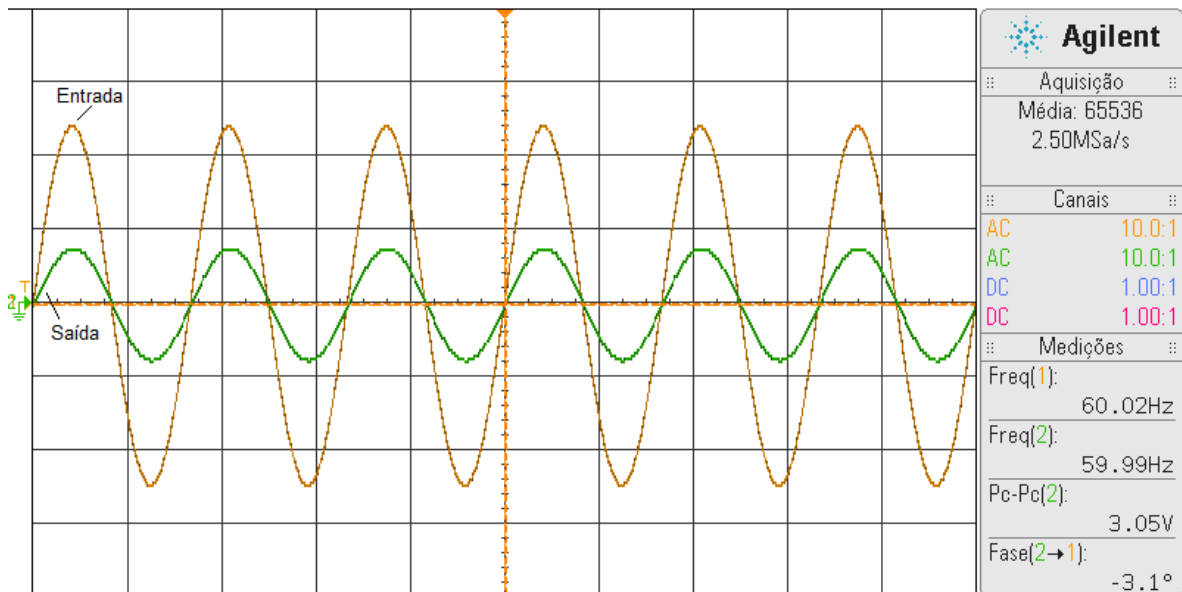


FIGURA 22 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_1 = 60 \text{ HZ}$

DSO-X 3014A, MY5249222B, Thu Aug 03 21:42:18 2017

1 2.00V/ 2 2.00V/ 3 4 0.0s 10.00ns/ Auto f 1 -20.0V



AC +0.0V 10.0:1 AC +0.0V 10.0:1 DC -50.0000V 1.00:1 DC +537.50mA 1.00:1

09:41 PM  
Aug 03, 2017

FIGURA 23 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_2 = 200 \text{ HZ}$

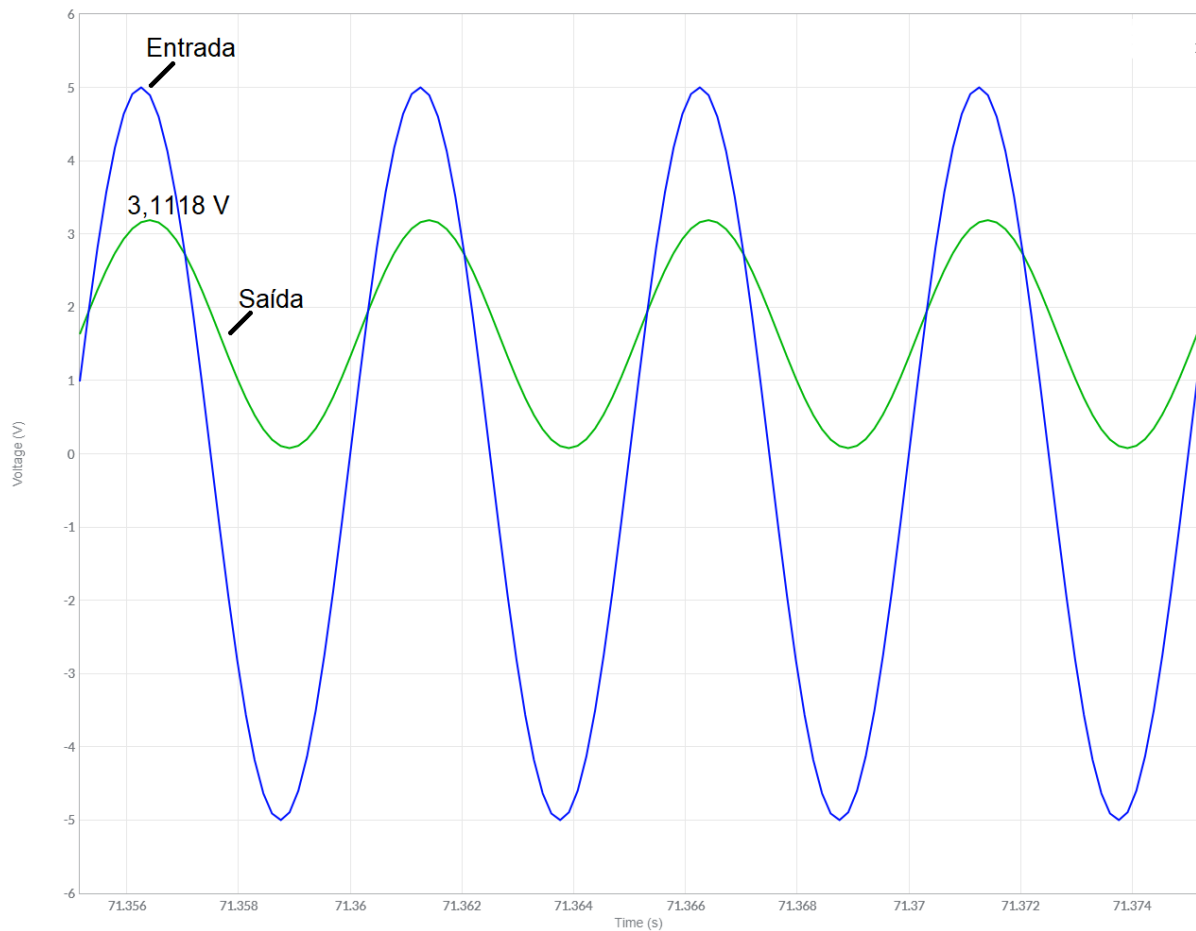


FIGURA 24 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_2 = 200 \text{ HZ}$

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 21:51:28 2017

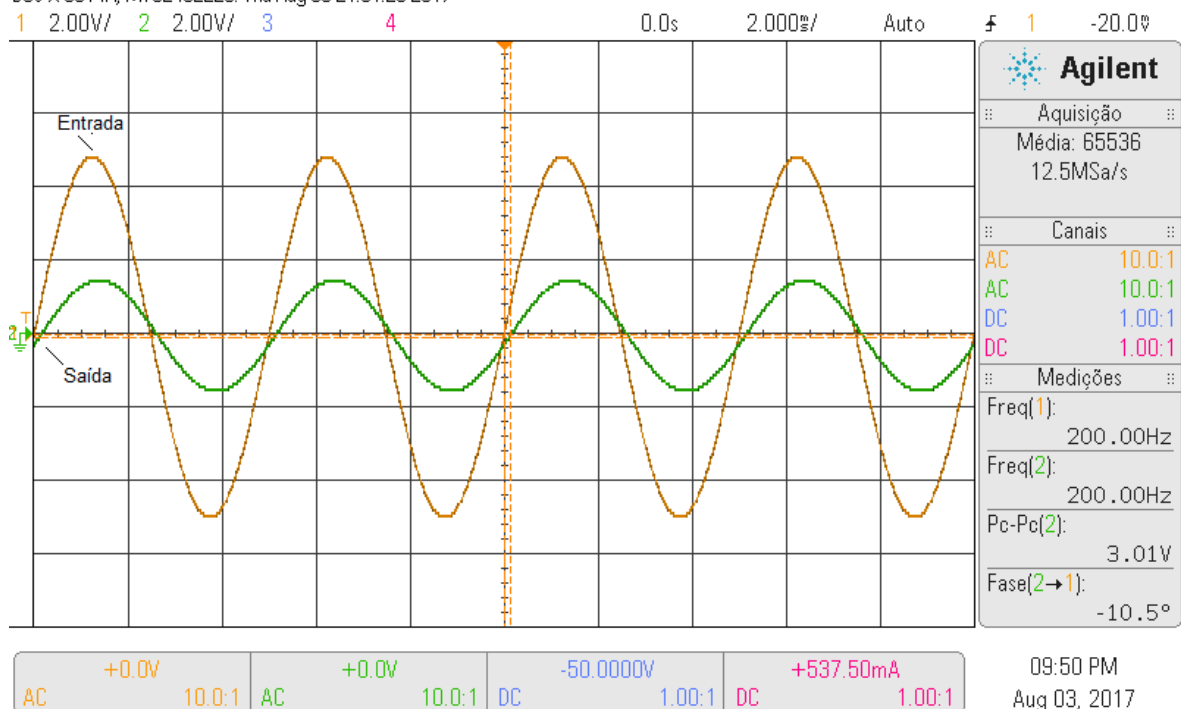


FIGURA 25 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_3 = 500 \text{ HZ}$

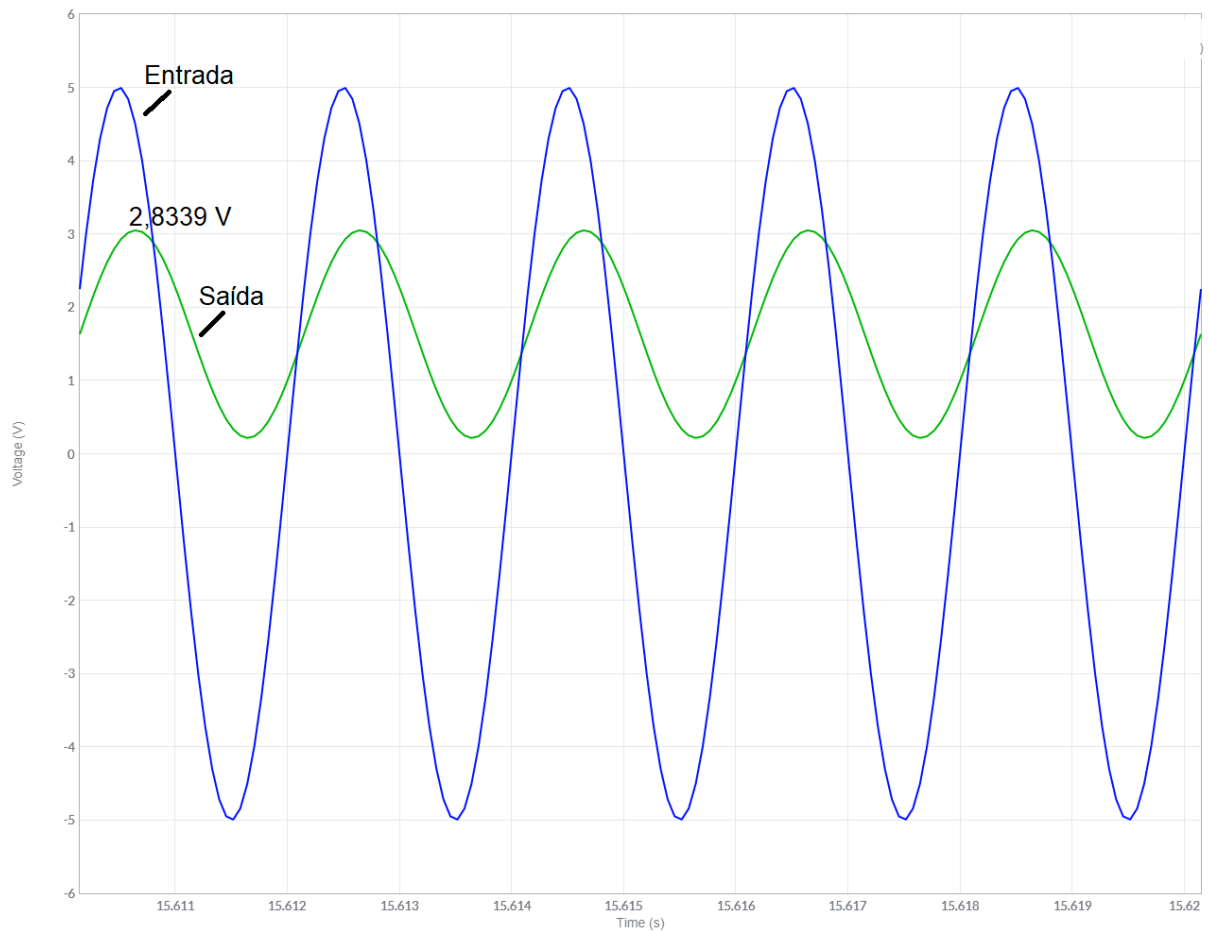


FIGURA 26 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_3 = 500 \text{ HZ}$

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 21:57:09 2017

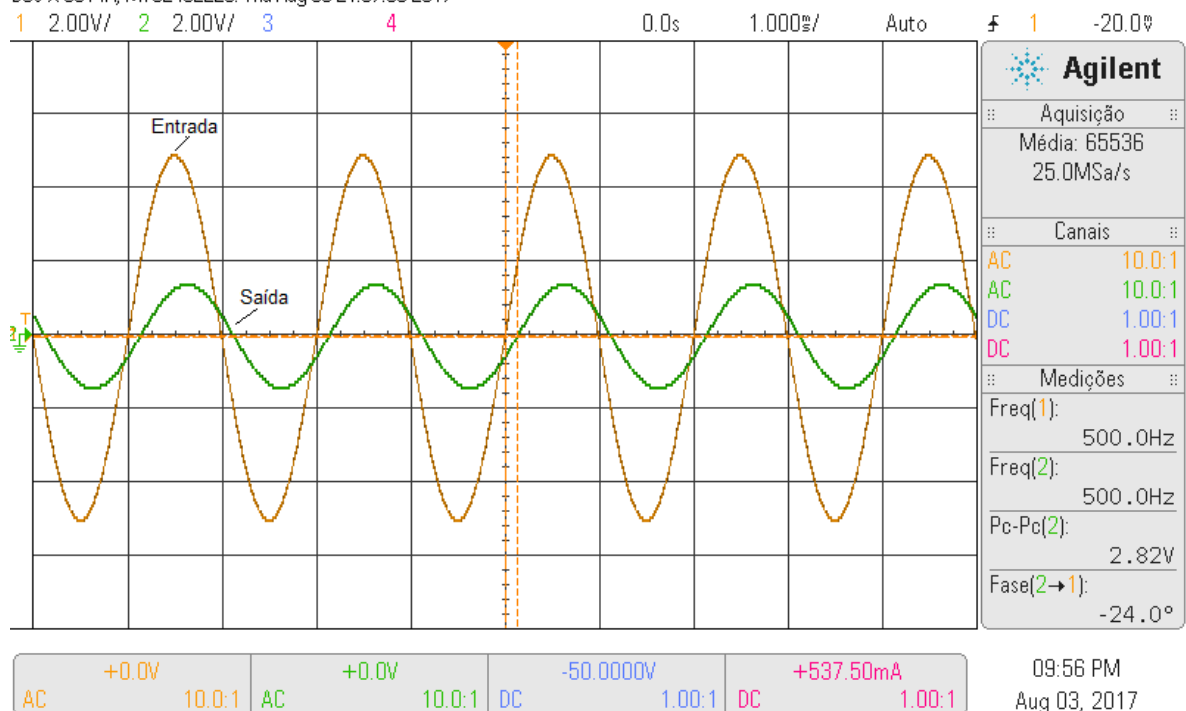
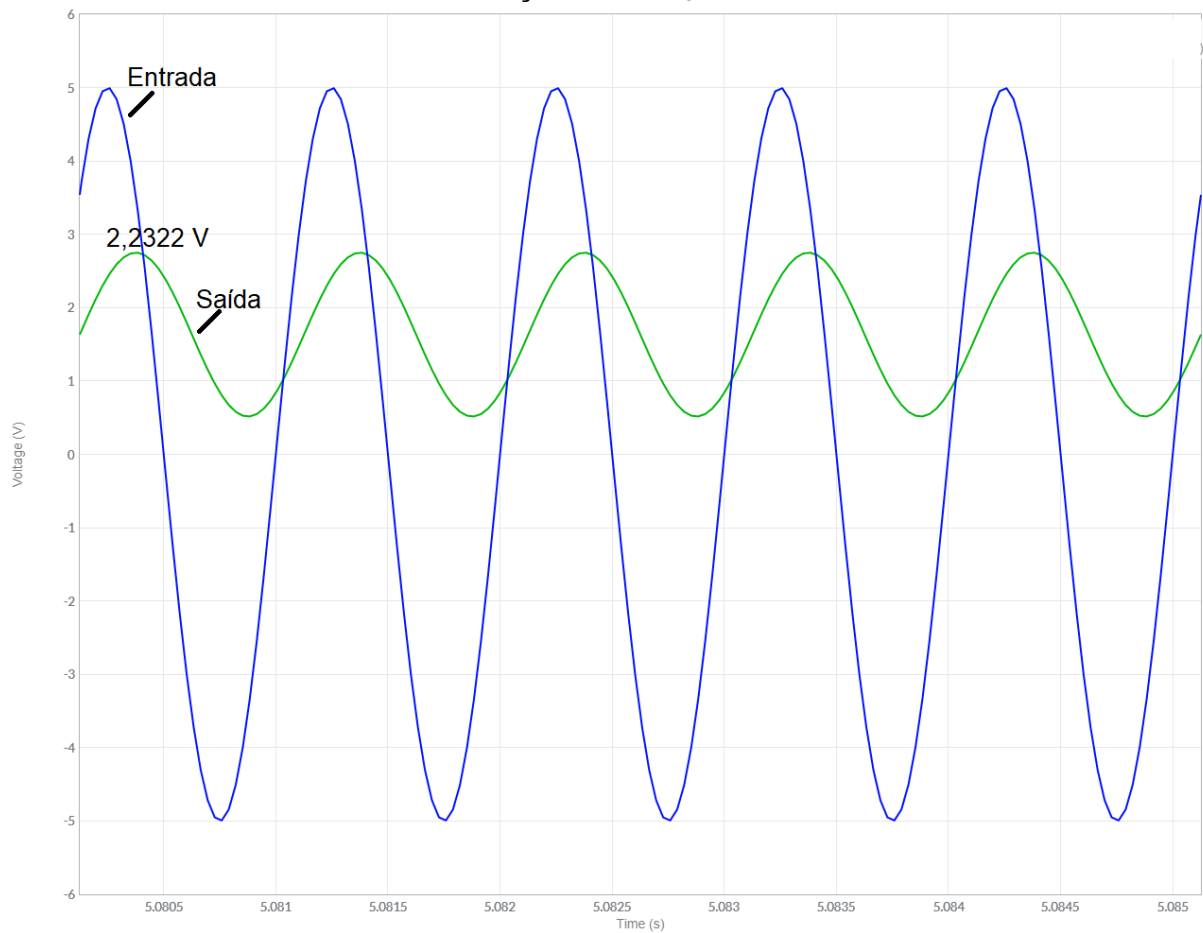


FIGURA 27 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_4 = 1 \text{ KHZ}$ 

 FIGURA 28 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_4 = 1 \text{ KHZ}$ 

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 22:02:06 2017

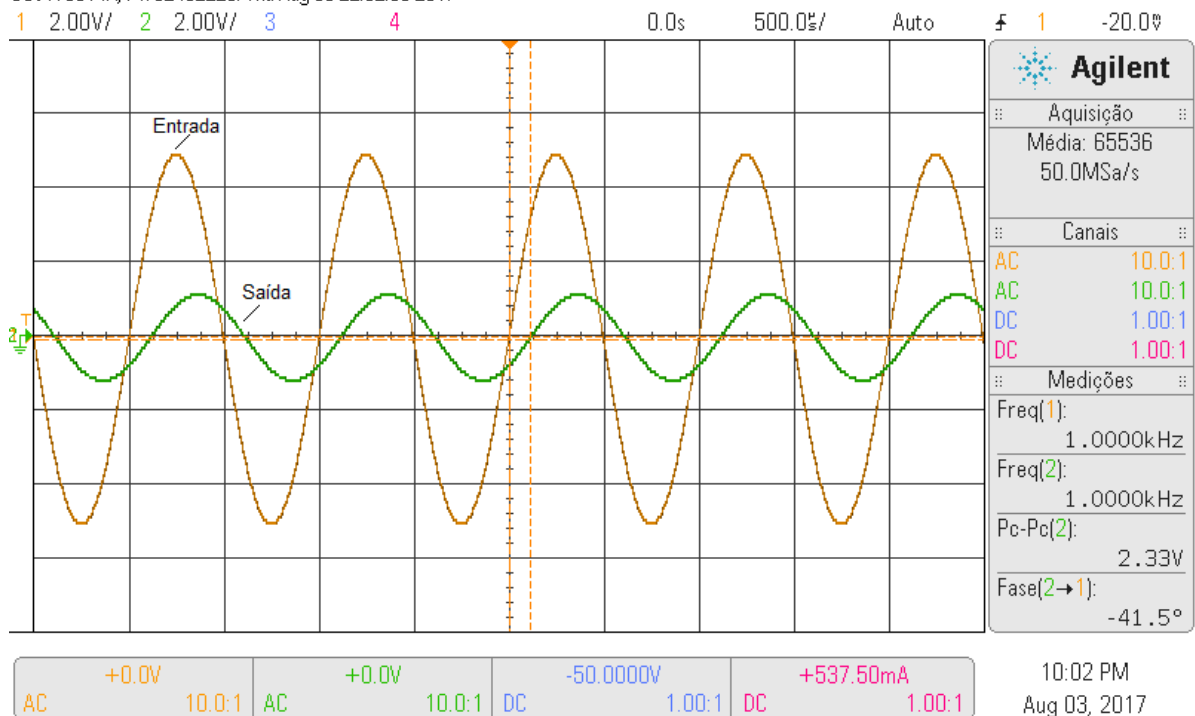


FIGURA 29 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_5 = 2 \text{ KHZ}$

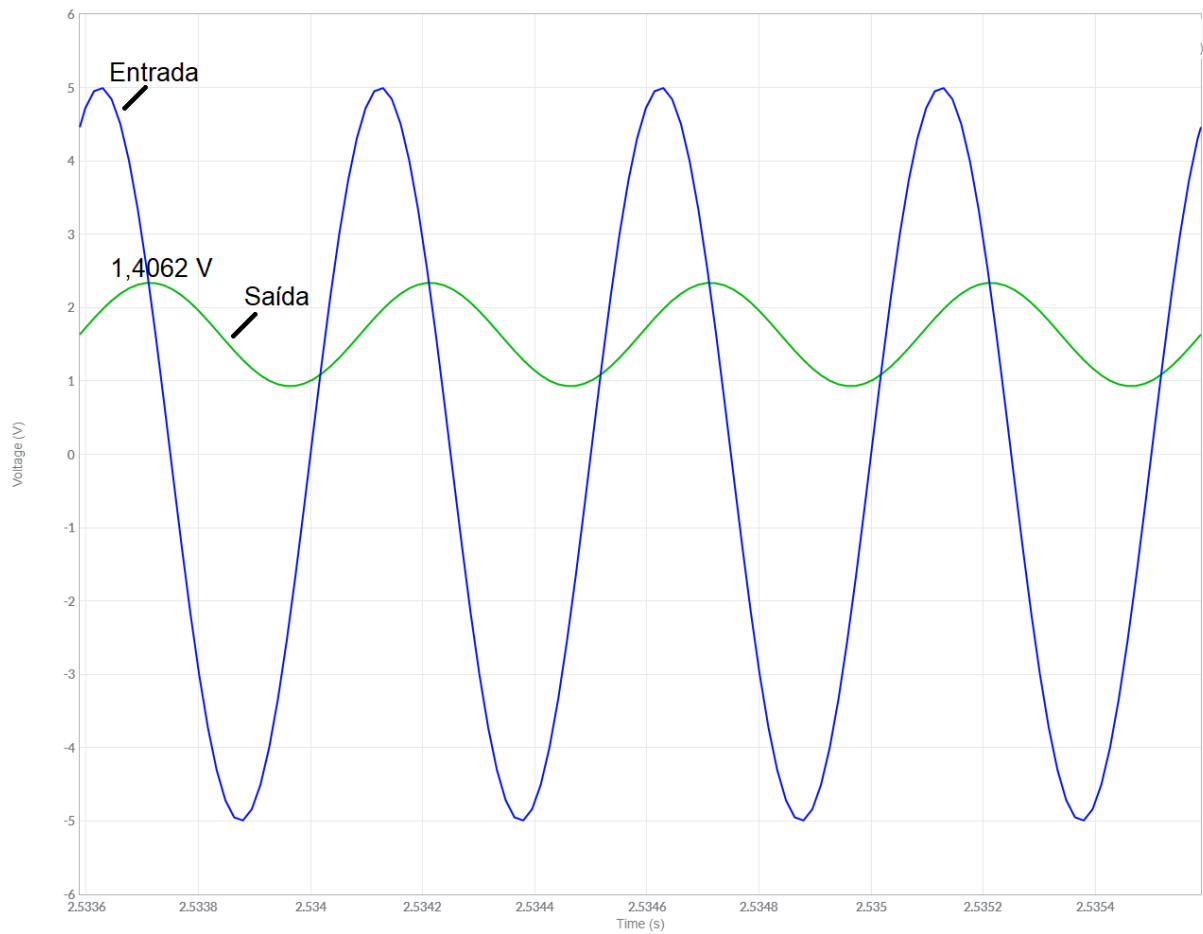


FIGURA 30 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_5 = 2 \text{ KHZ}$

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 22:06:19 2017

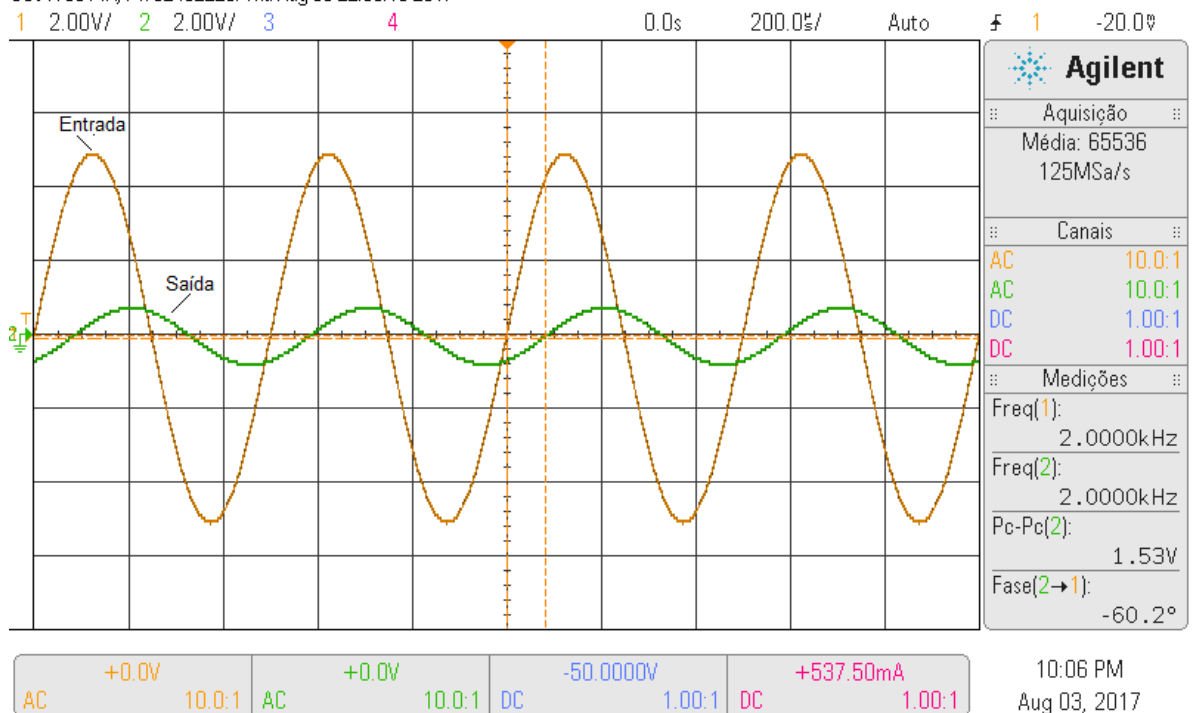




FIGURA 31 - SIMULAÇÃO PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_6 = 5 \text{ KHZ}$

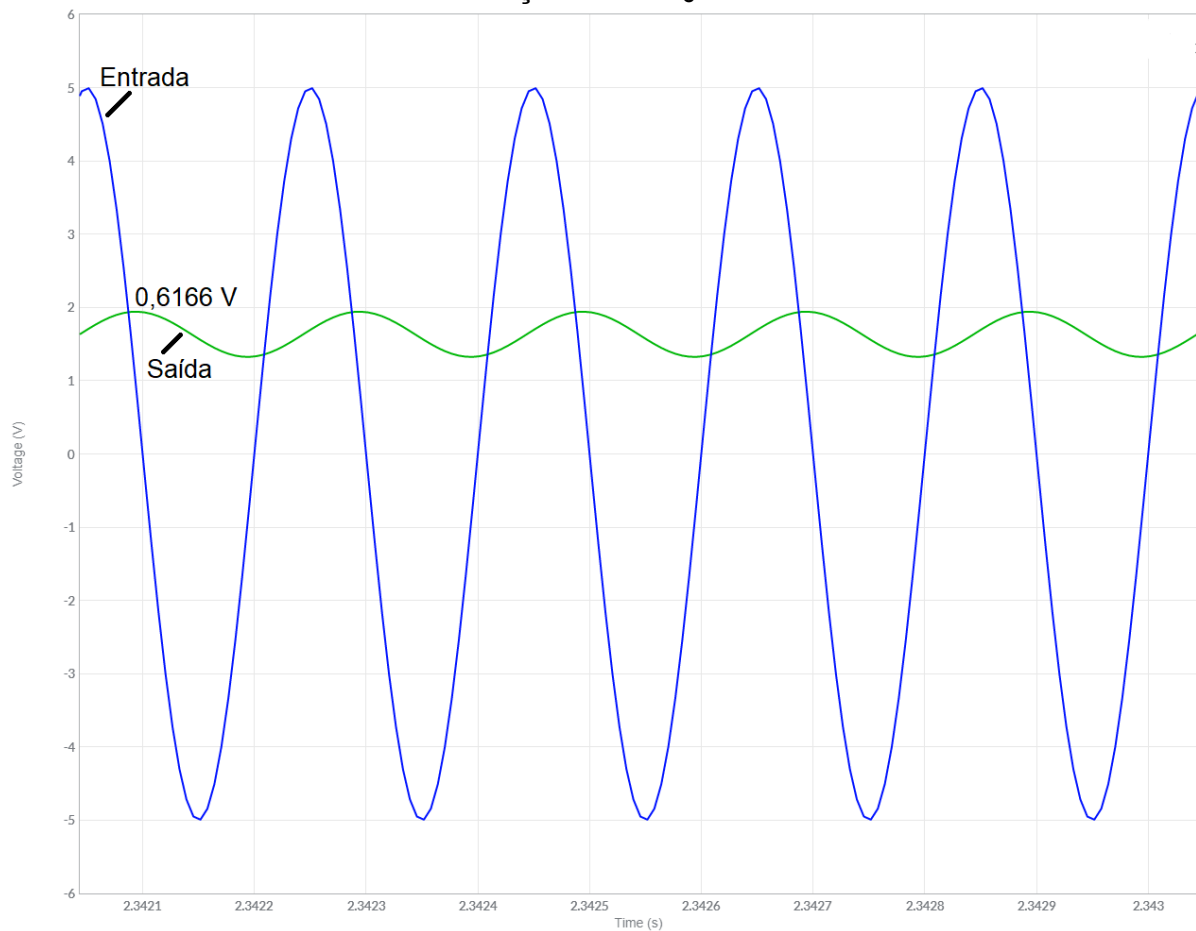
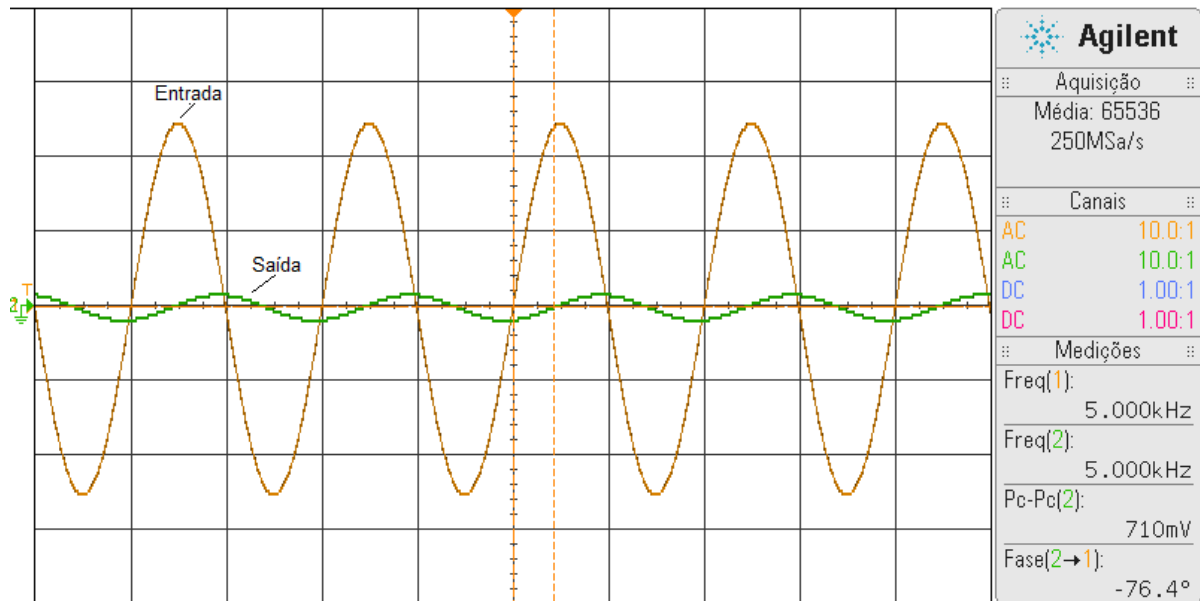


FIGURA 32 - RESULTADO EXPERIMENTAL PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$  E  $F_6 = 5 \text{ KHZ}$

DSO-X 3014A, MY52492226: Thu Aug 03 22:10:47 2017

1 2.00V/ 2 2.00V/ 3 4 0.0s 100.0%/ Auto f 1 -20.0V



AC +0.0V 10.0:1 AC +0.0V 10.0:1 DC -50.0000V 1.00:1 DC +537.50mA 1.00:1

10:10 PM  
Aug 03, 2017

**TABELA 4 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE  $V_{OUT}$  PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$** 

Frequência (Hz)	Tensão de saída (V)			Erro (V)	
	Calculado (A)	Simulação (B)	Experimental (C)	(A-B)	(B-C)
60	3,1443	3,1672	3,05	-0,02	0,12
200	3,0882	3,1118	3,01	-0,02	0,10
500	2,8145	2,8339	2,82	-0,02	0,01
1k	2,2215	2,2322	2,33	-0,01	-0,10
2k	1,4028	1,4062	1,53	-0,0034	-0,12
5k	0,6146	0,6166	0,71	-0,002	-0,09

**TABELA 5 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DA FASE PARA  $F_c = 1 \text{ KHZ}$** 

Frequência (Hz)	Fase (graus)			Erro (graus)	
	Calculado (D)	Simulação (E)	Experimental (F)	(D-E)	(E-F)
60	-3,4518	-3,4825	-3,1	0,03	-0,38
200	-11,3684	-11,355	-10,5	-0,01	-0,86
500	-26,6866	-26,669	-24	-0,02	-2,67
1k	-45,1517	-45,224	-41,5	0,07	-3,72
2k	-63,5561	-63,684	-60,2	0,13	-3,48
5k	-78,7483	-78,825	-76,4	0,08	-2,43

Observando as figuras do segundo teste e analisando as Tabelas 4 e 5, observa-se que quanto maior a frequência do sinal de entrada, maior foi a atenuação do sinal de saída e maior foi a defasagem entre os sinais de saída e entrada, comprovando a característica do filtro RC passa-baixa.

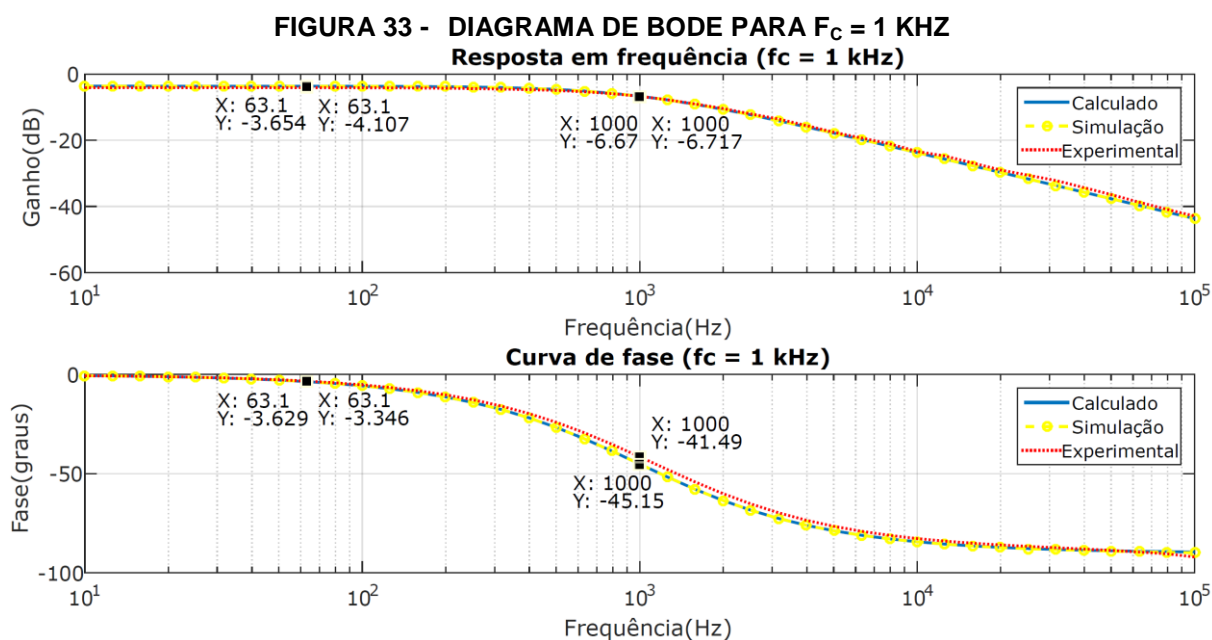
Na Tabela 4 verifica-se que quando a frequência do sinal de entrada foi igual à frequência de corte, a tensão de saída foi reduzida por um fator próximo de 0,7 vezes a tensão de entrada do filtro.

Na Tabela 5 destaca-se a diferença de fase entre as tensões de saída e entrada. A fase negativa indica que a saída está atrasada em relação à entrada. Na frequência de corte, a fase é igual a  $-45^\circ$ , de acordo com os valores do cálculo e da simulação.

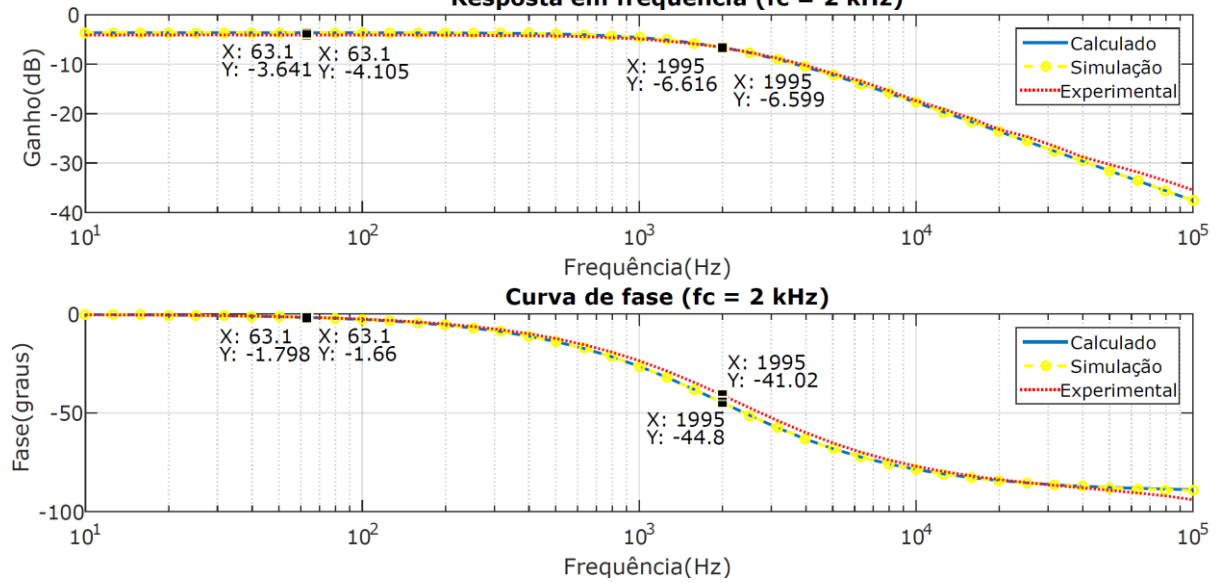
O terceiro teste foi realizado para verificar a resposta em frequência do circuito de condicionamento de sinal. Nesse teste, foi usado o gerador do próprio osciloscópio para gerar um sinal senoidal de 5 V de pico-a-pico, cuja frequência

variou numa escala logarítmica de 10 Hz a 100 kHz. Essa variação de frequência foi alcançada por meio do *software Scilab*, que foi usado para programar o osciloscópio para mudar o valor da frequência de forma automática. Então, esse sinal senoidal foi aplicado na entrada do circuito de condicionamento para cada frequência de corte.

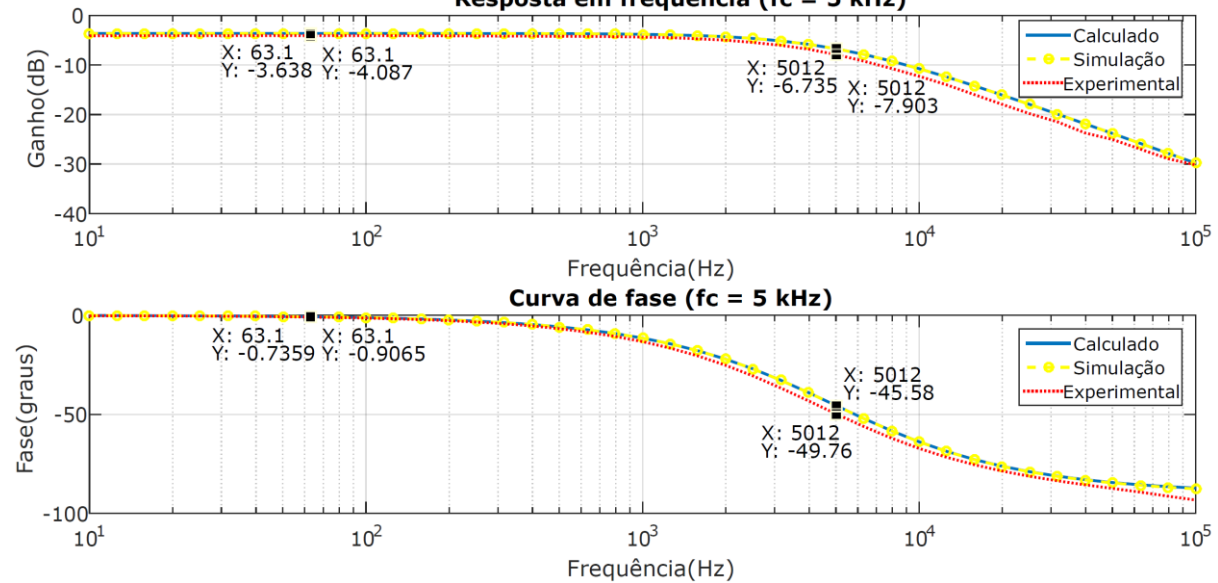
Nas Figuras 33 a 39 são ilustrados os Diagramas de Bode do circuito de condicionamento de sinal, com destaque para as curvas de ganho e fase. Nessas Figuras foram traçadas as curvas do modelo matemático (calculado), da simulação e dos resultados experimentais. Também foram destacados os valores para as frequências de 63,1 Hz e de corte.

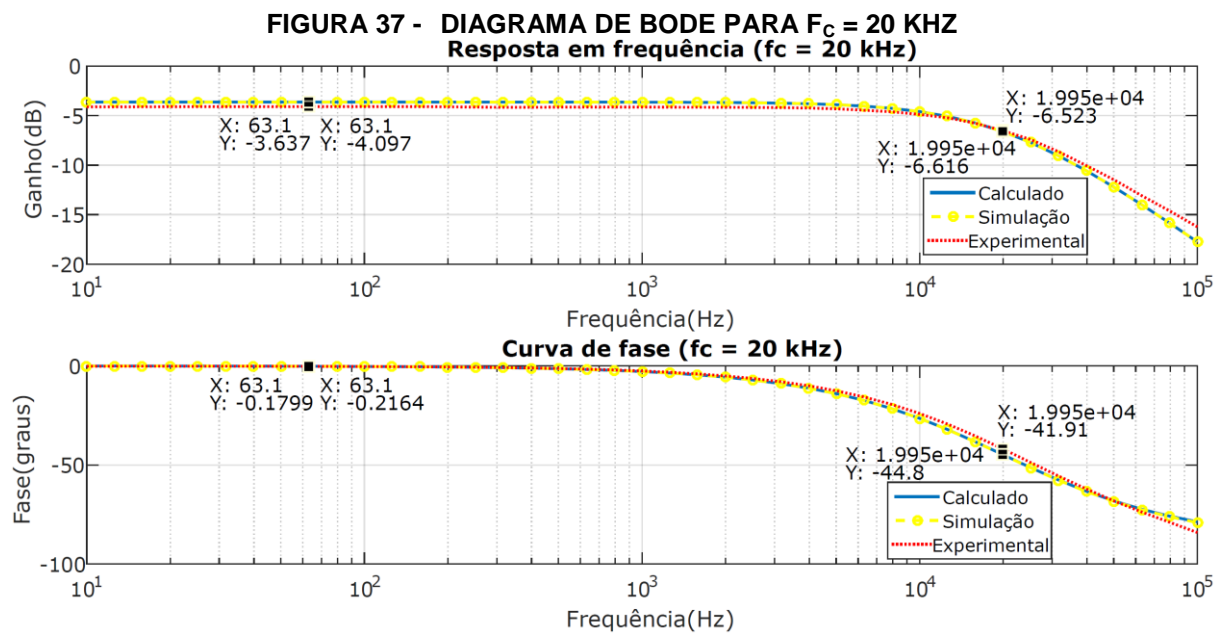
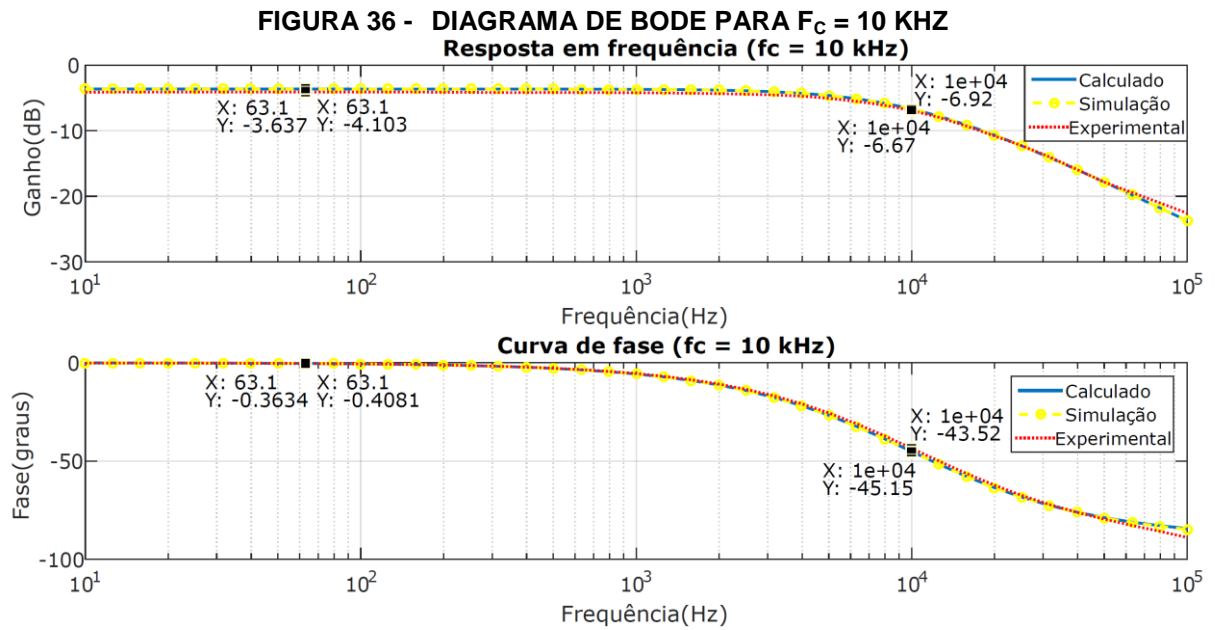


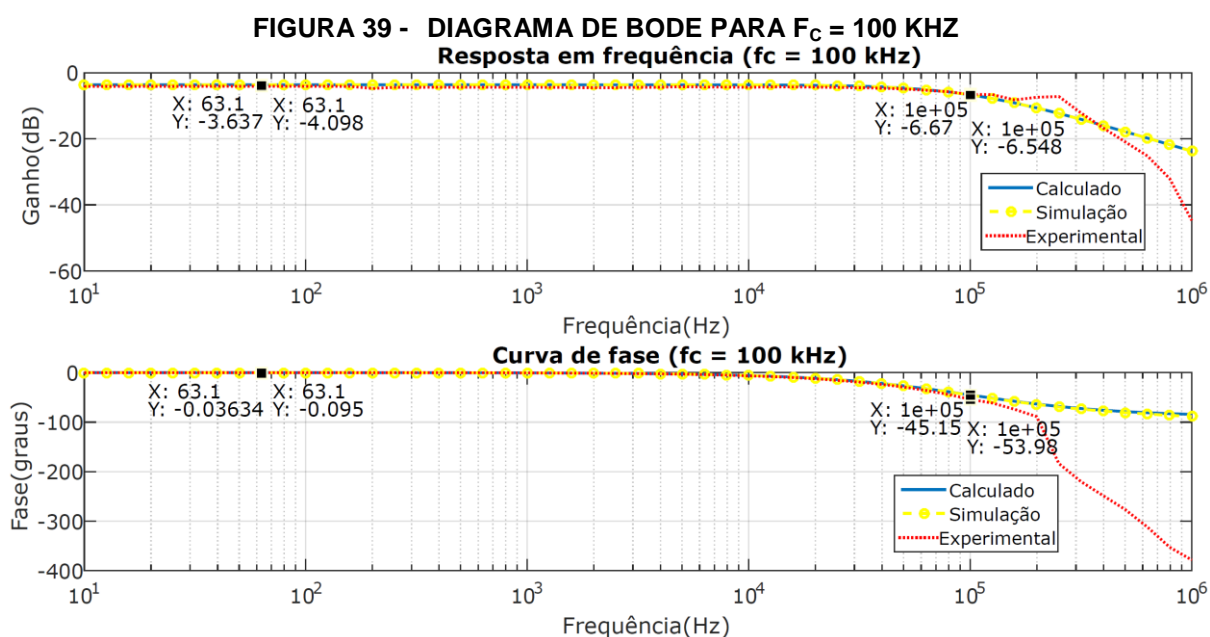
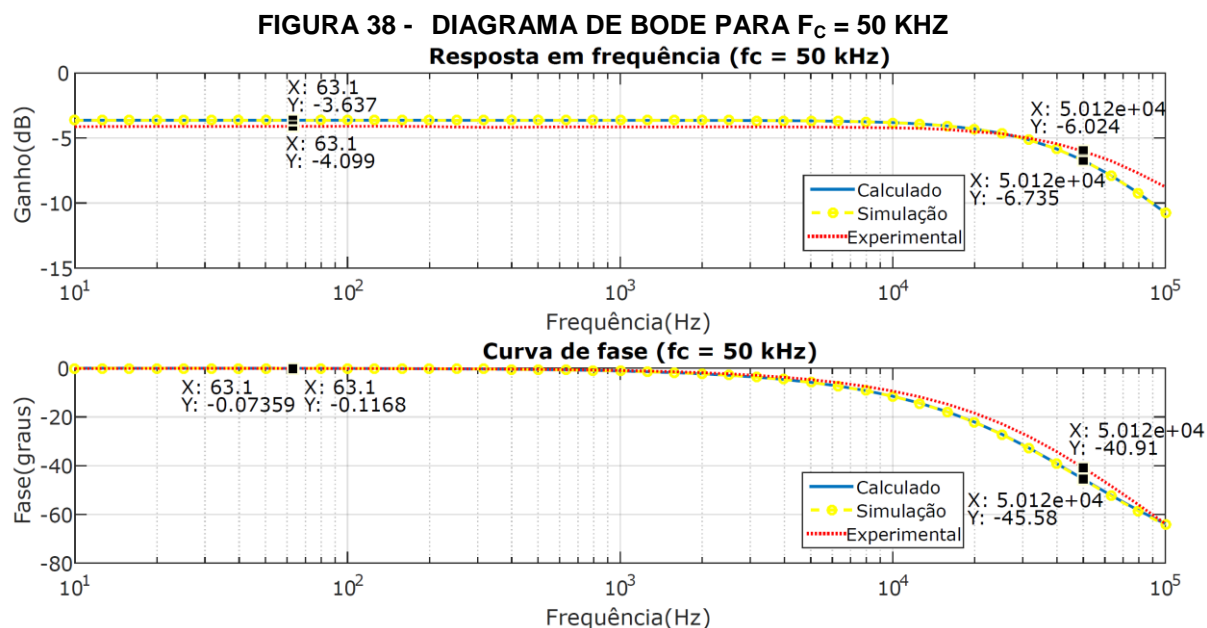
**FIGURA 34 - DIAGRAMA DE BODE PARA  $F_C = 2$  KHZ**  
**Resposta em frequência ( $f_c = 2$  kHz)**



**FIGURA 35 - DIAGRAMA DE BODE PARA  $F_C = 5$  KHZ**  
**Resposta em frequência ( $f_c = 5$  kHz)**







Analisando as Figuras do terceiro teste, pode-se verificar um grau de concordância relevante entre as três curvas (calculado, simulação e experimental) tanto para o ganho, quanto para a fase.

Com relação às curvas de ganho, percebe-se as características dos filtros RC passa-baixa do circuito de condicionamento, ou seja, esses filtros permitem a passagem de baixas frequências com pequena atenuação e atenuam fortemente todas as outras acima do valor da frequência de corte.

Com relação ao ângulo de fase, percebe-se que quando a frequência do sinal de entrada é muito menor que a frequência de corte do filtro, o ângulo aproxima-se de  $0^\circ$ . E quando o sinal de entrada possui uma frequência muito maior que a frequência de corte do filtro, o ângulo de fase aproxima-se de  $-90^\circ$ . Isso comprova o comportamento dos filtros RC passa-baixa.

Nas Tabelas 6 e 7, pode-se ver a comparação dos valores calculados com os resultados da medição experimental, assim como o erro. Para cada frequência de corte foi verificada a resposta de ganho e fase para duas frequências: a primeira igual a 63,1 Hz, que é o valor mais próximo, numa escala logarítmica, da frequência fundamental de 60 Hz e a segunda igual à frequência de corte.

**TABELA 6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA  $F_s = 63,1$  HZ**

Fc (Hz)	Fs (Hz)	Ganho (dB)		Erro (dB)	Fase (graus)		Erro (graus)
		Calculado (A)	Experimental (B)	(A-B)	Calculado (C)	Experimental (D)	(C-D)
1k	63,1	-3,654	-4,107	0,45	-3,629	-3,346	-0,28
2k	63,1	-3,641	-4,105	0,46	-1,798	-1,66	-0,14
5k	63,1	-3,638	-4,087	0,45	-0,7359	-0,9065	0,17
10k	63,1	-3,637	-4,103	0,47	-0,3634	-0,4081	0,04
20k	63,1	-3,637	-4,097	0,46	-0,1799	-0,2164	0,04
50k	63,1	-3,637	-4,099	0,46	-0,0736	-0,1168	0,04
100k	63,1	-3,637	-4,098	0,46	-0,0363	-0,095	0,06

**TABELA 7 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA  $F_s = F_c$**

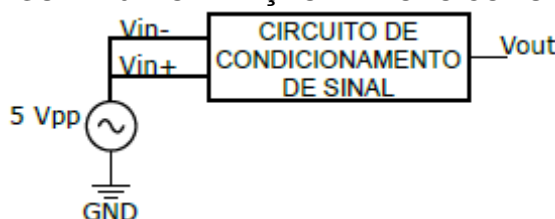
Fc (Hz)	Fs (Hz)	Ganho (dB)		Erro (dB)	Fase (graus)		Erro (graus)
		Calculado (E)	Experimental (F)	(E-F)	Calculado (G)	Experimental (H)	(G-H)
1k	1k	-6,67	-6,717	0,047	-45,15	-41,49	-3,66
2k	2k	-6,616	-6,599	-0,017	-44,8	-41,02	-3,78
5k	5k	-6,735	-7,903	1,168	-45,58	-49,76	4,18
10k	10k	-6,67	-6,92	0,25	-45,15	-43,52	-1,63
20k	20k	-6,616	-6,523	-0,093	-44,8	-41,91	-2,89
50k	50k	-6,735	-6,024	-0,711	-45,58	-40,91	-4,67
100k	100k	-6,67	-6,548	-0,122	-45,15	-53,98	8,83

De acordo com a Tabela 6, o maior valor de erro para o ganho foi quando  $F_c = 10$  kHz, e o maior valor de erro para a fase foi quando  $F_c = 1$  kHz. Conforme a Tabela 7, o maior valor de erro para o ganho foi na frequência de corte de 5 kHz e o maior valor de erro para a fase foi na frequência de corte de 100 kHz.

No quarto teste foi analisada a operação de modo comum, de acordo com a Figura 40. Foi aplicado nas entradas  $V_{in-}$  e  $V_{in+}$  o mesmo sinal senoidal, através do gerador de sinais do osciloscópio, com amplitude de 5 V de pico-a-pico e a frequência desse sinal variou numa escala logarítmica de 10 Hz a 1 MHz. O circuito de condicionamento de sinal foi configurado para um ganho de 0 dB, filtro passa-tudo e tensão de *offset* 128.

A tensão de saída foi aproximadamente 0,018 V pico-a-pico para todas as frequências do sinal de entrada. A relação de tensão entre saída e entrada resultou em um ganho de 0,0036 (0,018 V/5 V), o qual representa uma atenuação de -48,87 dB ( $20\log(0,0036)$ ).

FIGURA 40 - OPERAÇÃO DE MODO COMUM



#### 4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais, que foram obtidos através de quatro testes, para o circuito de condicionamento de sinal.

No primeiro teste, foram verificados sinais de entrada senoidal com diferentes amplitudes, logo, foi comprovado que a tensão de saída ficou na faixa de 0 V a 3,3 V.

No segundo teste, foi analisada a atenuação do sinal de saída conforme a frequência do sinal de entrada e a frequência de corte do filtro selecionado e a defasagem entre os sinais de saída e entrada. Na frequência de corte escolhida, a



tensão de saída foi reduzida por um fator próximo de 0,7 vezes a tensão de entrada do filtro. Os valores da defasagem foram negativos.

No terceiro teste, foi observada a resposta em frequência do circuito de condicionamento de sinal. As curvas de ganho e fase do modelo matemático, simulação e resultados experimentais apresentaram um grau de concordância relevante.

No quarto teste, foi conferida a operação de modo comum, então, na saída do circuito de condicionamento de sinal foi verificada uma tensão de pico-a-pico de aproximadamente 0,018 V.



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o projeto de um dispositivo eletrônico inteligente flexível, constituído de uma plataforma Tiva™ C Series (EK-TM4C1294XL) de baixo custo e um circuito de condicionamento de sinal. Esse conjunto proporciona capacidade de processamento e flexibilidade para diferentes aplicações, uma vez que a Tiva™ possui o microcontrolador TM4C1294NCPDTI com 120 MHz, 32 bits e um processador ARM Cortex – M4F, e o circuito de condicionamento possui 8 frequências de corte, 256 valores de tensão de *offset* e 32 variações de ganho. Com base nessas características, o dispositivo proposto é mais vantajoso em relação aos IEDs citados na revisão de literatura.

Simulações e testes experimentais foram realizados visando analisar o comportamento do dispositivo diante de sinais senoidais com diferentes valores de amplitude e frequência.

As medições experimentais para o sinal de saída foram próximas dos valores obtidos com a simulação e o modelo matemático. Para o desenvolvimento do modelo matemático, foi considerado apenas o caso ideal.

A partir dos testes e resultados experimentais, pode-se dizer que o dispositivo proposto oferece flexibilidade, fidelidade e linearidade no condicionamento de sinais, resposta rápida e interoperabilidade, tornando o dispositivo uma plataforma para avaliação e monitoramento do uso da energia no contexto das redes elétricas inteligentes.

Apesar do dispositivo ter sido testado apenas com sinais senoidais do gerador de forma de onda, como sugestões para trabalhos futuros, ele pode ser usado para medições da tensão e corrente da rede elétrica e de outros tipos de cargas, como motores monofásicos e trifásicos. Nesse caso, será preciso a utilização de transformadores de potencial e corrente para ajustar o nível da tensão de acordo com a entrada do circuito de condicionamento de sinal. Outras sugestões são: usar o dispositivo em diferentes temperaturas e desenvolver uma interface humano – máquina para seu controle.

Através deste trabalho, foi possível publicar um artigo no *IEEE-IAS Industrial Automation and Control Committee*.

## REFERÊNCIAS

- [1] V.C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G.P. Hancke. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *Industrial Informatics*, IEEE Transactions on, 7(4):529–539, 2011.
- [2] P. Palensky and D. Dietrich. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *Industrial Informatics*, IEEE Transactions on, 7(3):381– 388, 2011.
- [3] A. Moshari, G.-R. Yousefi, A. Ebrahimi, and S. Haghbin. Demand-side behavior in the smart grid environment. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010 IEEE PES, pages 1–7, 2010.
- [4] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, and Dejun Yang. Smart grid - the new and improved power grid: A survey. *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, 14(4):944–980, 2012.
- [5] S. M. Amin and B. F. Wollenberg. Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, Sept 2005.
- [6] A. L. Lima. Desenvolvimento de um sistema para aquisição e processamento de sinais utilizando a plataforma *TivaWare™* para aplicações em *Smart Grid*. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- [7] A. Jain and R. Mishra. Changes & Challenges in Smart Grid towards Smarter Grid. *International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 2016, pages 1-6, 2016.
- [8] B. Wojszczyk. Deployment of advanced smart grid solutions - global examples lessons learned. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012 IEEE PES, pages 1–1, 2012.
- [9] Yuanxiong Guo, Miao Pan, and Yuguang Fang. Optimal power management of residential customers in the smart grid. *Parallel and Distributed Systems*, IEEE Transactions on, 23(9):1593–1606, 2012.
- [10] Tongdan Jin and J.A. Jimenez. Review on planning and automation technologies for distributed generation systems. In *Automation Science and Engineering (CASE)*, 2010 IEEE Conference on, pages 269–274, 2010.
- [11] D. Dolezilek and Brian McDermott. Remote data monitoring and data analysis for substations-a case study in implementation. In *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, 2006. PS '06, pages 496–500, 2006.
- [12] J.A. Bright and Wei Jen Lee. Integrated monitoring, protection, and control

systems for industrial and commercial power systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 36(1):11–15, 2000.

[13] F. Salvadori, M. De Campos, P.S. Sausen, R.F. De Camargo, C. Gehrke, C. Rech, M.A. Spohn, and A.C. Oliveira. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 58(9):3104–3111, 2009.

[14] F. Salvadori, C.S. Gehrke, A.C. de Oliveira, M. de Campos, and P.S. Sausen. Smart grid infrastructure using a hybrid network architecture. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 4(3):1630–1639, 2013.

[15] K. Moslehi and R. Kumar. A reliability perspective of the smart grid. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(1):57–64, 2010.

[16] Qiang Yang, J.A. Barria, and T.C. Green. Communication infrastructures for distributed control of power distribution networks. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 7(2):316–327, 2011.

[17] S. M. Amin, "Smart grid: Overview, issues and opportunities advances and challenges in sensing, modeling, simulation, optimization and control," *European Journal of Control*, vol. 17, no. 5, pp. 547 – 567, 2011. [Online]. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0947358011709761>>.

[18] W. Xu, G. Xu, and H. Yuan, "High performance distributed power quality monitoring ied used in smart grid," in 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Sept 2014, pp. 706–710.

[19] R. J. Real-Calvo, A. Moreno-Muoz, V. Pallares-Lopez, M. J. Gonzalez-Redondo, and J. M. Flores-Arias, "Intelligent electronic device for the control of distributed generation," in 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), Sept 2014, pp. 268–269.

[20] R. M. Bacurau. Medidor de energia inteligente para discriminação de consumo por aparelho através de assinatura de cargas. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2014.

[21] Y. Kabalci, E. Kabalci, "A low cost smart metering system design for smart grid applications". ECAI 2016, International Conference, 8th Edition, pages 1-6, 2016. [Online]. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez15.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7861078>>.

[22] G. Aurilio, D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, V. Cigolotti, G. Graditi. "Low cost combined voltage and current transducer for smart meters", pages 1-6, 2014. [Online]. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez15.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6860987>>.

[23] Tiva™ C Series TM4C1294 Connected LaunchPad Evaluation Kit. [Online]. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spmu365c/spmu365c.pdf>>.

[24] F. Salvadori, C. Gehrke, L. Hartmann, I. Freitas, T. Santos, and T. Texeira. Design and implementation of a Flexible Intelligent Electronic Device for Smart Grid applications. Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE, pages 1-6, 2017.