

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

Dissertação de Mestrado



ALGORITMO PARA AJUSTE
AUTOMÁTICO DE GANHO EM TEMPO
REAL PARA CIRCUITO FLEXÍVEL DE
CONDICIONAMENTO DE SINAL

Tiago Augusto Texeira

João Pessoa-PB, Brasil
Setembro – 2019

ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DE GANHO EM TEMPO REAL PARA CIRCUITO FLEXÍVEL DE CONDICIONAMENTO DE SINAL

Resumo: A crescente necessidade de um controle mais efetivo em sistemas elétricos de potência (geração, transmissão e distribuição) tornou o desenvolvimento de *smart grids* (SG) o principal objeto de estudo para muitos pesquisadores. Neste contexto e procurando a integração e convergência de diferentes sistemas para incorporar uma infraestrutura de uma SG, é proposto e implementado um algoritmo para controle de parâmetros associado a um circuito para condicionamento de sinal flexível aplicado a um dispositivo eletrônico inteligente em aplicações de SG. Então, baseado neste circuito de condicionamento de sinais, foi desenvolvido um dispositivo eletrônico inteligente flexível (DEIF). Este dispositivo difere de outros dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Devices*)(DEI) pois realiza a aquisição de diferentes sinais (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.) com diferentes valores de condicionamento (por exemplo, ganho e *offset*, além disso, com possibilidade de realizar o autocondicionamento por software. O DEIF pode operar, entre outras aplicações, como um medidor inteligente de duas vias, como um controlador dinâmico (local) e/ou como um controlador supervisor, melhorando assim a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens da solução proposta são: baixo custo, versatilidade (mudanças podem ser feitas por software), capacidade de processamento elevada (usa um processador ARM), recursos de comunicação (rede de arquitetura híbrida), fácil integração, interoperabilidade, fácil manutenção, modularidade e escalabilidade. Um protótipo do DEIF é apresentado e sua eficácia, flexibilidade e versatilidade são demonstradas experimentalmente.

Palavras chaves: Smart Grid; Dispositivo Eletrônico Inteligente; Aquisição; Condicionamento; Processamento Digital de Sinais.

ALGORITHM FOR AUTOMATIC COMMISSIONING OF GAIN IN REAL TIME FOR A FLEXIBLE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICE

Abstract: The growing need for more effective control in electrical power systems (generation, transmission and distribution) has made the development of smart grids (SG) the main object of study for many researchers. In this context and looking for the integration and convergence of different systems to construct a SG infrastructure is proposed and implemented an algorithm to control parameters associated with a circuit for flexible signal conditioning applied to an intelligent electronic device in SG applications. Then, based on this signal conditioning circuit, a flexible intelligent electronic device (DEIF) was developed. This device differs from other intelligent electronic devices IEDs as it performs the different signals acquisition (voltage, current, temperature, pressure, etc.) with different conditioning values (e.g. gain and offset), in addition with the possibility of performing self-conditioning by software. The flexible intelligent electronic device can operate, among other applications, as a two-way smart meter, as a dynamic (local) controller and/or as a supervisory controller, thereby improving system efficiency, reliability and safety. Other advantages of the proposed solution are: low cost, versatility (changes can be made by software), high processing capacity (uses an ARM processor), communication capabilities (hybrid architecture network), easy integration, interoperability, easy maintenance, modularity and scalability. A DEIF prototype is presented and its effectiveness, flexibility and versatility are experimentally demonstrated.

Keywords : Smart Grid; Intelligent Electronic Device; Acquisition; Conditioning; Digital Signal Processing.



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

TIAGO AUGUSTO TEXEIRA

**ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DE GANHO
EM TEMPO REAL PARA CIRCUITO FLEXÍVEL DE
CONDICIONAMENTO DE SINAL**

João Pessoa - PB

Agosto - 2019

TIAGO AUGUSTO TEXEIRA

**ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DE GANHO
EM TEMPO REAL PARA CIRCUITO FLEXÍVEL DE
CONDICIONAMENTO DE SINAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Salvadori

Coorientador: Prof. Dr. Lucas V. Hartmann

João Pessoa - PB

Agosto - 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

T355a Texeira, Tiago Augusto.

Algoritmo para ajuste automático de ganho em tempo real
para circuito flexível de condicionamento de sinal /
Tiago Augusto Texeira. - João Pessoa, 2019.
52 f.

Orientação: Fabiano Salvadori.

Coorientação: Lucas Vinícius Hartmann.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Smart Grid. 2. Dispositivo Eletrônico Inteligente.
3. Aquisição. 4. Condicionamento. 5. Processamento
Digital de Sinais. I. Salvadori, Fabiano. II. Hartmann,
Lucas Vinícius. 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 o Trabalho Final de Dissertação

**ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DE GANHO
EM TEMPO REAL PARA CIRCUITO FLEXÍVEL DE
CONDICIONAMENTO DE SINAL**

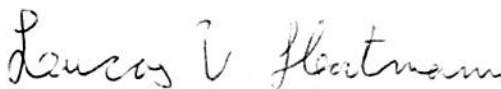
Elaborado por:

TIAGO AUGUSTO TEXEIRA

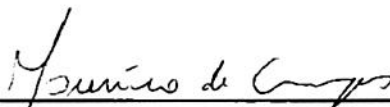
como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.



Prof. Dr. Fabiano Salvadori
UFPB - Orientador



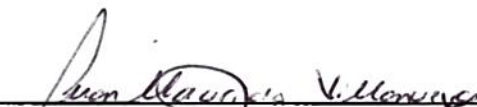
Prof. Dr. Lucas V. Hartmann
UFPB - Coorientador



Prof. Dr. Maurício de Campos
Examinador Externo - UNIJUÍ/RS



Profa. Dra. Camila Seibel Gehrke
Examinadora Externo - UFPB



Prof. Dr. Juan Moises Mauricio
Villanueva
Examinador Interno - UFPB

João Pessoa, 27 de agosto de 2019

À minha família, sem ela eu nada seria.

“Foco é dizer não!”

“Steve Jobs”

RESUMO

A crescente necessidade de um controle mais efetivo em sistemas elétricos de potência (geração, transmissão e distribuição) tornou o desenvolvimento de *smart grids*(SG) o principal objeto de estudo para muitos pesquisadores. Neste contexto e procurando a integração e convergência de diferentes sistemas para incorporar uma infraestrutura de uma SG, é proposto e implementado um algoritmo para controle de parâmetros associado a um circuito para condicionamento de sinal flexível aplicado a um dispositivo eletrônico inteligente em aplicações de SG. Então, baseado neste circuito de condicionamento de sinais, foi desenvolvido um dispositivo eletrônico inteligente flexível(DEIF). Este dispositivo difere de outros dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Devices*)(DEI) pois realiza a aquisição de diferentes sinais (tensão, corrente, temperatura, pressão, etc.) com diferentes valores de condicionamento (por exemplo, ganho e *offset*), além disso, com possibilidade de realizar o autocondicionamento por software. O DEIF pode operar, entre outras aplicações, como um medidor inteligente de duas vias, como um controlador dinâmico (local) e/ou como um controlador supervisor, melhorando assim a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens da solução proposta são: baixo custo, versatilidade (mudanças podem ser feitas por software), capacidade de processamento elevada (usa um processador ARM), recursos de comunicação (rede de arquitetura híbrida), fácil integração, interoperabilidade, fácil manutenção, modularidade e escalabilidade. Um protótipo do DEIF é apresentado e sua eficácia, flexibilidade e versatilidade são demonstradas experimentalmente.

Palavras chaves: Smart Grid; Dispositivo Eletrônico Inteligente; Aquisição; Condicionamento; Processamento Digital de Sinais.

ABSTRACT

The growing need for more effective control in electrical power systems (generation, transmission and distribution) has made the development of smart grids (SG) the main object of study for many researchers. In this context and looking for the integration and convergence of different systems to construct a SG infrastructure is proposed and implemented an algorithm to control parameters associated with a circuit for flexible signal conditioning applied to an intelligent electronic device in SG applications. Then, based on this signal conditioning circuit, a flexible intelligent electronic device (DEIF) was developed. This device differs from other intelligent electronic devices IEDs as it performs the different signals acquisition (voltage, current, temperature, pressure, etc.) with different conditioning values (e.g. gain and offset), in addition with the possibility of performing self-conditioning by software. The flexible intelligent electronic device can operate, among other applications, as a two-way smart meter, as a dynamic (local) controller and/or as a supervisory controller, thereby improving system efficiency, reliability and safety. Other advantages of the proposed solution are: low cost, versatility (changes can be made by software), high processing capacity (uses an ARM processor), communication capabilities (hybrid architecture network), easy integration, interoperability, easy maintenance, modularity and scalability. A DEIF prototype is presented and its effectiveness, flexibility and versatility are experimentally demonstrated.

Keywords: Smart Grid; Intelligent Electronic Device; Acquisition; Conditioning; Digital Signal Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Uma Smart Grid genérica composta por fontes renováveis, armazenamentos, usuários e alguns DEIs.	18
Figura 2.2 – Estrutura básica do DEI com cinco blocos básicos: sensores, condicionamento, processador, comunicação e atuação.	20
Figura 3.1 – TivaC Series TM4C1294.	26
Figura 3.2 – Circuito Flexível para Condicionamento de Sinais.	27
Figura 3.3 – Circuito Flexível para condicionamento de sinais - PCI.	29
Figura 3.4 – Circuito flexível para condicionamento de sinal simplificado.	29
Figura 3.5 – Fluxograma - Algoritmo de determinação do ganho.	32
Figura 3.6 – Interface para auxílio de medições (em inglês).	33
Figura 3.7 – OP5707 da OPAL-RT Technologies.	34
Figura 4.1 – Fluxograma da bancada de testes.	36
Figura 4.2 – Sinais de Entrada - Frequência 1Hz.	38
Figura 4.3 – Sinais de Saída - Frequência 1Hz.	38
Figura 4.4 – Sinais de Entrada - Frequência 4Hz.	38
Figura 4.5 – Sinais de Saída - Frequência 4Hz.	38
Figura 4.6 – Sinais de Entrada - Frequência 13Hz.	38
Figura 4.7 – Sinais de Saída - Frequência 13Hz.	38
Figura 4.8 – Sinais de Entrada - Frequência 46Hz.	39
Figura 4.9 – Sinais de Saída - Frequência 46Hz.	39
Figura 4.10–Sinais de Entrada - Frequência 167Hz.	39
Figura 4.11–Sinais de Saída - Frequência 167Hz.	39
Figura 4.12–Sinais de Entrada - Frequência 599Hz.	39
Figura 4.13–Sinais de Saída - Frequência 599Hz.	39
Figura 4.14–Sinais de Entrada - Frequência 2154Hz.	40
Figura 4.15–Sinais de Saída - Frequência 2154Hz.	40
Figura 4.16–Sinais de Entrada - Frequência 7743Hz.	40
Figura 4.17–Sinais de Saída - Frequência 7743Hz.	40
Figura 4.18–Sinais de Entrada - Frequência 27826Hz.	40
Figura 4.19–Sinais de Saída - Frequência 27826Hz.	40
Figura 4.20–Sinais de Entrada - Frequência 100000Hz.	41
Figura 4.21–Sinais de Saída - Frequência 100000Hz.	41
Figura 4.22–Experimento - OP5707 da OPAL-RT Technologies.	43
Figura 4.23–Diagrama da Rede Elétrica Simulada - OP5707 da OPAL-RT Technologies.	44
Figura 4.24–Modo de operação normal - Rede Elétrica simulada.	44
Figura 4.25–Modo de operação em falta - Rede Elétrica simulada.	45

Figura 4.26–Transição - Modo de operação normal para em falta - Rede Elétrica
simulada. 46

Figura 4.27–Transição - Modo de operação em falta para normal - Rede Elétrica
simulada. 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre parâmetros do ganho <i>software</i> x <i>Ganho DB</i>	28
Tabela 4.1 – Parâmetros de configuração - Interface SCILAB.	37
Tabela 4.2 – Configurações da forma de onda - Tensão (Vpp).	37
Tabela 4.3 – Configurações da forma de onda - Frequência (Hz).	37
Tabela 4.4 – Ganho - Circuito de condicionamento de sinais em dB.	41
Tabela 4.5 – Tensão de saída média (Vpp) x Forma de onda de referencia (Vpp). . .	42
Tabela 4.6 – Características dos Resultados - Modo de operação normal - Rede Elétrica simulada.	45
Tabela 4.7 – Resultados - Modo de operação em falta - Rede Elétrica simulada. . . .	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1	Introdução	12
1.2	Objetivos	16
1.3	Organização do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Introdução	18
2.2	DEIs na Infraestrutura de Smart Grid	18
2.3	Circuitos de condicionamento de sinais	22
2.4	Conclusão	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Introdução	25
3.2	Descrição do Hardware	25
3.3	Circuito Flexível para Condicionamento de Sinal	26
3.3.1	Modelo Matemático	29
3.4	Algoritmo para determinação automática do ganho	31
3.5	Interface para caracterização SCILAB®	33
3.6	Simulador em tempo real OP5707 - OPAL-RT Technologies®	34
3.7	Conclusão	35
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	36
4.1	Introdução	36
4.2	Resultados obtidos - Osciloscópio digital	36
4.3	Resultados Obtidos - OP5707 OPAL-RT Technologies	42
4.4	Conclusão	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

As *Smart Grids* (SGs) ou "redes inteligentes" são uma infraestrutura de rede de energia elétrica moderna, projetada e desenvolvida para melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança, com integração harmoniosa das fontes de energia renováveis e alternativas, através do controle automatizado e tecnologias modernas de comunicação. Nas SGs, 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) (GUNGOR et al., 2011), (DIETRICH, 2011), (MOSHARI G.R. YOUSEFI; HAGHBIN, 2010). De acordo com Moshari G.R. Yousefi e Haghbin (2010), há uma variedade de pesquisas que mostram que uma participação mais ativa no mercado pelo lado da demanda pode trazer benefícios significativos para todo o mercado. Em particular:

- Redução do custo de energia para os consumidores que alteram seu perfil da demanda em períodos de preços altos para os períodos de preços mais baixos;
- Redução do custo de geração total do sistema, pois esta mudança no perfil da demanda altera reduzindo a demanda global;
- Mesmo os consumidores que não ajustam a sua demanda terão vantagens financeiras se essa redução no custo traduzir-se em uma redução nos preços da energia elétrica;
- Evitam picos de preços ou seja, aumentos muito grandes de preços em períodos curtos de tempo;
- Reduzem a capacidade das empresas geradoras de exercer pressão sobre o mercado.

SGs podem ser definidas de diversas formas, como referência é utilizada a definição da Agência Internacional de Energia/EUA (IEA), que as descreve como uma rede elétrica que utiliza tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade de todas as fontes de geração, atendendo uma variedade de demandas e usuários. Estas redes poderão coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stake-holders* do mercado da eletricidade, a fim de otimizar a utilização e o funcionamento dos ativos no processo, minimizando os custos ambientais e impactos, mantendo a confiabilidade, resiliência e estabilidade do sistema (IEA, 2015).

O conceito de SG foi empregado pela primeira vez em 2005 por Amin e Wollenberg (2005), a fim de propor soluções para os problemas de fornecimento de eletricidade aplicando os conceitos de *self-healing*. No entanto, não existe um conceito formalizado e único para

definir SG, mas existem várias proposições para o conceito que convergem para um fator comum: o sistema elétrico de potência convencional deve estar associado ao uso de tecnologias da informação e comunicações digitais. As SGs mudaram o paradigma de (i) fluxo de energia unidirecional para bidirecional; (ii) integração de redes de comunicação; e (iii) também incorporaram inteligência às estruturas de energia a partir de sensores e medidores inteligentes. As SGs oferecem benefícios como: alta eficiência, segurança e confiabilidade dos controles automatizados, combinados com tecnologias de distribuição (por exemplo, sistema de geração e armazenamento distribuído) *versus* fluxo de informações.

Com a evolução da tecnologia, as possibilidades de gerenciamento e controle de equipamentos e cargas também evoluíram. Anteriormente, estavam prontos para operar em horários, monitorar determinados parâmetros ou comunicar informações para controladores (equipamentos ou pessoas). Agora, podem empregar métodos ou maneiras de gerenciar o consumo de eletricidade, fornecer análises de maior complexidade ou realizar ações com base em padrões definidos. À medida que a tecnologia evoluiu, a possibilidade de conectar recursos cada vez mais distribuídos (como geradores distribuídos, carros elétricos e sistemas de armazenamento por baterias) ao sistema de energia tornou-se possível. Os sistemas de comunicações e informação passaram a permitir um sistema de energia moderno e mais inteligente. Assim, uma abordagem de SG integrada e totalmente automatizada pode permitir opções produtivas tanto para operadores de serviços públicos como para clientes, para melhorar a confiabilidade, a utilização de ativos e a eficiência do sistema de energia, de maneira segura (IEEE, 2011).

Usuários de energia elétrica, sejam industriais, residenciais ou comerciais, estão se conscientizando rapidamente das vantagens dos sistemas de monitoramento e controle eletrônico, capazes de gerar benefícios tangíveis e de significativo retorno financeiro sobre o investimento. A construção de SG envolve a transformação positiva das redes elétricas tradicionais em um sistema com uma nova concepção tecnológica, adicionando sensores inteligentes, sistemas de informação, medidores inteligentes e redes de comunicação. Toda esta informação estará e deverá ser obtida na rede. Portanto, para a implantação de SG existe a necessidade de instrumentalização do sistema elétrico e a partir desta instrumentalização implantar SG (GEHRKE et al., 2009). 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 (MCDERMOTT; DOLEZILEK, 2006).

A fim de possibilitar a coordenação entre as concessionárias e pequenos fornecedores, e entre diferentes dispositivos em residências e prédios inteligentes, o sistema de monitoramento adequado e a instrumentalização da rede de energia elétrica devem

ser implementados e integrados ao sistema elétrico existente (MCBEE; SIMOES, 2012; IEEE, 2011). Há no meio científico um crescente interesse na aplicação de tecnologias para proteger os sistemas de controle e supervisão. Atualmente, dispositivo eletrônico inteligentes (DEIs) e processadores de sinais robustos aplicados a comunicação de dados possibilitam o processamento de uma grande quantidade de dados. Além disso, esforços de integração vêm sendo realizados pela maioria dos fornecedores que antes estavam focados em fornecer dados de acesso e agora buscam algo mais em termos de aquisição de dados, supervisão e controle (YANG; BARRIA; GREEN, 2011), (MOGHE; LAMBERT; DIVAN, 2012).

Sistemas embarcados podem ser encontrados em toda parte na vida diária, a partir de produtos elétricos e eletrodomésticos, para mecanismo de compensação não linear, sistemas complexos de automação e sistemas de controle adaptativo (KENNEDY; RICKEY, 1989), (MALINOWSKI; YU, 2011). De acordo com Bright e Lee (2000) e Salvadori et al. (2009), sistemas embarcados podem ser desenvolvidos para desempenhar qualquer combinação das tarefas listadas a seguir:

- Monitoramento e proteção do sistema.
- Desempenho de atividades de controle central.
- Gerenciamento dos custos de energia.
- Manutenção do nível de tensão.
- Controle do fator 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 alternativas em termos de *hardware* e *software* para aplicação em sistemas integrados para os mais variados cenários. (BRIGHT; LEE, 2000), (SALVADORI et al., 2009), (MOSLEHI; KUMAR, 2010) e (AKYILDIZ et al., 2002). No entanto, essas 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 são geralmente mais caras do que o custo dos próprios sensores. Além disso, estes sistemas são de difícil ampliação, devido principalmente à própria comunicação com fio e à falta de flexibilidade do *software* proprietário (ANATORY et al., 2008), (ZHUO; JIULING; WU, 1997).

Para que seja possível a aquisição de dados de maneira confiável, é imprescindível que os sinais medidos sejam condicionados de maneira a otimizar a sua digitalização. Várias são as etapas anteriores a digitalização e processamento de sinais por *softwares*. Num primeiro estágio a grandeza é medida por sensores e convertida em sinais elétricos, para posterior amostragem e discretização. Sinais estes, que em maioria dos casos devem ser condicionados antes de digitalizados, devido à presença de ruídos, incompatibilidade de amplitudes, não-linearidades, presença de nível DC, etc. Neste sentido é necessário o condicionamento dos sinais elétricos fazendo uso de um sistema embarcado específico para tal tarefa.

Em Jianqiang Wang e Jiuchun Jiang (2009) os autores discutem vários circuitos de condicionamento de sinais de amostragem para inversores fotovoltaicos com conexão à rede. Neste tipo de estrutura, o inversor é o circuito principal e é isolado com as peças de controle para segurança e anti-interferência; portanto, todas as tensões e correntes são amostradas por sensores. Considerando a velocidade de processamento do DSP e o período de comutação do inversor, quase todos os pré-condicionamentos de sinal são manipulados pelo hardware antes de entrar no DSP. Os amplificadores e comparadores de operação implementam todos os condicionamentos de sinal de amostragem. Os resultados do teste verificam se esses métodos de condicionamento dos sinais de amostragem são válidos e atendem aos requisitos de controle do DSP.

De outra parte, em Chabchoub et al. (2017) os autores apresentam a modelagem comportamental de um circuito de condicionamento no domínio do tempo para sensor resistivo. A arquitetura do circuito proposto é baseada em um circuito conversor linear-voltagem-tempo altamente linear, usando osciladores bloqueados por injeção como geradores de atraso. Esta abordagem de design, baseada em modelagem comportamental, também é apresentada neste trabalho. Esta metodologia facilita o design em termos de tempo e complexidade. O circuito foi implementado usando silício parcialmente empobrecido na tecnologia do isolador.

Já em Isogai et al. (2017) os autores propuseram um módulo de caracterização analógica para emular vários componentes analógicos como tecnologias essenciais para o sistema reconfigurável analógico. Este módulo converte um sinal de entrada analógica em digital (ADC), utilizando tecnologias de processamento de sinal digital para caracterizar o sinal e emití-lo convertido (DAC). Ao contrário de um dispositivo digital típico, o módulo é usado como um componente pseudo-analógico. No artigo em questão, os autores verificaram a viabilidade do projeto com relação às características operacionais em corrente contínua como resistência.

E completando a análise do estado da arte, em Tirupathi e Kar (2017) apresentam o projeto e a análise de um circuito de interface para um sensor capacitivo, que detecta o sinal físico como uma alteração na capacitância e fornece saída de tensão. Os autores realizaram

a análise teórica da modulação e demodulação síncrona e mostraram como a técnica foi utilizada para remover o ruído de baixa frequência e o desvio de tensão introduzido pelo amplificador operacional. O circuito de condicionamento de sinal compreende um buffer, amplificador, desmodulador e filtro passa-baixas. Foi realizada uma análise detalhada do circuito, considerando a variação senoidal da mudança de capacitância. Os autores analisaram duas topologias de circuito demodulador e seus méritos e deméritos foram destacados.

Constata-se, portanto, que a concepção e aplicação de circuitos para condicionamento de sinais é objeto de estudo de diversos pesquisadores, que ao integrar estes circuitos com microcontroladores ou microprocessadores podem propor dispositivos com diferentes características, criando um circuito embarcado de finalidade específica. Além de propor um *hardware* robusto e confiável é necessário que o *software* associado a esses dispositivos seja capaz de identificar padrões e alterar seus parâmetros de configuração de acordo com as condições que foi imposto, dando ao dispositivo desenvolvido maior flexibilidade e confiabilidade. Neste contexto o presente trabalho trata do desenvolvimento e validação do funcionamento de um algoritmo de ajuste automático de ganho em tempo real, via software, utilizando em conjunto com um circuito de condicionamento de sinais desenvolvido para aplicações em SG.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar o funcionamento de um algoritmo de ajuste automático de ganho em tempo real para um circuito flexível de condicionamento de sinais com foco em aplicações para redes elétricas inteligentes.

Tendo isso em vista, o trabalho foi desenvolvido considerando os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma interface no SCILAB para visualização e configuração dos parâmetros, bem como, a configuração do cenário de testes;
- Desenvolver um algoritmo para controle automático por *software* dos parâmetros do circuito de condicionamento de sinal;
- Realizar medições em laboratório visando determinar o comportamento do sistema proposto quando submetido à variações de tensão/frequência;
- Realizar medições fazendo uso do simulador em tempo real OPAL objetivando determinar o comportamento do circuito quando submetido a condições próximas do real;
- Tratar os resultados de forma a identificar as limitações do sistema de condicionamento de sinais proposto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo um refere-se a esta Introdução Geral, que apresenta as motivações para o desenvolvimento deste trabalho, além de descrever seus objetivos geral e específicos. O capítulo dois trata da Fundamentação Teórica, que fornece uma base dos conceitos abordados no trabalho. São apresentadas as funcionalidades de DEIs em SGs, bem como o contexto da utilização do algoritmo utilizado para condicionamento de sinais. No capítulo três estão indicados a descrição, a caracterização e o dimensionamento do sistema proposto, bem como os módulos secundários que compõe o mesmo. No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim, no capítulo cinco são apresentadas as conclusões deste trabalho e são indicadas as possibilidades de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

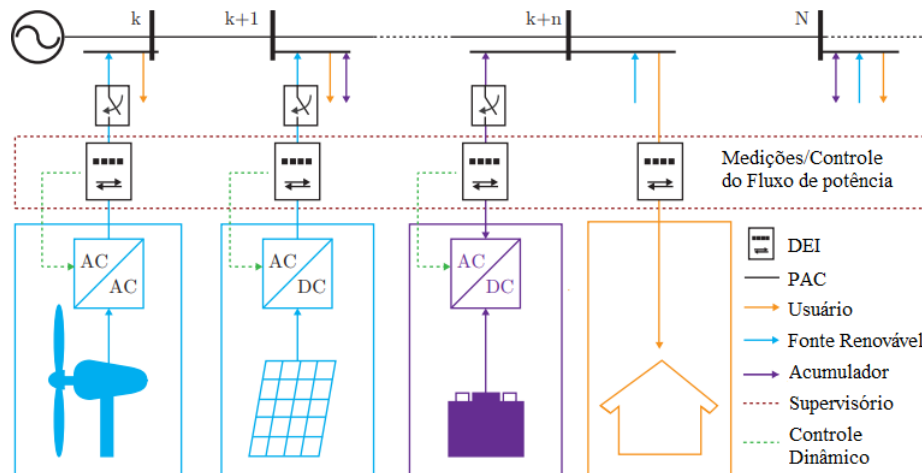
2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma abordagem teórica e uma contextualização do trabalho em relação à bibliografia existente. Inicialmente é descrito o uso de DEIs em SGs, dando ênfase ao seu papel como elemento de instrumentalização das redes elétricas, bem como o uso de circuitos embarcados para aquisição e condicionamento de sinais elétricos.

2.2 DEIS NA INFRAESTRUTURA DE SMART GRID

Uma estrutura SG genérica, representada utilizando diagrama de blocos, é ilustrada na Figura 2.1. Esta é composta por uma fonte de energia, vários pontos de acoplamento comum (PAC) e unidades inteligentes. O PAC conecta essas unidades ao sistema elétrico. As unidades podem ser constituídas por 1) usuários finais e/ou partes interessadas; ou, 2) geração distribuída e/ou armazenamento de energia. A unidade de GD pode ser composta por qualquer fonte de energia renovável, como solar, eólica, biomassa, enquanto o armazenamento de energia pode ser usado apenas como suporte de emergência ou como nivelamento de energia (GEHRKE; LIMA; OLIVEIRA, 2015).

Figura 2.1 – Uma Smart Grid genérica composta por fontes renováveis, armazenamentos, usuários e alguns DEIs.



Fonte: GEHRKE; LIMA; OLIVEIRA, 2015 - Adaptado.

A fonte de energia, observando pelo lado do alimentador, tem a *microgrid* como um PAC. O gerenciamento do utilitário de energia é baseado em um controlador supervisor (CS), sendo este responsável por controlar o fluxo de potência ativo ou reativo. Para fornecer isso, o CS recebe dados de um DEI via uma rede de arquitetura híbrida (*hybrid network Architecture*) (HNA). O controle da GD é implementado pelo controle dinâmico dos inversores. Estes conectam a energia renovável ao sistema elétrico. A estratégia de

controle do fluxo de potência tem seu gerenciamento baseado em um CS. O controle tanto da GD quanto do armazenamento de energia é realizado por conversores estáticos, integrando a fonte de energia renovável e os acumuladores (por exemplo, banco de baterias) à rede. O CS gerencia a energia ativa ou reativa com base em eventos discretos, como distúrbios de tensão. Por sua vez, o CS pode receber dados de um DEI através de uma rede de comunicação híbrida.

Cada DEI é responsável pela aquisição e processamento dos dados, requisitos de medição, controle dinâmico e CS, no entanto, podem executar o controle do inversor e estabelecer comunicação com outros dispositivos. Podendo ser utilizado como elemento principal ou operar como CS, portanto, um processador de alto desempenho é necessário. Como o DEI permite coletar um conjunto de dados da rede elétrica, esses dados podem ser processados localmente para decisão imediata e em seguida enviados para o centro de controle remoto, ou podem ser transmitidos para o centros de controle para análise e tomada de decisão (AMIN, 2011).

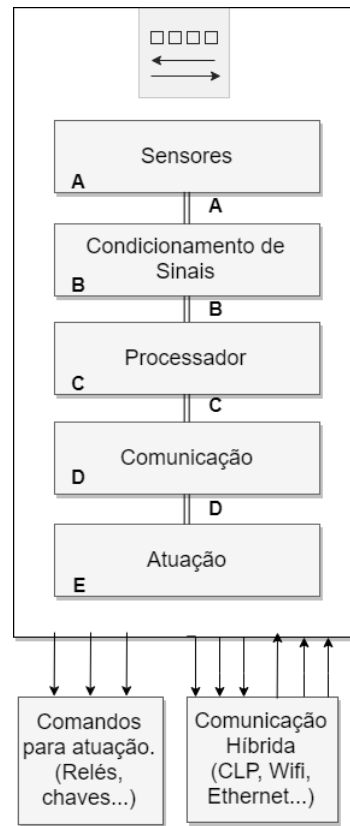
DEIs estão intimamente associados às tecnologias SG. Considerando que alguns dos aspectos mais importantes em SG são a intercomunicação, interoperabilidade e inteligência, o processamento local dos dados coletados fornecidos pelos DEIs abre a possibilidade para o desenvolvimento de ferramentas de precificação em tempo real, demanda de resposta à programas e outras aplicações voltadas para o cliente.

Com mais dados e um maior nível de detalhe, disponíveis em todo o sistema de distribuição, é possível que um nível mais alto de automação seja introduzido no gerenciamento diário da rede. Distúrbios em potencial podem ser detectados mais rapidamente e podem ser resolvidos sem a intervenção do operador humano. Segundo Salvadori et al. (2013), dispositivos inteligentes podem ser configurados para executar qualquer combinação das tarefas:

- monitoramento do sistema;
- proteção do sistema;
- atividades de controle de supervisão;
- controle de nível de tensão;
- controle do fator de potência;
- gerenciamento de fluxo de potência.

A estrutura básica de um DEI é ilustrada na Figura 2.2, na qual os blocos A, B, C, D, E representam sensores, condicionamento, processador, comunicação e atuação, respectivamente.

Figura 2.2 – Estrutura básica do DEI com cinco blocos básicos: sensores, condicionamento, processador, comunicação e atuação.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

- A - Sensoriamento e Transdução - responsável por detectar ou medir a tensão, corrente, calor, luz, som, movimento, etc., e convertê-lo em sinal elétrico;
- B - Circuito de condicionamento de sinal - responsável por ajustar os sinais adquiridos pelo módulo de sensoriamento e de transdução;
- C - Processador - responsável pelo processamento e transmissão dos dados adquiridos;
- D - Comunicação - responsável pela comunicação com diferentes unidades e pela interoperabilidade utilizando diferentes meios de comunicação (redes com arquitetura híbrida);
- E - Atuação - responsável pelo comando de relés, conversores ou outros.

O projeto de um DEI para obtenção de informações confiáveis e em tempo real tornou-se 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 GD e o GLD.

Muitos pesquisadores apresentaram DEIs para as mais diversas funções. Existem soluções em termos de i) aplicações específicas (por exemplo, sistemas embarcados); ii) hardware e software (por exemplo, diferentes processadores ou técnicas de controle); iii) condicionamento para diferentes sinais, como temperatura, pressão, tensão, corrente, considerando vários cenários para aplicação de DEIs (SALVADORI et al., 2009; GUNGOR et al., 2011).

Um DEI baseado em uma estrutura modular foi apresentado em Zavoda et al. (2013). Segundo os autores, a estrutura é compatível com todos os principais equipamentos de distribuição, satisfazendo os padrões internacionais, por exemplo, matriz de portas programáveis em campo (*field programmable gate array*) (FPGA), dispositivo lógico complexo programável (*complex programmable logic device*) (CPLD), processador digital de sinais (*digital signal processing*) (DSP), etc., para acelerar o processamento de dados. O documento destaca as características positivas do dispositivo, no entanto, ele não possui informações sobre *hardware*, *software* e custo.

Para aplicações de monitoramento de qualidade da energia para SG, um DEI foi apresentado em Xu, Xu e Yuan (2014). Segundo os autores, o DEI apresentou estrutura simples, boa compatibilidade e alta capacidade de coleta e transmissão de dados, sendo composto por três núcleos: PowerPC de alto desempenho, DSP e FPGA, como também suportava amostragem analógica de alta velocidade. No entanto, o uso de três núcleos tornou o sistema caro e complexo para controle.

Em Calvo et al. (2016), os autores propuseram um DEI multifuncional para operar na interface de interconexão elétrica, projetado tanto para ser integrado em equipamentos de última geração quanto para conectar equipamentos convencionais e expandir suas características. Já em Chakraborty, Mondal e Mondal (2017), os autores empregaram os DEIs apenas para monitoramento de temperatura. Segundo eles, trata-se de uma solução eficiente para gerenciamento de energia em edifícios com um grande número de dispositivos termostáticos (condicionadores de ar) que mantêm a temperatura de diferentes zonas térmicas em um intervalo pré-definido.

Em Salvadori et al. (2016), os autores propuseram e implementaram um DEI baseado na plataforma TivaC¹ para aplicações gerenciamento do fluxo de potência em SGs. Este DEI apresenta processamento de alta capacidade, recursos de comunicação híbrida, portabilidade/versatilidade, baixo custo, fácil integração (interoperabilidade) e manutenção. O DEI só foi capaz de medir e monitorar a tensão (usando transformadores) e corrente (usando o sensor LA-25NP²). Para o processamento, o DEI utiliza uma plataforma TM4C123GH6PM baseada em microcontrolador TivaC - EK-TM4C123GXL-M4F.

O dispositivo eletrônico inteligente flexível (DEIF) pode operar como um medidor

¹ TivaC é uma TM da Texas Instruments

² LAH-25NP é uma TM da LEM International SA - Switzerland

inteligente de duas vias, como um controlador dinâmico (ou seja, controlador local) ou como um controlador de supervisão, melhorando a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Outras vantagens do DEIF proposto são: baixo custo, versatilidade (mudanças podem ser feitas pelo *software*), alta capacidade de processamento (usando um processador ARM), recursos de comunicação, como a HNA, fácil integração, interoperabilidade, fácil manutenção, modularidade e escalabilidade.

Nos DEIs utilizados como referência temos a presença de circuitos de condicionamento de sinais, compondo um estágio essencial em sistemas de medição, sendo amplamente utilizados em aplicações de complexidade distintas. Neste trabalho será dada ênfase nestes circuitos e na sua configuração, os quais tem o objetivo de adequar ou realizar a interface dos sinais obtidos com sistemas de tratamento de dados ou supervisórios e devem operar em concordância com a grandeza que esta sendo medida, dando respostas rápidas e confiáveis.

2.3 CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Grande parte das aplicações fazem uso de sinais analógicos provenientes de sensores, em sua maioria esses sinais apresentam níveis de tensão inadequados a conversão analógico-digital, não-linearidades, ruídos, componentes harmônicos, entre outros distúrbios, sendo necessária a realização de um tratamento prévio antes de serem analisados e/ou digitalizados. Com base nessa afirmação o objetivo de circuitos de condicionamento de sinais é adequar sinais à aquisição e processamento de informações, tendo como papel principal realizar o intermédio entre os sensores e os sistemas de controle ou aquisição de dados. Segundo NATIONAL INSTRUMENTS (2015), os seguintes fatores devem ser levados em consideração no projeto de um circuito de condicionamento de sinais:

- Integração e conectividade: Deve ter facilidade na integração com restante do sistema, com praticidade e eficiência na conectividade. Para isto, é necessário buscar o entendimento da interação entre os componentes da cadeia de medição e determinar a melhor forma de integração;
- Modularidade: Deve-se buscar a modularidade para que seja possível a fácil modificação e utilização em diversas situações, dando flexibilidade e possibilidade de expansão;
- Segurança e isolamento: Deve-se prezar pela segurança dos equipamentos e usuários, adotando sempre fatores de segurança adequados para o isolamento entre níveis;
- Largura de banda: Deve-se projetar o sistema com largura de banda compatível e suficiente para as taxas de amostragem e transferência de dados, levando em consideração a resposta dos sensores e as possíveis futuras implementações;

- Software: Deve-se utilizar plataformas prontas e específicas para este tipo de aplicação, minimizando custos de desenvolvimento e caracterização. Deve-se também buscar a flexibilidade na alteração de parâmetros de configuração por *software*, dando maiores possibilidades de utilização para o circuito proposto;
- Configuração, instalação e manutenção: Deve ser de fácil instalação, operação e de manutenções pouco complexas. Deve-se documentar detalhadamente e organizada-mente todo o sistema, desde funcionamento a procedimentos de testes, operação e reparos;
- Calibração: Devem-se realizar calibrações periódicas em todo o sistema fazendo uso de sistemas de precisão consolidados no mercado.

Tendo como base os conceitos apresentados observa-se na literatura existente o crescente interesse sobre o desenvolvimento de circuitos de condicionamento de sinais que apresentem as características listadas. Em Salvadori et al. (2017) os autores propuseram um estudo preliminar de um novo circuito de condicionamento de sinal que permitisse o uso de um DEI para aquisição e controle de uma ampla gama de sinais em diferentes frequências e amplitudes, ajustando o circuito de condicionamento por *software*. Para uma resolução máxima, um circuito de condicionamento de sinal flexível programável por *software*, deve garantir a faixa de medição completa (ou seja, aquisição ótima). Assim, como ilustrado na Figura 2.2, o circuito de condicionamento de sinal, bloco B, acoplado a um processador, bloco C e sensores selecionados (o usuário pode definir o tipo de dados de aquisição e sensor), bloco A, compõe o DEIF, que pode realizar a aquisição de diferentes parâmetros (tensão, corrente, temperatura, etc.) restritos a uma faixa de 30 V de pico-a-pico.

Em Diaz-Diaz e Cervantes (2013) é proposto um circuito de condicionamento de sinais com possibilidade de configuração por *hardware* de acordo com as necessidades do usuário. O circuito proposto é designado a aplicações de eletrônica de potência e sua configuração é realizada através da ativação e desativação física de módulos presentes no circuito, os elementos programáveis são modificados fazendo uso de *jumpers* pré-dispostos. O mesmo é composto por cinco estágios: i)Atenuação; ii)Isolação; iii)Filtro *Anti-Aliasing*; iv)*Offset* e v) Limitadores de tensão.

Em Y C et al. (2005) os autores propuseram um circuito de condicionamento de sinais genérico, capaz de realizar a adequação do ganho dos sinais de saída e o ajuste do seu nível DC. O objetivo do trabalho é propor uma solução capaz de identificar uma configuração otimizada em relação ao uso de componentes, fornecendo perdas mínimas em resolução do sinal de saída. A arquitetura proposta é baseada em amplificadores operacionais e microcontroladores que de acordo com a configuração selecionada modificam a amplitude e o nível DC do sinal de saída.

Em Tirupathi e Kar (2017) é proposto um circuito de condicionamento de sinais com a finalidade de realizar a adequação de sinais provenientes de sensores capacitivos genéricos como acelerômetros, sensores de proximidade, etc. Este realiza a modularização dos sinais de entrada fazendo uso de ondas quadradas, o sinal modularizado é então amplificado, demodulado e filtrado para assim obter o sinal de saída. O circuito proposto não apresenta capacidade de reconfiguração, sendo a proposta do autor uma implementação específica para cada projeto, com características simplificadas e de menor área comparada a circuitos comerciais.

Neste sentido, observou-se que a literatura atual trata o desenvolvimento de circuitos de condicionamento de sinais como sistemas que necessitam de melhorias e soluções inovadoras. No presente trabalho é proposto um circuito de condicionamento de sinais flexível, configurável por *software*, em conjunto com um algoritmo para ajuste automático de ganho. O sistema proposto utiliza um microcontrolador baseado na tecnologia ARM com alta capacidade de processamento e com capacidade de tomada de decisão quando identificada a possibilidade de melhoria da resolução do sinal de saída, controlada através do ganho atribuído ao sinal, sendo descrito em detalhes no capítulo posterior.

2.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi abordada a fundamentação teórica acerca dos temas de maior relevância deste trabalho. Tais temas permitem adquirir o embasamento necessário para o entendimento do sistema proposto, bem como situá-lo na bibliografia existente. Foram apresentadas as características, funcionalidades e aplicações no contexto atual dos DEI, dos circuitos de condicionamento de sinais e suas formas de funcionamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são detalhados os componentes utilizados para a elaboração do algoritmo proposto. É realizada a descrição do *hardware*, plataforma TIVA, do circuito de condicionamento de sinais, do *software* desenvolvido para controle e auxílio em medições, do algoritmo para controle automático do ganho e do equipamento para auxílio em simulações OPAL-RT.

A arquitetura DSP foi escolhida para fornecer alta capacidade de processamento: para coleta e troca de dados em tempo real; amostragem analógica; acelerar o processamento de dados e a conversão analógica para digital. Além disso, o DSP deve ser capaz de executar algoritmos de detecção e processar os parâmetros adquiridos. Para o desenvolvimento de um DEI com um alto nível de funcionalidade, é necessária a utilização de vários dispositivos de processamento específicos em paralelo para evitar o surgimento de restrições ao sistema.

3.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE

Para o projeto de um dispositivo eletrônico inteligente flexível (DEIF) dois aspectos importantes devem ser levados em consideração: (a) sensoramento, condicionamento e filtragem do sinal; e (b) discretização, processamento e transmissão dos sinais.

No primeiro estágio, o sensor de sinal, os dados a serem coletados são definidos e em seguida o sinal é atenuado e filtrado. A amplitude dos sinais condicionados deve ser restrita aos níveis de tensão de entrada do conversor analógico-digital (CAD). Além disso, o sinal passa por um filtro passa-baixa (FPB), operando como filtro *anti-aliasing*.

No segundo estágio, a discretização do sinal, o sinal adquirido é discretizado utilizando um CAD, permitindo processar os dados para calcular as características do sistema elétrico. Após realizada a digitalização e o processamento do sinal localmente, o mesmo pode ser usado para tomadas de decisão imediata ou para geração de registros para posterior processamento e análise.

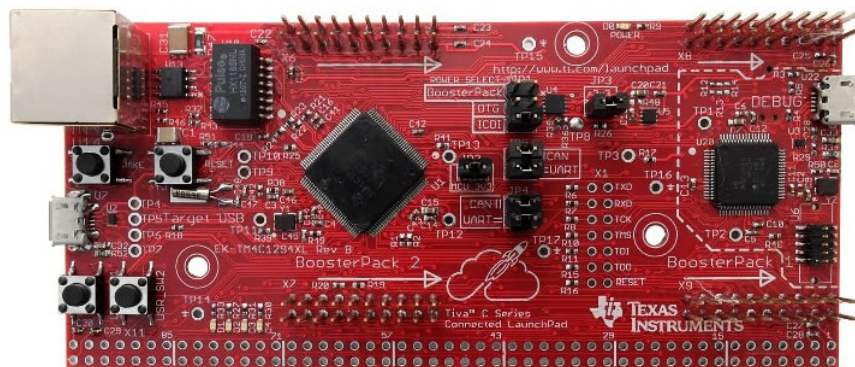
Para fornecer todas as características desejadas, o hardware, processador, é proposto na forma descrita a seguir. A plataforma de desenvolvimento utilizada é o Launchpad conectado da série TivaC (EK-TM4C1294XL). Trata-se de uma plataforma de desenvolvimento de baixo custo para microcontroladores embarcados. A plataforma é baseada no microcontrolador TM4C1294NCPDTI, que consiste na arquitetura ARM Cortex M4F com instruções DSP dedicadas. Além disso, a TivaC possui 1MB FLASH, 256KB de RAM e 6KB EEPROM.

Vários periféricos estão disponíveis na TivaC, como um controlador USB 2.0

OTG, um módulo de hibernação de baixa potência, um CAD (20 canais, 12 bits, 2 M amostras/s), um sensor de temperatura, 8 saídas modulação por largura de pulso (*pulse width modulation*) (PWM) e várias portas de comunicação serial (2 CAN, 4 SPI, 8 UART, 10 I2C). Tais periféricos fazem deste um dispositivo capaz para realizar a interface do sensor, quando combinados com as tabelas PHY e Ethernet Advanced Encryption Standard (AES) baseadas no chip 100-Mb/s fornecem base para segurança e confiabilidade para desenvolvimento de um DEI.

A placa de desenvolvimento é apresentada na Figura 3.1, aceita alimentação de 5 V a partir de múltiplas fontes (dispositivo USB, depurador USB ou externo) e inclui um depurador *on-board* para auxiliar no desenvolvimento. É necessário que as entradas analógicas do microcontrolador variem entre 0 V e 3,3 V, o que não está disponível como sinal de saída da maioria dos dispositivos sensores ou transdutores comerciais. Além disso, o *aliasing* é uma possível fonte de erros, dada a natureza amostrada das medições digitais.

Figura 3.1 – TivaC Series TM4C1294.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2019)

3.3 CIRCUITO FLEXÍVEL PARA CONDICIONAMENTO DE SINAL

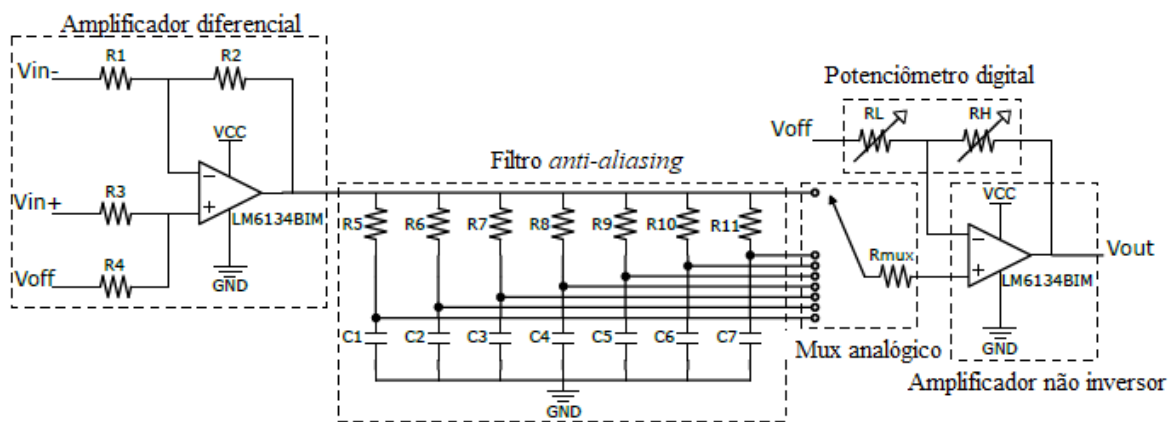
Para amenizar os impactos de agentes externos e para um melhor condicionamento do sinal a ser analisado é necessário o uso de circuitos que realizem a adequação dos sinais provenientes de sensores ou transdutores. Para tal propõe-se um circuito de parâmetros programáveis por *software* capaz de adequar sinais em diversos cenários.

É provável que os ambientes contenham fontes de ruído elétrico que podem degradar a qualidade do sinal medido, especialmente ao usar cabos longos. Uma solução possível para atenuar este problema é a medição diferencial, tal como empregada em muitos padrões de comunicação digital (RS485, RS422, USB, CAN, Ethernet, ...). O primeiro estágio do circuito é então o amplificador diferencial construído de R1-R4 e do amplificador operacional (*operational amplifier*) (opamp) mais à esquerda. O ganho é definido para atenuação de 1:10, permitindo a medição segura de variações de tensão de entrada até 30

V (pico-a-pico).

O circuito de condicionamento de sinais caracteriza-se por apresentar 32 variações de ganho, 256 possibilidades de tensão de offset (0 - 3,3 V) e 8 frequências de corte para o filtro (passa tudo, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz e 100 kHz), sendo estas configurações programáveis fazendo uso de uma comunicação serial. Para preparar os sinais analógicos medidos para conversão digital, o circuito mostrado na Figura 3.2 é proposto. Sendo composto por quatro seções principais: atenuação de diferença, filtro *anti-aliasing*, amplificador de ganho e gerador de *offset*.

Figura 3.2 – Circuito Flexível para Condicionamento de Sinais.



Fonte: (SANTOS, 2018) - Adaptado

Neste trabalho será dada ênfase às possíveis configurações de ganho do mesmo, a Tabela 3.1 ilustra a correlação entre os possíveis valores configurados em *software*, o ganho real em dB e seu respectivo valor em vezes.

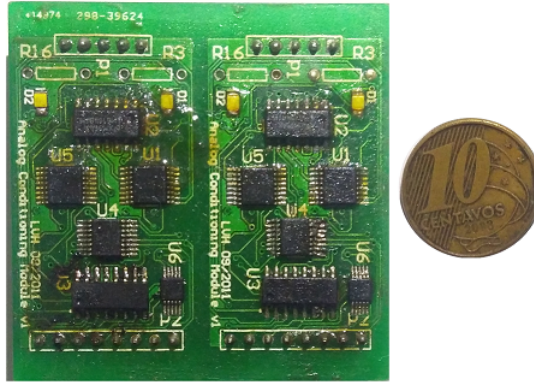
Tabela 3.1 – Relação entre parâmetros do ganho *software* x *Ganho DB*

Valor <i>software</i>	Ganho dB	Ganho em Vezes
0	-20	0.100
1	-18	0.126
2	-16	0.158
3	-14	0.200
4	-12	0.251
5	-10	0.316
6	-8	0.398
7	-6	0.501
8	-4	0.631
9	-2	0.794
10	0	1.00
11	2	1.26
12	4	1.58
13	6	2.00
14	8	2.51
15	10	3.16
16	12	3.98
17	14	5.01
18	16	6.31
19	18	7.94
20	20	10.00
21	22	12.60
22	24	15.80
23	26	20.00
24	28	25.10
25	30	31.60
26	32	39.80
27	34	50.10
28	36	63.10
29	38	79.40
30	40	100.00
31	42	126.00

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A PCI (Placa de Circuito Impresso) proposta é composta por um par de módulos com quatro canais, operando cada canal de forma independente. O circuito é ilustrado na Figura 3.3, em uma placa de circuito impresso quadrada de 50 mm de lado.

Figura 3.3 – Circuito Flexível para condicionamento de sinais - PCI.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

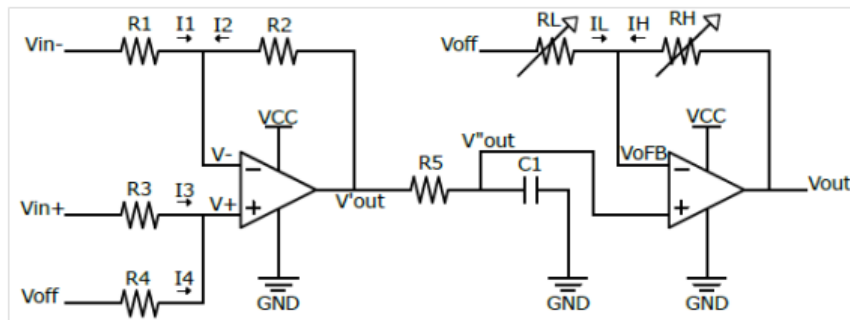
3.3.1 Modelo Matemático

O modelo matemático, para o circuito de condicionamento de sinais, foi desenvolvido a partir da análise da Figura 3.2. Para determinar a equação da tensão de saída (V_{out}), duas condições são impostas:

1. Impedância de entrada infinita. Os amplificadores operacionais foram caracterizados como um amplificador ideal, portanto, na análise matemática, a tensão na entrada não-inversora é igual à tensão na entrada inversora e as correntes nessas duas entradas são zero; e,
2. A soma algébrica das correntes entrando e saindo de um nó é igual a zero (Lei de Kirchhoff).

O circuito completo na Figura 3.2 possui diferentes filtros, com diferentes resistências e capacitâncias, além de um multiplexador analógico. Esses circuitos foram simplificados para um resistor e um capacitor, a fim de modelar o circuito, como mostra Figura 3.4.

Figura 3.4 – Circuito flexível para condicionamento de sinal simplificado.



Fonte: (SANTOS, 2018)

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

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{V_{in}^- - V^-}{R_1} = -\frac{V'_{out} - V^-}{R_2} \quad (3.2)$$

$$V^- = \frac{(R_2 V_{in}^-) + (R_1 V'_{out})}{R_1 + R_2} \quad (3.3)$$

$$I_3 + I_4 = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{V_{in}^+ - V^+}{R_3} = -\frac{V'_{off} - V^+}{R_4} \quad (3.5)$$

$$V^+ = \frac{(R_4 V_{in}^+) + (R_3 V'_{off})}{R_3 + R_4} \quad (3.6)$$

$$V^+ = V^- \quad (3.7)$$

$$\frac{R_4 V_{in}^+ + R_3 V_{off}}{R_3 + R_4} = \frac{R_2 V_{in}^- + R_1 V'_{out}}{R_1 + R_2} \quad (3.8)$$

$$V'_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{(R_4 V_{in}^+) + (R_3 V_{off})}{R_3 + R_4}\right) - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) (V_{in}^-) \quad (3.9)$$

Fazendo $R_1 = R_3 = 1\text{M}\Omega$ e $R_2 = R_4 = 100\text{k}\Omega$ e substituindo na Equação (3.9):

$$V'_{out} = (0.1) (V_{in}^+ - V_{in}^- + V_{off}) \quad (3.10)$$

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

$$V''_{out} = \left(\frac{\frac{1}{sC_1}}{R_5 + \frac{1}{sC_1}}\right) (V'_{out}) = \left(\frac{1}{sR_5C_1 + 1}\right) (V'_{out}) \quad (3.11)$$

$$I_{RL} + I_{RH} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{V_{off} - V_{oFB}}{R_L} = -\frac{(V_{out} - V_{oFB})}{R_H} \quad (3.13)$$

$$V_{oFB} = \frac{R_H V_{off} + R_L V_{out}}{R_L + R_H} \quad (3.14)$$

$$V''_{out} = V_{oFB} \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{1}{sR_5C_1 + 1} \right) (V'_{out}) = \frac{R_H V_{off} + R_L V_{out}}{R_L + R_H} \quad (3.16)$$

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_H}{R_L} \right) \left(\frac{V'_{out}}{sR_5C_1 + 1} \right) - \left(\frac{R_H}{R_L} \right) V_{off} \quad (3.17)$$

Substituindo a Equação 3.10 na Equação 3.17, a tensão de saída (V_{out}) foi obtida.

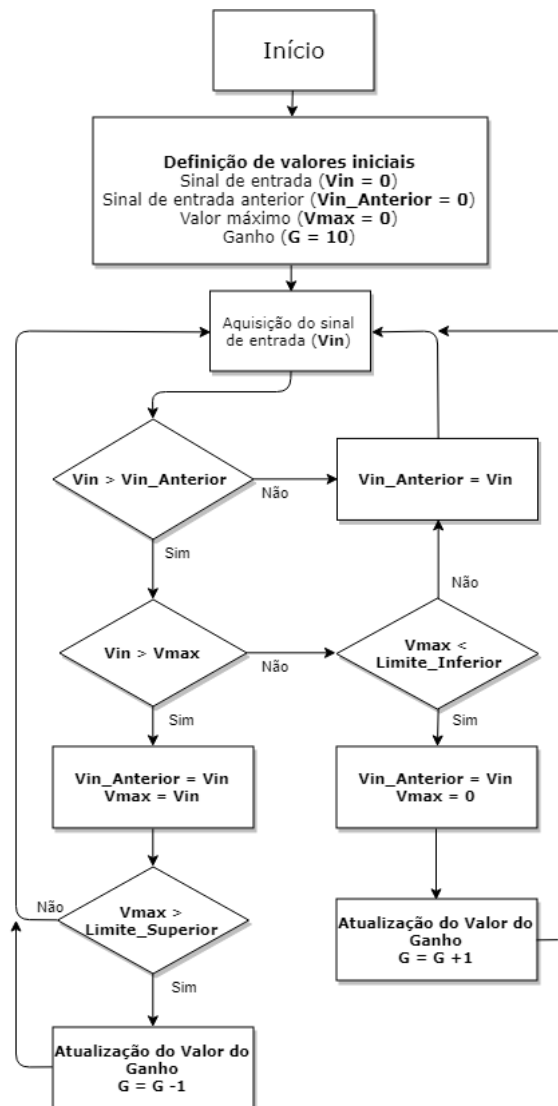
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_H}{R_L} \right) \left(\frac{0.1 (V_{in}^+ - V_{in}^-) + V_{off}}{sR_5C_1 + 1} \right) - \left(\frac{R_H}{R_L} \right) V_{off} \quad (3.18)$$

A tensão de saída (V_{out}) é determinada pela Equação 3.18 e depende da amplitude do sinal de entrada, que é reduzida pelo amplificador diferencial (atenuação de 1:10), e está relacionada aos valores de resistência e capacitância do filtro passa-baixa RC .

3.4 ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DO GANHO

Para determinação do ganho por *software* foi desenvolvido um algoritmo fazendo uso do *software* de desenvolvimento Code Composer Studio V8[®], neste é possível determinar os parâmetros de configuração da plataforma TIVA de maneira otimizada. Para implementação do algoritmo proposto utilizamos o conversor analógico digital com frequência de amostragem igual a 500 kHz para aquisição do sinal de entrada **V_{in}**. Seguindo as diretrizes do fluxograma ilustrado pela Figura 3.5 o algoritmo proposto tem por objetivo adequar o sinal de saída, dado um sinal de entrada qualquer, à um nível de tensão compatível com a conversão analógico-digital realizada pela plataforma TIVA, entre 0-3,3 Volts. Bem como, fornecer parâmetros para identificação de momentos de operação anormais em sistemas elétricos como curto-circuitos, afundamentos de tensão, etc.

Figura 3.5 – Fluxograma - Algoritmo de determinação do ganho.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Seu funcionamento é baseado na identificação do máximo valor medido e do sentido, crescente ou decrescente da forma de onda de entrada. De posse dessas informações é possível avaliar se o valor de pico do sinal de saída ultrapassou o limiar superior ou se está abaixo do limiar inferior, definidos pelo usuário em código, e, por consequência, incrementar ou decrementar o valor da variável Ganho. Esta inicialmente tem valor igual a 10, que segundo a Tabela 4.4 corresponde à um ganho unitário. Após cada modificação do valor do ganho novos parâmetros de configuração são determinados para o circuito de condicionamento de sinais, fazendo com que haja a adaptação do sinal de saída e a indicação de variações no sinal medido.

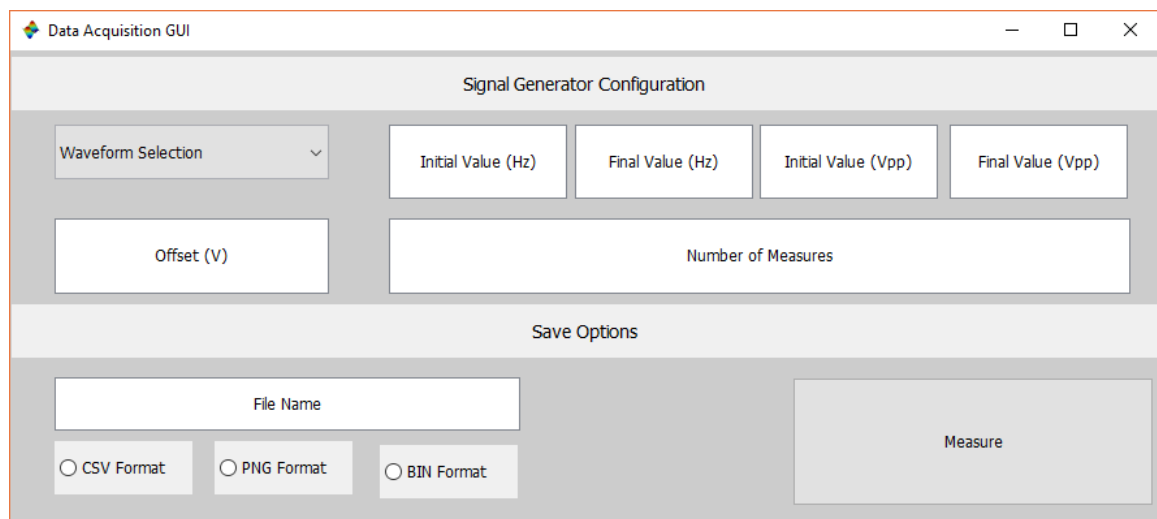
3.5 INTERFACE PARA CARACTERIZAÇÃO SCILAB®

O Scilab é um *software* livre e *open-source* criado para computação numérica, que fornece ferramentas adequadas para aplicações em diversas áreas da engenharia. Sua história teve início em 1990, tendo seu desenvolvimento baseado no MATLAB®, *aprimorada versão de lançamento para controle, simulação, otimização, processamento de sinais, etc.* (ŽAKOVÁ; HUBA, 2017).

A utilização deste *software* está baseada nas características supracitadas, estando diretamente atrelada ao fato de ser não proprietário e de possuir recursos suficientes para elaboração do projeto proposto. Neste trabalho foi utilizada a versão 5.5.2, em conjunto com a versão 3.0 da *toolbox* GUIBUILDER, ferramenta de criação de interfaces gráficas.

Com a ferramenta de criação de interfaces gráficas para usuários, foi desenvolvida uma aplicação para comunicação com osciloscópios digitais, com o objetivo de comandar a geração de sinais de entrada e o processo de captura de resultados. Sendo assim possível automatizar longos ensaios e obter resultados repetitivos com maior agilidade. Na Figura 3.6 está ilustrada a interface desenvolvida. A comunicação com o osciloscópio digital/gerador de sinais é feita fazendo uso de uma conexão *ethernet* local, sendo este um requisito para utilização.

Figura 3.6 – Interface para auxílio de medições (em inglês).



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Neste ambiente gráfico para configuração de medições, é possível determinar qual o tipo de sinal, senoidal, onda quadrada ou rampa, o seu *offset* e o intervalo de frequência e de tensão a ser avaliado. As grandezas determinadas por intervalo terão o mesmo dividido em escala logarítmica de base 10, pelo número de medições a serem realizadas, parâmetro também configurável. Nesta subdivisão da *interface* todos os parâmetros devem ser preenchidos. Na parte inferior tem-se a configuração do nome do arquivo a ser salvo e em quais formatos, após preenchimento e seleção pode-se dar início à medição.

3.6 SIMULADOR EM TEMPO REAL OP5707 - OPAL-RT TECHNOLOGIES®

Para realização de testes com nível de detalhe próximo às condições reais é utilizado o simulador em tempo real OP5707 da OPAL-RT Technologies®. Este possui 2 módulos OP5330 (64 canais de entrada e 64 de saída, analógicas) e 2 módulos OP5353 (64 canais de entrada e 64 de saída, digitais). Cada módulo é dividido em 4 grupos com 16 canais cada. As saídas analógicas possuem resolução de 16 bits com uma faixa de tensão de 16 V. As entradas digitais permitem sinais com amplitude de 20 V, com resolução de 16 bits. Em complemento podemos citar a capacidade de importar projetos a partir do *software* Matlab®, através de modelos implementados no *software* Simulink®. Na Figura 3.7 está ilustrado o equipamento utilizado como simulador de uma rede elétrica.

Figura 3.7 – OP5707 da OPAL-RT Technologies.



Fonte: (OPAL RT TECHNOLOGIES, 2019)

Segundo BÉLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.N. (2019), simuladores tem sido utilizados em larga escala no planejamento e concepção de sistemas elétricos há décadas. Desde o *layout* de linhas de transmissão de larga escala até a otimização do acionamento de motores, a simulação tem desenvolvido um papel importante no sucesso do desenvolvimento de uma vasta gama de aplicações. Nas últimas três décadas, a evolução de ferramentas de simulação acompanhou a evolução da tecnologia computacional em *performance*, bem como na diminuição do custo. A capacidade de resolução de problemas mais complexos em menos tempo e a acessibilidade às ferramentas, tornou os simuladores populares em diversas áreas.

A principal função de um simulador é solucionar equações complexas, que modelam o comportamento de alguma variável, a uma velocidade de execução definida pelo usuário. Para a obtenção de resultados com precisão elevada, o período entre interações deve tender a zero segundos. Contudo, a exigência de passos de cálculo menores demanda uma alta capacidade de processamento. Quando realizados cálculos a um passo de tempo curto

podemos identificar este sistema como de simulação em tempo real. Com este pode-se implementar entradas e saídas digitais e analógicas, permitindo a comunicação entre dados físicos (motores, plantas fotovoltaicas, banco de baterias, rede elétrica, etc.), e dados modelados matematicamente.

3.7 CONCLUSÃO

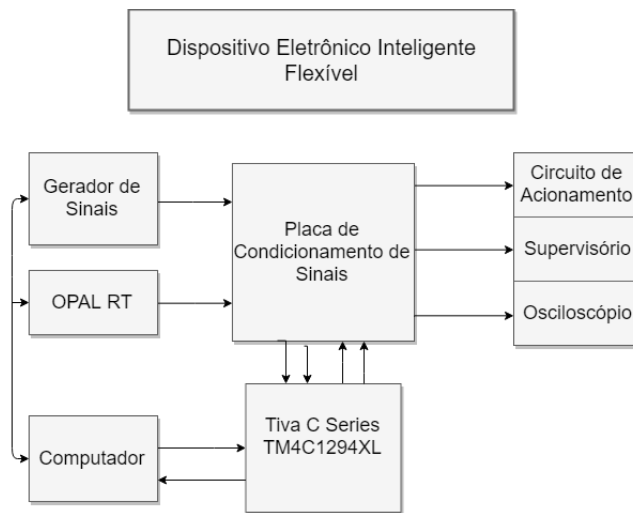
Neste capítulo foram abordados em detalhes os elementos que compõem o DEI, bem como os módulos secundários que auxiliam na utilização do mesmo. Foi descrito o *hardware* utilizado, composto pela plataforma TIVA e pelo circuito de condicionamento de sinais, e os elementos de *software*, composto pelo algoritmo de determinação de ganho automático e pela interface para configuração de testes, elementos complementares ao sistema proposto. O entendimento destes se faz necessário para acompanhamento dos resultados apresentados.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais utilizando a arquitetura do DEIF proposta, objetivando caracterizar e validar o funcionamento do algoritmo proposto quando submetido a condições diversas. Para obtenção destes resultados foram utilizados como dispositivos de referência o osciloscópio digital *Keysight DSO-X-2014A* e o simulador em tempo real OPAL-RT. Na Figura 4.1 é ilustrado o fluxograma organizacional, na bancada de testes, quanto aos dispositivos utilizados para realização das medições.

Figura 4.1 – Fluxograma da bancada de testes.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos de acordo com a fonte geradora do sinal submetido ao circuito proposto. Como padrão, definiu-se a frequência de corte do circuito de condicionamento de sinais em 1 kHz e o *offset* em 0 V.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS - OSCILOSCÓPIO DIGITAL

Para as medições realizadas utilizando o osciloscópio como fonte geradora, foi desenvolvida, no *SCILAB*, uma interface para auxiliar na configuração do cenário de medição de forma automática, descrita no tópico 3.5. Foram definidos intervalos para os níveis de tensão (V_{pp}) e para a frequência (Hz), bem como o *offset* e o tipo de sinal. As repostas obtidas são tratadas com auxílio do *software* SCILAB. O objetivo deste experimento é determinar o comportamento do circuito quando submetido a um sinal de tensão/frequência variável, bem como do algoritmo de determinação de ganho automático.

Na Tabela 4.1 estão descritos os valores iniciais (Val. Ini.), valores finais (Val. F.) e o número de medições realizadas para um sinal senoidal.

Tabela 4.1 – Parâmetros de configuração - Interface SCILAB.

Val. Ini. (Vpp)	Val. F. (Vpp)	Val. Ini. (Hz)	Val. F. (Hz)	Offset(V)	Nº medições
1 V	5 V	1 Hz	100 kHz	0 V	10

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Na Tabela 4.2 são apresentados o intervalo de tensão e na Tabela 4.3 o intervalo de frequência, estes foram utilizados para gerar uma forma de onda senoidal com *offset* nulo. Para cada valor de frequência, descrito na Tabela 4.3 são avaliados os valores de tensão descritos na Tabela 4.2. Formando assim o universo de variações de amplitude e frequência que o sinal de entrada do circuito de condicionamento de sinais foi submetido.

Outro ponto de configuração é a frequência de corte do circuito de concionamento de sinais, esta foi determinada como 1 kHz por ser a menor frequência de corte implementada e por convenção, ser grande o suficiente para medir sinais oriundos da rede elétrica convencional sem causar distorções indesejadas.

Tabela 4.2 – Configurações da forma de onda - Tensão (Vpp).

	Tensão (Vpp)
Tensão 1	1 V
Tensão 2	2 V
Tensão 3	3 V
Tensão 4	4 V
Tensão 5	5 V

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

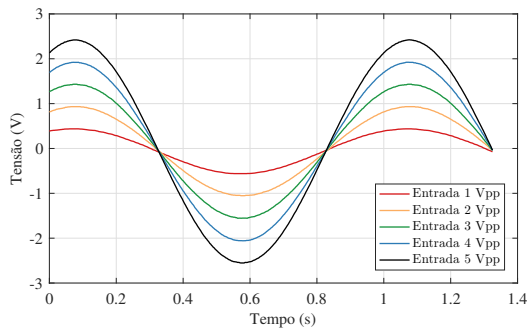
Tabela 4.3 – Configurações da forma de onda - Frequência (Hz).

	Frequência (Hz)
Frequência 1	1 Hz
Frequência 2	4 Hz
Frequência 3	13 Hz
Frequência 4	46 Hz
Frequência 5	167 Hz
Frequência 6	599 Hz
Frequência 7	2154 Hz
Frequência 8	7743 Hz
Frequência 9	27826 Hz
Frequência 10	100 kHz

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

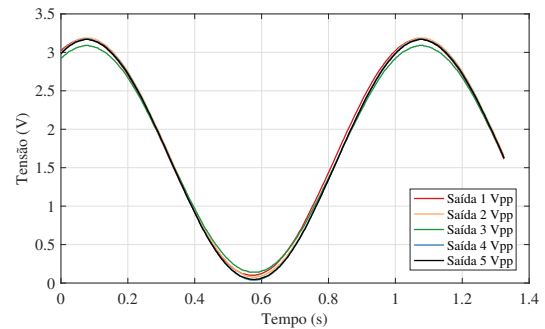
Na Figura 4.2 estão ilustrados os sinais de entrada de frequência igual à 1 Hz com tensões variáveis de 1 até 5 V de pico-a-pico. Na Figura 4.3 está ilustrado o sinal de saída condicionado. Este cenário se repete para as demais frequências com o intuito de validar o correto funcionamento do algoritmo de determinação de ganho automático e identificar limitações do DEIF proposto. Nas Figuras 4.2 a 4.21 estão ilustrados os resultados obtidos para este cenário de teste, e nas Tabelas 4.4 e 4.5 estão descritos os ganhos determinados para cada cenário de medição e a comparação com a forma de onda de referência.

Figura 4.2 – Sinais de Entrada - Frequência 1Hz.



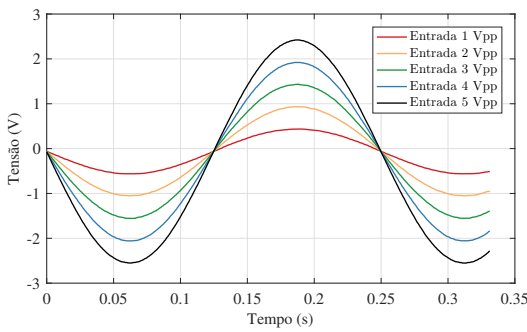
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.3 – Sinais de Saída - Frequência 1Hz.



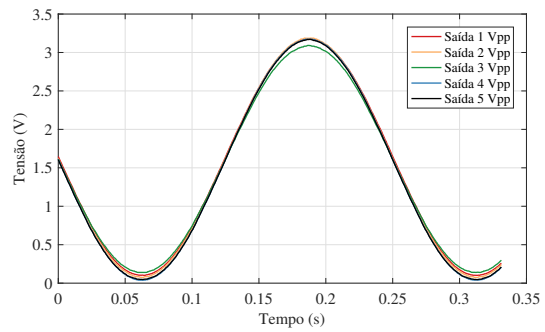
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.4 – Sinais de Entrada - Frequência 4Hz.



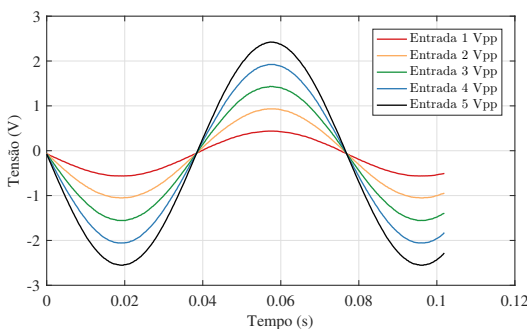
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.5 – Sinais de Saída - Frequência 4Hz.



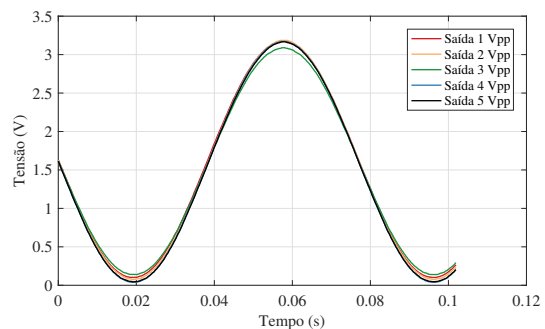
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.6 – Sinais de Entrada - Frequência 13Hz.



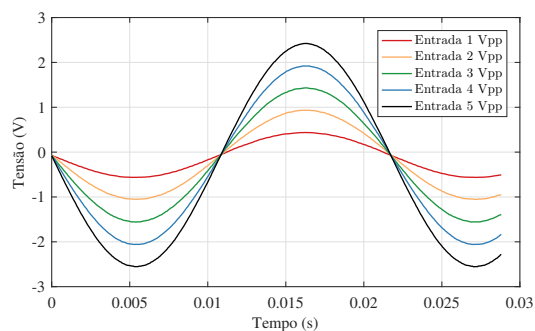
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.7 – Sinais de Saída - Frequência 13Hz.



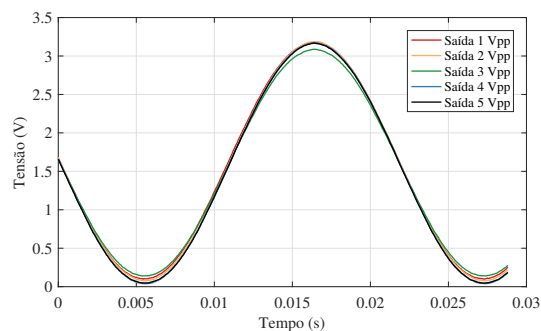
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.8 – Sinais de Entrada - Frequência 46Hz.



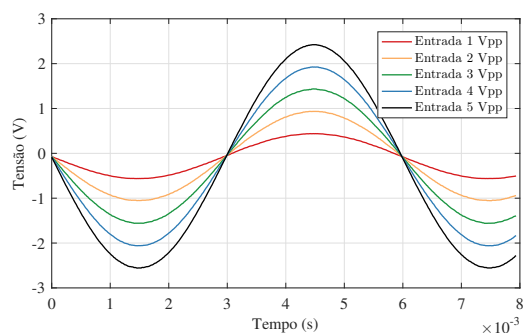
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.9 – Sinais de Saída - Frequência 46Hz.



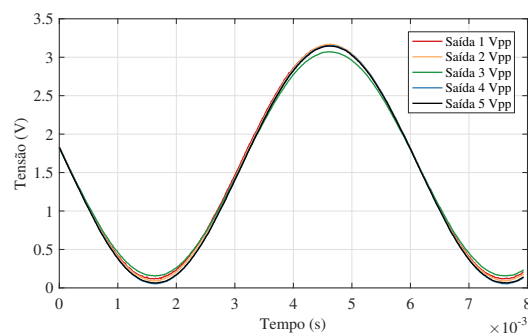
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.10 – Sinais de Entrada - Frequência 167Hz.



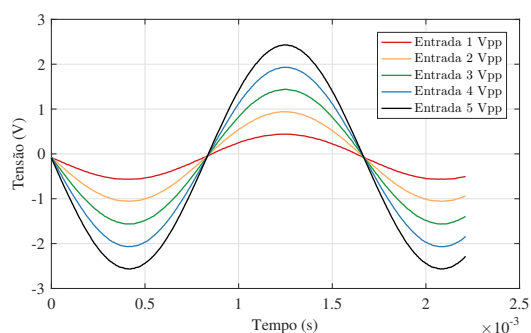
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.11 – Sinais de Saída - Frequência 167Hz.



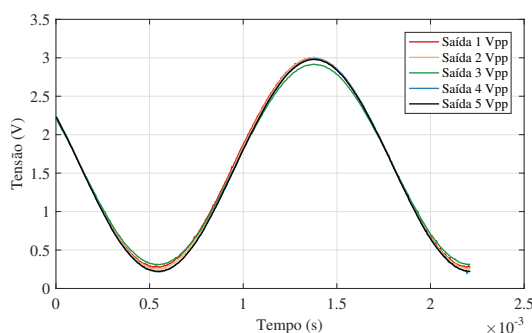
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.12 – Sinais de Entrada - Frequência 599Hz.



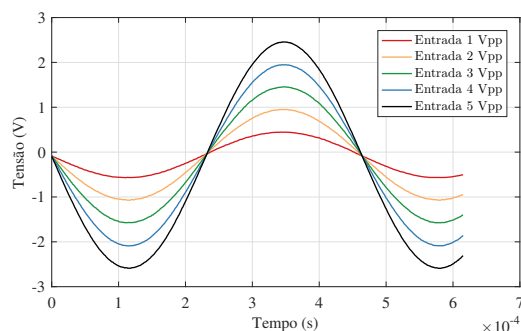
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.13 – Sinais de Saída - Frequência 599Hz.



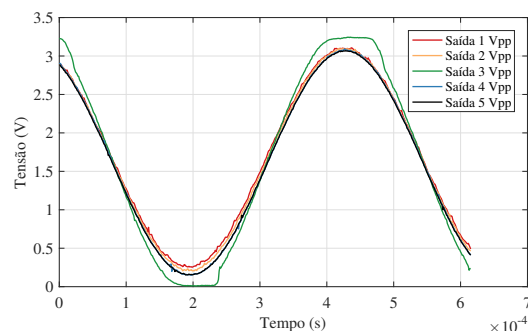
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.14 – Sinais de Entrada - Frequência 2154Hz.



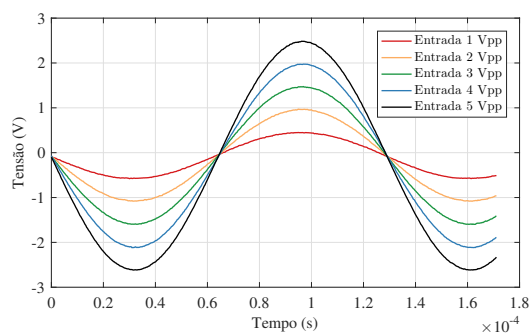
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.15 – Sinais de Saída - Frequência 2154Hz.



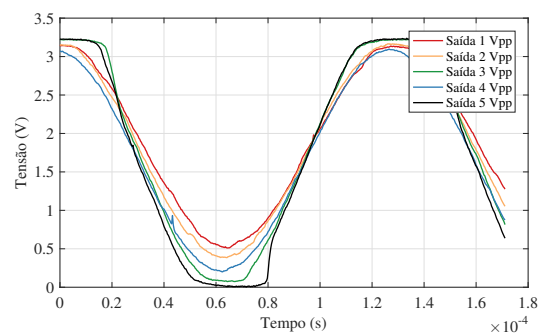
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.16 – Sinais de Entrada - Frequência 7743Hz.



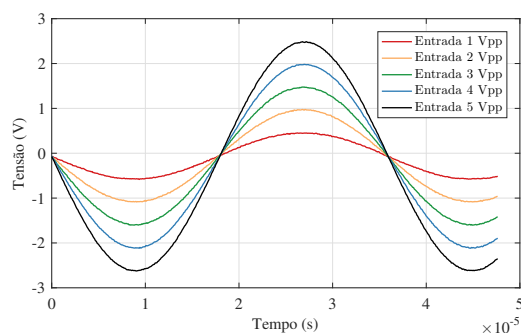
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.17 – Sinais de Saída - Frequência 7743Hz.



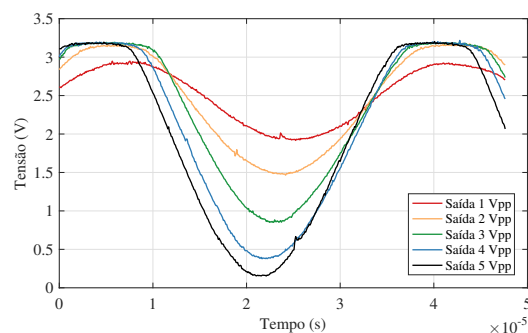
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.18 – Sinais de Entrada - Frequência 27826Hz.



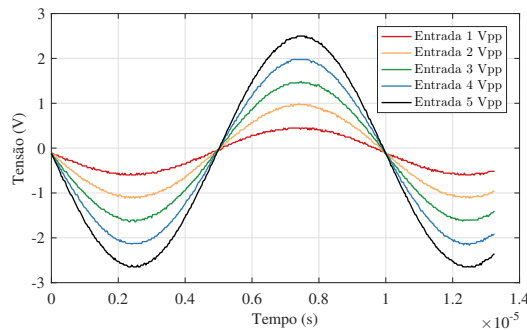
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.19 – Sinais de Saída - Frequência 27826Hz.



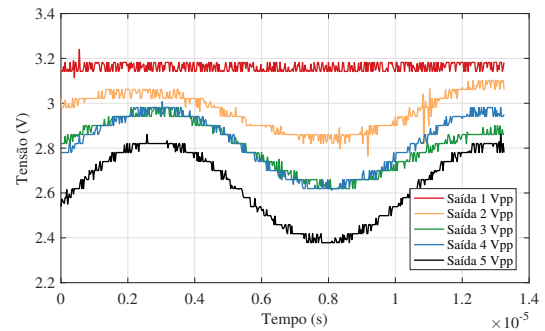
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.20 – Sinais de Entrada - Frequência 100000Hz.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Figura 4.21 – Sinais de Saída - Frequência 100000Hz.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Na Tabela 4.4 pode-se observar os valores de ganho para cada valor do intervalo de tensão quando submetido aos sinais de entrada. Analisando esses valores, identificou-se um comportamento linear do ganho até que seja ultrapassada a frequência de corte do filtro passa-baixas utilizado. Ao ultrapassar tal limite, é possível perceber as interferências do filtro em forma de uma atenuação do sinal de saída, impactando no aumento do parâmetro ganho e uma defasagem do sinal de saída em relação ao de entrada, validando a atuação do filtro e do algoritmo de determinação do ganho para o intervalo de frequência.

Tabela 4.4 – Ganho - Circuito de condicionamento de sinais em dB.

	Tensão 1 V	Tensão 2 V	Tensão 3 V	Tensão 4 V	Tensão 5 V
Frequência 1 Hz	10dB	8dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 4 Hz	10dB	4dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 13 Hz	10dB	4dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 46 Hz	10dB	4dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 167 Hz	10dB	4dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 599 Hz	10dB	4dB	0dB	-2dB	-4dB
Frequência 2154 Hz	16dB	10dB	8dB	4dB	2dB
Frequência 7743 Hz	26dB	20dB	18dB	14dB	14dB
Frequência 27826 Hz	28dB	32dB	30dB	28dB	26dB
Frequência 100 kHz	42dB	42dB	42dB	42dB	42dB

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Tabela 4.5 demonstra a comparação da média dos valores de tensão pico a pico (Vpp) para cada cenário de frequência com a tensão de pico-a-pico determinada como referência, com 3,15 V. Pode-se observar o comportamento do circuito em relação à tensão e frequência. A medida que a frequência do sinal de entrada aumenta a influência do filtro e dos componentes discretos do circuito de condicionamento de sinais aumenta, modificando o sinal em sua forma, deslocando em tensão e no tempo, fornecendo assim respostas distantes da condição ideal.

Tabela 4.5 – Tensão de saída média (Vpp) x Forma de onda de referencia (Vpp).

	Tensão Vpp Média	Erro (Vpp Média - Ref.)(%)
Frequência 1 Hz	3.0938	1.78
Frequência 4 Hz	3.1409	0.29
Frequência 13 Hz	3.0780	2.28
Frequência 46 Hz	3.0766	2.33
Frequência 167 Hz	3.0429	3.40
Frequência 599 Hz	2.7259	13.46
Frequência 2154 Hz	2.9628	5.94
Frequência 7743 Hz	2.9270	7.08
Frequência 27826 Hz	2.1771	30.88
Frequência 100 kHz	0.2885	90.84

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Observa-se que em sinais nos quais não há variação da tensão de pico-a-pico, o circuito de condicionamento de sinais em conjunto com o algoritmo de determinação de ganho apresentaram estabilidade e proximidade ao valor ideal, validando assim o seu funcionamento. É também perceptível a influência da frequência na acurácia dos resultados, corroborando com o correto funcionamento do filtro passa-baixas implementado. Também deve-se salientar a importância da interface desenvolvida para criação do cenário de testes, com o auxílio desta pode-se simular o ambiente no qual o dispositivo será inserido e antecipar qual o comportamento esperado, bem como ser utilizada para análises repetitivas com o objetivo de caracterizar equipamentos.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS - OP5707 OPAL-RT TECHNOLOGIES

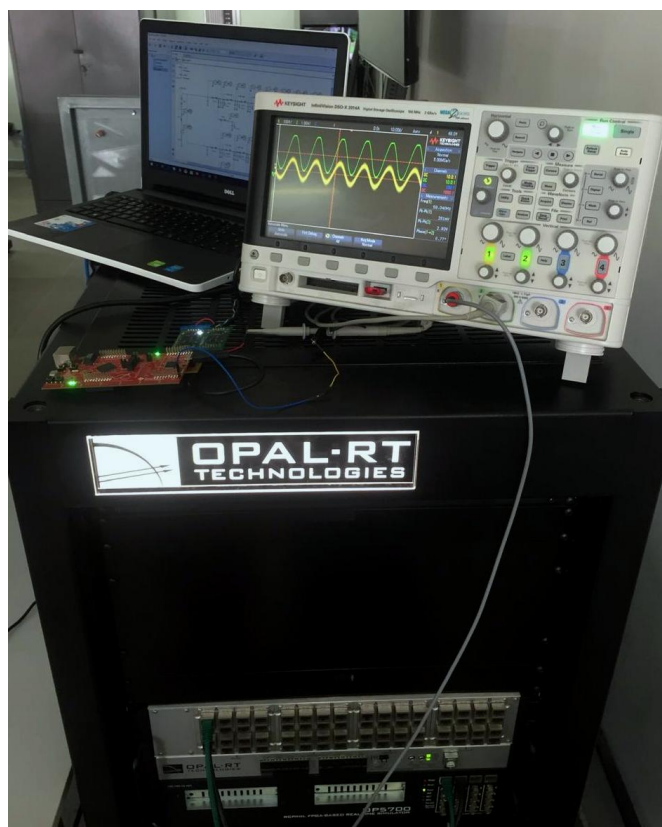
Nas medições realizadas utilizando sinais gerados pelo OPAL-RT, é medida a tensão condicionada num ponto específico de uma rede de distribuição simulada, em momentos de operação normal e de falta. A TIVA, responsável por amostrar e adequar as grandezas medidas, em conjunto com o circuito de condicionamento de sinais, realiza variações automáticas de ganho controladas por *software*, tornando possível identificar situações de operação fora do padrão e adequar o sinal a ser medido sempre ao nível adequado de medição.

Os experimentos realizados com este equipamento objetivam simular o comportamento do DEIF proposto como um conjunto quando inserido como elemento supervisor em uma rede elétrica real. Neste cenário, o dispositivo foi posicionado num ponto onde é simulado um curto-circuito fase-terra, devendo operar como um elemento supervisor. Assim, pode-se validar o funcionamento do circuito quando submetido a uma aplicação crítica e de características dinâmicas.

Na Figura 4.22 é exibido o experimento montado para obtenção de sinais a partir

do OPAL-RT. Nesta figura observa-se o equipamento em questão fornecendo um sinal de entrada para exibição no osciloscópio e o mesmo sinal como entrada para o DEIF, como saída temos o sinal condicionado, e o computador como equipamento de controle da plataforma TIVA e do OPAL.

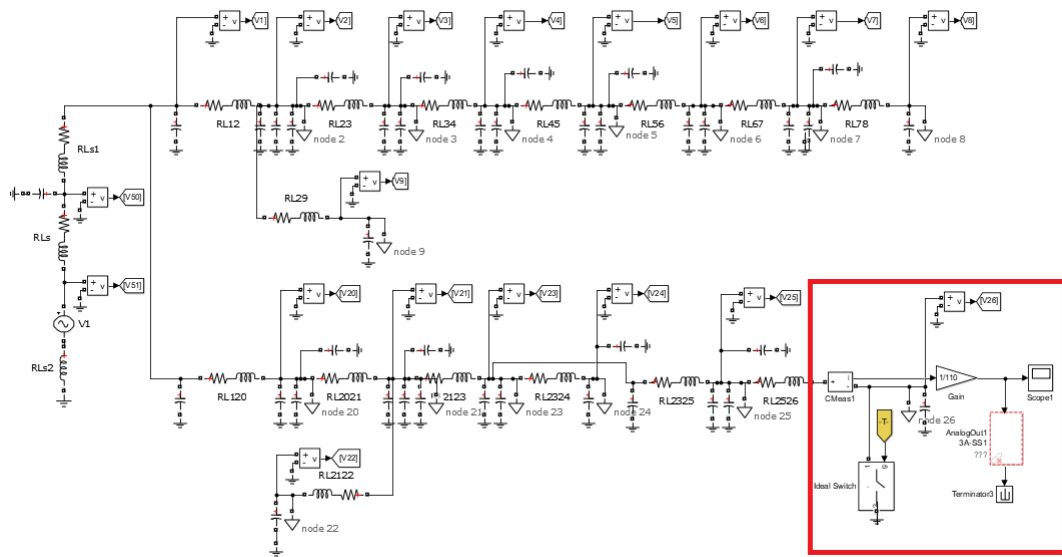
Figura 4.22 – Experimento - OP5707 da OPAL-RT Technologies.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Na Figura 4.23 está ilustrada a rede elétrica simulada. Observa-se, destacado em vermelho, o ponto de acoplamento onde está inserido um elemento que simula um sensor de corrente com atenuação de escala 110 A:1 V, este realiza a adequação dos níveis do sinal de saída para posterior tratamento do DEIF proposto. O comportamento em si da rede elétrica em questão não é objeto de estudo deste trabalho, sendo o foco observar o comportamento do DEIF quando submetido a uma operação emulando uma condição real.

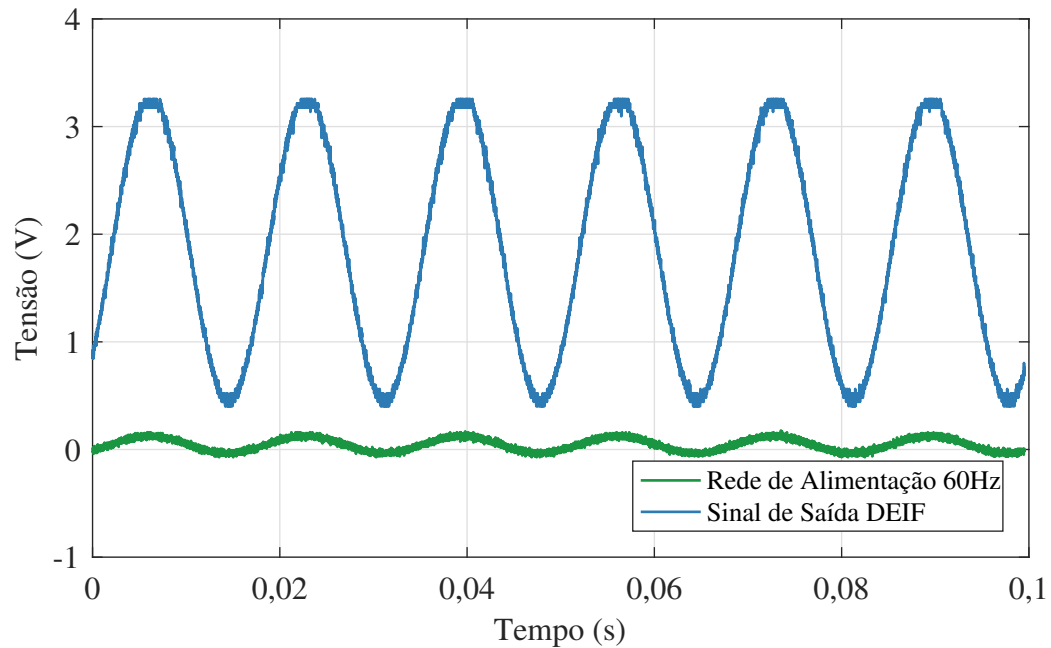
Figura 4.23 – Diagrama da Rede Elétrica Simulada - OP5707 da OPAL-RT Technologies.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Inicialmente avaliou-se o modo de operação normal, no qual não é avaliada uma falta. Neste cenário o sinal correspondente foi condicionado a níveis adequados para digitalização e posterior tratamento por *software*. Na Figura 4.24 está ilustrado o resultado obtido.

Figura 4.24 – Modo de operação normal - Rede Elétrica simulada.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Na Tabela 4.6 estão descritas as características das formas de onda obtidas como resposta. Para este cenário obteve-se um valor de *software* de ganho igual a 23, que equivale

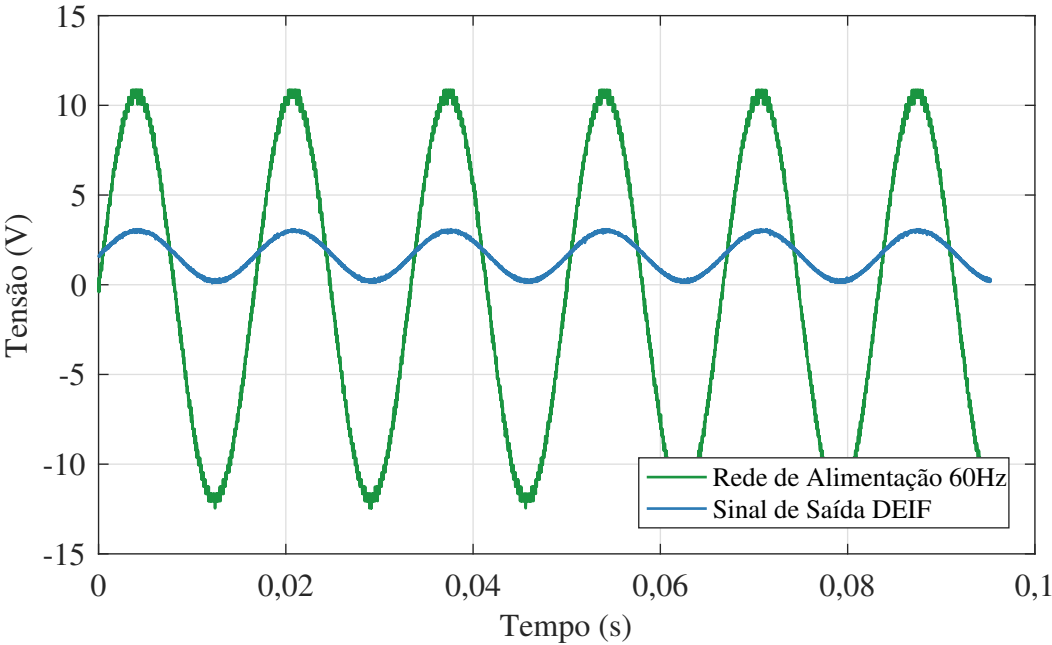
a 26 dB, segundo a Tabela 3.1, e uma defasagem de 0° entre os sinais. Os resultados obtidos validam o comportamento do circuito e reafirmam o comportamento esperado para o circuito proposto.

Tabela 4.6 – Características dos Resultados - Modo de operação normal - Rede Elétrica simulada.

	Tensão Vpp (V)	Frequência (Hz)
Sinal de entrada (Fonte)	270 m	60
Sinal de Saída (DEIF)	2.93	60

Para o modo de operação em falta, a Figura 4.25 ilustra o sinal de entrada e o sinal de saída condicionado.

Figura 4.25 – Modo de operação em falta - Rede Elétrica simulada.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Para este cenário observa-se, na Tabela 4.7, as características das formas de onda obtidas como resposta. Obteve-se um valor de *software* de ganho igual a 1, equivalente a uma atenuação de 18 dB, segundo a Tabela 3.1, e uma defasagem de 0° entre os sinais. Os resultados obtidos validam o comportamento do circuito e reafirmam o comportamento esperado para o circuito proposto.

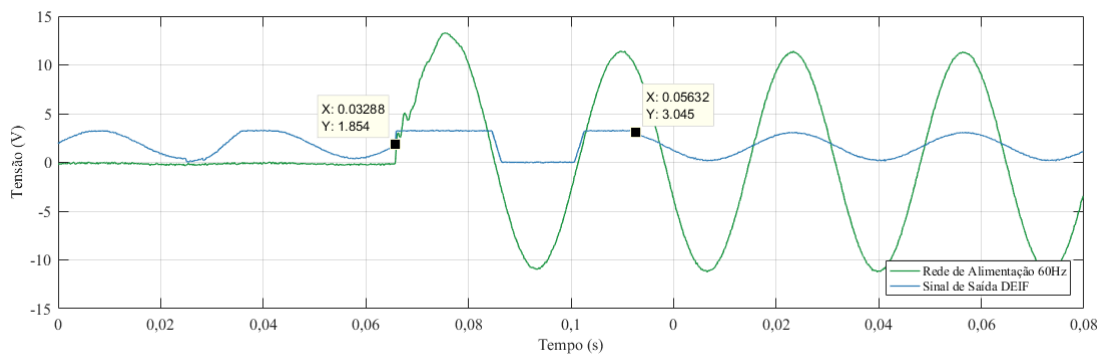
Tabela 4.7 – Resultados - Modo de operação em falta - Rede Elétrica simulada.

	Tensão Vpp (V)	Frequência (Hz)
Sinal de entrada (Fonte)	23.7	60
Sinal de Saída (DEIF)	3.02	60

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Em seguida são avaliados os momentos de transição do modo de operação normal para o momento de falta e o sentido inverso. A análise consiste em avaliar o tempo necessário para que o parâmetro de ganho seja adequado ao novo modo de operação. A transição do modo de operação normal para o modo em falta está ilustrada na Figura 4.26. Nesta podemos observar o tempo necessário para transição do valor *software* de ganho 23 para 1, como demonstrado anteriormente, sendo este tempo igual a 0,02344 segundos. Correlacionando com os valores reais em dB, verifica-se que a velocidade de transição para o momento no qual a tensão de entrada aumenta é de aproximadamente 1,8778 dB/ms.

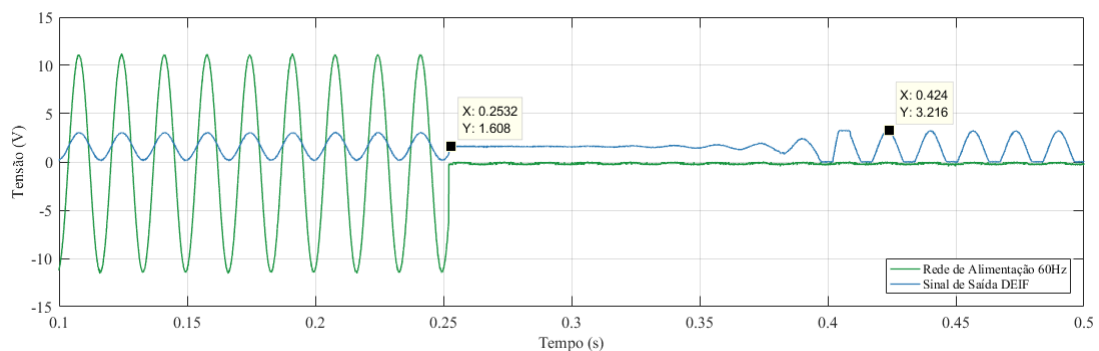
Figura 4.26 – Transição - Modo de operação normal para em falta - Rede Elétrica simulada.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Para a transição do modo em falta para o modo de operação normal temos uma situação onde a velocidade de transição não é um parâmetro crítico, pois não temos um cenário prejudicial, no nosso caso, à rede elétrica em questão. Na Figura 4.27 pode-se observar o tempo necessário para esta transição do parâmetro *software* de ganho de 1 para 23, sendo este igual a 0,1708 segundos. Correlacionando com os valores reais em dB, verifica-se que a velocidade de transição para o momento no qual a tensão de entrada diminui é de aproximadamente 0,2576 dB/ms.

Figura 4.27 – Transição - Modo de operação em falta para normal - Rede Elétrica simulada.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais obtidos fazendo uso da plataforma proposta e dos equipamentos destacados. Para o primeiro cenário, no qual foi utilizado o osciloscópio digital como fonte geradora de sinais, observa-se um comportamento estável quando o DEIF é submetido a sinais de entrada de tensão fixa. Também pode-se observar o correto funcionamento do algoritmo de determinação automática de ganho. Para medições de sinais de frequência acima de 3 kHz observou-se um maior desvio do sinal de referência, contudo, sinais de frequência acima deste valor não são objeto de estudo, sendo testados com o intuito de identificar as limitações do sistema proposto. Para o segundo cenário, pode-se observar o comportamento da plataforma proposta em um ambiente de simulação em tempo real. Os resultados ilustrados nas Figuras 4.24 a 4.27 validam o correto funcionamento do circuito proposto, bem como do algoritmo de determinação automática de ganho, contextualizando o DEIF como um possível elemento de medição, supervisão ou atuação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Um circuito de condicionamento de sinal flexível em conjunto com um algoritmo de determinação automática de ganho foi proposto, projetado e implementado. A estrutura é adequada para o desenvolvimento do DEI em uma configuração flexível, cuja aplicação em SG é significativa. A nova concepção de um DEIF pode funcionar como um medidor inteligente bidirecional, ou então, executar tarefas de um controlador dinâmico (ou seja, controlador local) ou controlador supervisor, melhorando a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema. Em comparação com a bibliografia existente, o DEIF proposto oferece um baixo custo de concepção, versatilidade (ou seja, alterações podem ser feitas por *software*), alta capacidade de processamento, recursos de comunicação, portabilidade, fácil integração e facilidade de manutenção. O conceito de design do DEIF foi formulado para permitir extensibilidade, escalabilidade e capacidade de atualização. Sendo a versatilidade do DEIF o diferencial do sistema proposto, podendo ser utilizado na medição de grandezas diversas, apenas variando o elemento sensor acoplado ao mesmo.

Os experimentos foram realizados considerando diferentes cenários voltados a caracterizar o comportamento do DEIF. Pode-se observar que há uma estabilidade dos sinais de saída medidos e um correto funcionamento no que diz respeito às variações realizadas por *software*, fazendo uso do algoritmo de determinação de ganho automático. Contudo, em algumas condições o sinal de saída apresentou distorções, sendo necessário ressaltar que os resultados obtidos validam o mesmo como uma prova de conceito, como sugestões para contribuições futuras devemos realizar o aperfeiçoamento do algoritmo proposto. Os resultados referentes ao tempo de transição indicam o potencial do sistema proposto, contudo, para corroborar os mesmos, uma análise comparativa deve ser realizada, confrontando os resultados obtidos com a performance de dispositivos consolidados no mercado ou verificando a sua concordância com normas reguladoras.

Devem ser destacadas as perspectivas futuras, nas quais o DEI proposto possa operar de maneira automatizada em relação à configuração dos demais parâmetros do circuito de condicionamento de sinais, tal como o *offset*. Além disso, pode-se implementar a exibição dos dados e controle de parâmetros por meio de uma interface com o usuário, integrando o DEIF a um sistema supervisor. Por fim, o desenvolvimento de um sistema embarcado em conjunto com elementos de sensoriamento modularizados, bem como a realização de testes para validação. Sendo estes os possíveis desdobramentos do trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks - Elsevier Science B. V.*, v. 38, n. 1, p. 393–422, Jan/Feb 2002.
- AMIN, S. M. Smart grid: Overview, issues and opportunities. advances and challenges in sensing, modeling, simulation, optimization and control. *European Journal of Control*, v. 17, n. 5, p. 547 – 567, 2011. ISSN 0947-3580.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 5, p. 34–41, Sept 2005. ISSN 1540-7977.
- ANATORY, J. et al. The influence of load impedance, line length, and branches on underground cable power-line communications (plc) systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 1, p. 180–187, Jan. 2008.
- BRIGHT, J. A.; LEE, W.-J. Integrated monitoring, protection, and control systems for industrial and commercial power systems. *Industry Application, IEEE Transactions on*, v. 36, n. 1, p. 381–388, Jan/Feb 2000.
- BÉLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.N. *The What, Where and Why of Real-Time Simulation*. 2019. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/>>. Acesso em: 01/07/2019.
- CALVO, R. J. R. et al. Intelligent electronic device for distributed energy resources. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 7, p. 3270–3277, July 2016. ISSN 1548-0992.
- Chabchoub, E. et al. New time-domain conditioning circuit for resistive sensor: Behavioral modelling for simulation and optimization. In: *2017 MIXDES - 24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 408–411.
- CHAKRABORTY, N.; MONDAL, A.; MONDAL, S. Intelligent scheduling of thermostatic devices for efficient energy management in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 13, n. 6, p. 2899–2910, Dec 2017. ISSN 1551-3203.
- DIAZ-DIAZ, I. A.; CERVANTES, I. Design of a flexible analog signal conditioning circuit for dsp-based systems. *The 2013 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science*, p. 231–237, 2013.
- DIETRICH, P. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 3, p. 381–388, Aug. 2011.
- GEHRKE, C. et al. Industrial and commercial power system automation system based on a hybrid network architecture. In: *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. N.; OLIVEIRA, A. C. Smart control for active power generation, voltage level and harmonic content based on photovoltaic generators. In: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2015.
- GUNGOR, V. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 4, p. 529–539, Nov. 2011.

- IEA (Ed.). *Technology Roadmap How2 Guide for Smart Grids in Distribution Networks*. 1. ed. Rue de la Federation 75739 Paris Cedex 15, France: IEA - International Energy Agency, 2015.
- IEEE, S. C. C. Ieee guide for smart grid interoperability of energy technology and information technology operation with the electric power system (eps), end-use applications, and loads. *IEEE Std 2030-2011*, p. 1–126, Sept 2011.
- Isogai, D. et al. Analog characterization module with data converter-coupled signal reconfiguration. In: *2017 New Generation of CAS (NGCAS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 149–152.
- Jianqiang Wang; Jiuchun Jiang. Design of sampling signal conditioning circuits for dsp-controlled grid-connecting photovoltaic inverter. In: *2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 380–383.
- KENNEDY, R.; RICKEY, D. Monitoring and control of industrial power systems. *Computer Applications in Power, IEEE*, v. 2, n. 4, p. 42–46, Oct. 1989.
- MALINOWSKI, A.; YU, H. Comparison of embedded system design for industrial applications. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 2, p. 244–254, May 2011.
- MCBEE, K.; SIMOES, M. Utilizing a smart grid monitoring system to improve voltage quality of customers. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 2, p. 738–743, June 2012. ISSN 1949-3053.
- MCDERMOTT, D.; DOLEZILEK, B. 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. Clemson, South Carolina, USA*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 496–500.
- MOGHE, R.; LAMBERT, F.; DIVAN, D. Smart “stick-on” sensors for the smart grid. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 1, p. 241–252, Mar 2012.
- MOSHARI G.R. YOUSEFI, A. E. A.; HAGHBIN, S. Demand-side behavior in the smart grid enviroment. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, p. 1–7, Oct. 2010.
- MOSLEHI, K.; KUMAR, R. A reliability perspective of the smart grid. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 1, n. 1, p. 57–64, June 2010.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *The Engineer’s Guide to Signal Conditioning*. 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/20712_Benefits_of_Integrated_SC_WP_HL.pdf>. Acesso em: 01/07/2019.
- OPAL RT TECHNOLOGIES. *OP5707 SIMULATOR*. 2019. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op5707/>>. Acesso em: 01/07/2019.
- SALVADORI, F. et al. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, v. 58, n. 9, p. 3104–3111, Sept. 2009.

- _____. Smart grid infrastructure using a hybrid network architecture. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 3, p. 1630–1639, Sept 2013. ISSN 1949-3053.
- _____. Design of an intelligent electronic device based on tivac platform for smart grid applications. In: *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- _____. Design and implementation of a flexible intelligent electronic device for smart grid applications. In: *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- SANTOS, T. da S. Projeto e implementação de dispositivo eletrônico inteligente flexível para aplicações em smart-grid. *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFPB*, 2018.
- TEXAS INSTRUMENTS. *ARM® Cortex®-M4F-Based MCU TM4C1294 Connected LaunchPad™ Evaluation Kit*. 2019. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL>>. Acesso em: 01/07/2019.
- TIRUPATHI, R.; KAR, S. K. Design and analysis of signal conditioning circuit for capacitive sensor interfacing. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI-2017)*, p. 1717–1721, 2017.
- XU, W.; XU, G.; YUAN, H. High performance distributed power quality monitoring ied used in smart grid. In: *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 706–710. ISSN 2161-7481.
- Y C, C. S. et al. Programmable gain and dc level shift analog signal conditioning circuit: Microcontroller based implementation. *IMTC 2005 - Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2005.
- YANG, Q.; BARRIA, J.; GREEN, T. Communication infrastructures for distributed control of power distribution networks. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 2, p. 316–327, May 2011.
- ZAVODA, F. et al. Universal ied for distribution smart grids. In: *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4.
- ZHUO, Y.; JIULING, L.; WU, Q. Hybrid network architecture: A prospective integrated information infrastructure for manufacturing enterprise. In: *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, Beijing, China*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 1659–1663.
- ŽAKOVA, K.; HUBA, M. Scilab based interactive online application for 1st order plant control. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, p. 1797–1801, April 2017.