



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

LAMBA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS E
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UM CONVERSOR CC-CC TRIFÁSICO ISOLADO
BIDIRECIONAL ALIMENTADO EM CORRENTE**

REDENÇÃO – CE

2020

LAMBA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS E
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UM CONVERSOR CC-CC TRIFÁSICO ISOLADO
BIDIRECIONAL ALIMENTADO EM CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia de Energias

Orientador: Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho

REDENÇÃO – CE

2020

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

GOMES, Lamba.

G612d

Desenvolvimento do sistema de condicionamento de sinais e aquisição de dados para um conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente / Lamba Gomes. - Redenção, 2020.

60f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho.

1. Conversores de corrente elétrica. 2. Conversor analógico digital. 3. Filtros elétricos ativos. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 621

LAMBA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS E
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UM CONVERSOR CC-CC TRIFÁSICO ISOLADO
BIDIRECIONAL ALIMENTADO EM CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia de Energias

Aprovado em: 13/02/2020.

BANCA EXAMINADORA



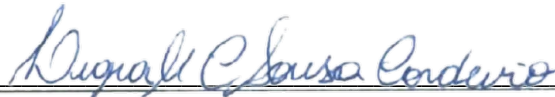
Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)



Eng. Gilmar Nunes dos Santos Costa

Mestrando em Engenharia Elétrica (PPGEE/UFC)



Profa. Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)

Ao meu pai (*in memoriam*) e à minha
mãe Teresa Lopes.

Às minhas irmãs Elisabete (Betty),
Mariama e Fatinha e, em especial ao
meu sobrinho Elizandro.

“Les trophées de la vie ne sont pas remportées par les plus méritants ni les plus faibles mais par ceux qui n'abandonnent jamais.”

Thione Niang

AGRADECIMENTOS

A Deus, todo poderoso, agradeço pela força e proteção de sempre.

Agradeço ao Governo Brasileiro através da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB que guiou meus caminhos e me deu um rumo na vida. Aos meus professores que me formaram não só para a atividade profissional, mas também para a vida.

Ao meu professor orientador Hermínio Miguel de Oliveira Filho que foi muito importante no processo de desenvolvimento deste trabalho. Pela oportunidade dada quando o solicitei a possibilidade de trabalhar no projeto que hoje me permitiu escrever este trabalho. OBRIGADO!

Agradeço à minha família, que quase não tenho palavras para descrever sua importância em minha vida. Ao meu pai João Gomes (*in memoriam*), que não pode estar presente neste momento tão incrível da minha vida. Seus ensinamentos e valores alimentaram minha alma e conduziram meus passos até aqui, saudades eternas. À minha mãe Teresa Lopes que sempre foi minha maior fonte de inspiração e força por me incentivar e fazer acreditar que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou. A minha querida irmã, Elizabete (Betty) por estar ao meu lado e por me fazer ter confiança nas minhas decisões. Às minhas irmãs Marima e Fatinha.

Aos meus amigos que sempre me incentivaram a correr atrás dos meus sonhos: Venâncio (Vemend); Domingos Malú, Frederik (Djedjas), Carlos, Seidi (Dree) e ao meu primo Nascir Injai.

Quero lembrar aqueles que fizeram parte diretamente da minha caminhada, aos VetS (Julito e Wellington), Ana Lenise, Filinto, Yanick, Robna, Hugueth, Isabel Holandês, Neyla, Carlos Augusto, Romário, Beluário, Tomás, Cátia, Nicolas, Jério Fernandes e em especial para toda galera de 2013.3, pelas noites viradas em estudar para prova ou fazendo projeto de uma disciplina.

Ao Cicero Neto, parceiro de pesquisa, por toda a ajuda e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À nova família que fiz nesses anos longe da casa, Mama Saliu, José Aerton, Ibuna, Siozimila, Anne Larisse, Fatumata Djarai, Ocante, Jailson Candê, Betinho, Braima Dó e a todos os amigos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada eu agradeço com um forte abraço

RESUMO

O uso de sistemas digitais em condicionamento de sinais e aquisição de dados tornaram-se o modo mais popular para desenvolvimento da interconectividade e análise de dados, permitindo, assim, definir e melhorar qualitativamente a velocidade de aquisição, visualização, armazenamento, processamento dos dados. Neste trabalho, apresenta-se uma breve introdução aos elementos funcionais de um sistema de aquisição de dados de corrente e tensão para um conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional aplicado em sistemas de armazenamento de energia. A topologia estudada, trata-se originalmente de um conversor alimentado em tensão e adaptado para ser alimentado em corrente. O objetivo é realizar o condicionamento dos sinais provenientes de sensores de tensão e corrente conectados nos terminais do barramento capacitivo, na carga do sistema e nos indutores. Para assegurar um sinal de qualidade são especificados os sensores e circuitos de condicionamento, além de filtros ativos *anti-aliasing* de segunda ordem. Também foram especificadas a frequência de amostragem, fundo de escala e resolução do sistema de conversão analógica-digital (A/D). Para demonstrar o funcionamento dos dispositivos projetados, foram realizados testes no ambiente de simulação PSIM®.

Palavra-chave: conversores CC-CC bidirecionais, condicionamento de sinais, aquisição de dados, conversor A/D, filtros ativos de sinais.

ABSTRACT

The use of digital systems in signal conditioning and data acquisition has become the most popular way to develop interconnectivity and data analysis, thus allowing us to define and qualitatively improve the speed of data acquisition, visualization, storage, processing. In this work, we present a brief introduction to the functional elements of a current and voltage data acquisition system for a two-way isolated three-phase DC-DC converter applied to energy storage systems. The topology studied is originally a converter powered by voltage and adapted to be powered by the current. The objective is to perform the conditioning of signals from voltage and current sensors connected to the capacitive bus terminals, the system load, and the inductors. To ensure a quality signal, sensors and conditioning circuits are specified, as well as second-order active anti-aliasing filters. The sampling frequency, full scale and resolution of the analog-to-digital conversion (A / D) system were also specified. To demonstrate the functioning of the projected devices, tests were carried out in the PSIM® simulation environment.

Keywords: bidirectional DC-DC converters; signal conditioning; data acquisition, A/D converter, active signal filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - As quatro revoluções industriais.....	18
Figura 2.1 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados	21
Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um sensor elétrico.....	22
Figura 2.3 - Condicionador de sinais amplificador	23
Figura 2.4 - Representação do AOP ideal	23
Figura 2.5 - AOP realimentação negativa	24
Figura 2.6 - Resposta de um filtro com característica Butterworth.....	25
Figura 2.7 - Resposta de um filtro com característica Chebyshev (a) tipo 1 e (b) tipo 2.....	26
Figura 2.8 - Resposta de um filtro com característica elíptica	27
Figura 2.9 - Filtro ideal a) passa baixa e b) passa alta.....	27
Figura 2.10 - Filtro realizável a) passa baixa b) passa alta.....	28
Figura 2.11 – Estrutura básica para implementação de filtros PB, PA e PF	28
Figura 2.12 - Filtro passa baixa (PB) segunda ordem, topologia sallen key.....	29
Figura 2.13 - Filtro passa alta (PA) segunda ordem, topologia sallen key.....	30
Figura 2.14 - Filtro passa faixa (PF) segunda ordem, topologia sallen key	31
Figura 2.15 - Topologia do conversor proposta	34
Figura 3.1 - Circuito de ganho do sensor de corrente nos indutores	37
Figura 3.2 - Circuito do sensor de tensão no barramento capacitivo	38
Figura 3.3 - Circuito do sensor LA 100-TP.....	40
Figura 3.4 - Circuito do sensor LA 35-TP.....	41
Figura 3.5 - Circuito do sensor LV 20-P	42
Figura 3.6 - Diagrama de bode da função de transferência de filtro de sensor de corrente nos indutores	45
Figura 3.7 - Diagrama de bode da função de transferência de filtro de sensor das tensões	46
Figura 3.8 - Efeito de Amostragem e Retenção: comparação de um sinal analógico com a sua versão reconstruída (componente fundamental).....	48
Figura 3.9 - Conversor proposto juntamente com sistema da Aquisição de dados.....	49
Figura 4.1 - Circuito da aquisição de dados e condicionamento de sinais	50

Figura 4.2 - Circuito do conversor	51
Figura 4.3: Sinais na tensão de barramento capacitivo (V) a) antes do filtro; b) após do filtro .	52
Figura 4.4 - Sinais de tensão nos indutores (V) a) antes do filtro; b) após o filtro	53
Figura 4.5 - Sinais de tensão na bateria (V) a) antes do filtro; b) após o filtro	54
Figura 4.6 - Sinais de Tensão na saída do conversor (V) a) saída do sensor; b) saída de filtro..	54

LISTA DAS TABELAS

Tabela 3.1 - Especificações de projeto	35
Tabela 3.2 - Características do sensor de corrente	36
Tabela 3.3 - Características do sensor LV 20-P	38
Tabela 3.4 - Características do sensor LA 100-TP	39
Tabela 3.5 - Características do sensor LA 35-TP	41
Tabela 3.6 - Componentes do filtro para sensor corrente	45
Tabela 3.7 - Componentes do filtro para sensor tensão	46
Tabela 3.8 - Características de conversor A/D utilizado	47

LISTA DE SÍMBOLOS

H	fator de escala
ε	magnitude do desvio da banda passante
r	<i>ripple</i> da banda passante
$T_n^2(\omega)$	polinómio de <i>Chebyshev</i> de ordem n
f_c	frequência de corte
Q	fator de qualidade de filtro
V_{bat}	Tensão da Bateria
V_c	Tensão do barramento capacitivo
V_0	Tensão na saída do conversor
R_{iLa1}	resistor do filtro <i>anti-aliasing</i> do sensor dos compensadores das correntes nos indutores
$V_{ref,LEM}$	tensão de referência do sensor de corrente nos indutores
$V_{0,sensor}$	Tensão de saída sensor corrente nos indutores
G_{AMP}	ganho do circuito que atua na parcela de sensor de corrente nos indutores
G_{LA}	ganho de sensor de corrente nos indutores
R_{Lvc}	resistor de lado primário de sensor de barramento capacitivo
R_{Mvc}	resistor de lado secundário de sensor de barramento capacitivo
$G_{c,sen}$	ganho de sensor de barramento capacitivo
R_{Lvat}	resistor de lado primário de sensor de tensão na bateria
R_{Mvat}	resistor de lado secundário de sensor de tensão na bateria
$G_{bat,sen}$	ganho de sensor de tensão na bateria
R_{Lvo}	resistor de lado primário de sensor de tensão no segundo braço de conversor
R_{Mvo}	resistor de lado secundário de sensor de tensão no segundo braço de conversor
$G_{vo,sen}$	ganho de sensor de tensão no segundo braço de conversor
δ	coeficiente de amortecimento

$K_{A/D}$	ganho de quantização da conversão A/D
$At_{A/D}$	atraso computacional
R_M	resistor de conversão de sinal de corrente para tensão nos sensores de corrente
$V_{A/D}$	tensão de amostragem do conversor A/D

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-digital
ADC	<i>Analogic Digital Converter</i> – Conversor Analógico-Digital
AOP	Amplificador Operacional
FT	Função de Transferência
LVS	<i>Low Voltage Side</i> – Lado de Baixa Tensão
MFB	<i>Multiple-Feedback</i> – Realimentação Múltipla
PA	Passa Altas
PB	Passa Baixas
PF	Filtro Passa Faixas
S&H	<i>Sample and Hold</i> – Amostragem e Retenção
VCVS	<i>Voltage-Controlled Voltage Source</i> – Fonte de Tensão Controlada por Tensão
ZOH	<i>Zero Order Hold</i> – Segurador de Ordem Zero

SUMÁRIO

1	INTRUDUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	OBJETIVOS GERAIS	19
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	21
2.1.1	SENSORES E TRANSDUTORES.....	22
2.1.2	CONDICIONADOR DE SINAIS.....	22
2.1.2.1	Amplificador Operacionais – AOPs.....	23
2.1.2.2	Filtros ativos.....	24
2.1.3	CONVERSOR A/D.....	32
2.2	CONVERSORES CC-CC ISOLADOS BIDIRECIONAIS.....	33
2.2.1	CONVERSOR PROPOSTO	34
3	PROCEDIMENTO DE PROJETO PARA VALIDAÇÃO DE MODELO.....	35
3.1	DIMENSIONAMENTO DE SENSORES	35
3.1.1	SENSORES DE CORRENTE DOS INDUTORES CC	35
3.1.2	SENSOR DE TENSÃO DO BARRAMENTO CAPACITIVO.....	38
3.1.3	SENSOR DE CORRENTE DA FONTE DE ENTRADA.....	39
3.1.4	SENSOR DE CORRENTE DA SAÍDA DO CONVERSOR	40
3.1.5	SENSOR DE TENSÃO DAS BATERIAS	41
3.1.6	SENSOR DE TENSÃO NO SEGUNDO BRAÇO DO CONVERSOR.....	43
3.2	PROJETO DE FILTROS PARA OS SENSORES.....	44

3.2.1	FILTROS DO SENSOR DA CORRENTE NOS INDUTORES	44
3.2.2	FILTRO DOS SENSORES DAS TENSÕES	46
3.3	CONVERSOR A/D	47
3.4	CONDICIONAMENTO DE SINAIS E AQUISIÇÃO DE DADOS	48
4	RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A diversificação da matriz energética na produção de energia elétrica tem se intensificado nas últimas décadas como resposta ao alto nível do consumo (FARIAS; SELLITTO, 2011). Fatores como a disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio de tecnologias e a preservação do meio ambiente levaram vários países a diferentes escolhas para a composição de suas matrizes. A tendência irreversível é a migração de uma matriz predominantemente fóssil para uma matriz eletroenergética mais equilibrada, com maior predominância de fontes limpas e renováveis. Com isso, comunidade científica estão investigando aplicações desde geradores fotovoltaicos, células de combustíveis ou geração eólica, além do uso de armazenadores de energia, como forma de minimizar impactos ambientais causadas pelas emissões de carbono (BASTOS, 2016)

Apesar das vantagens citadas acima, alguns sistemas não são capazes de garantir um fornecimento contínuo de energia elétrica para uma carga (DEMASCENO, 2008), dessa maneira, prevê-se a instalação de um sistema de armazenamento de energia que serve para atenuar as oscilações do barramento (OLIVEIRA FILHO, 2015).

Segundo (CORRÊA, 2006), alguns dos aspetos motivadores que podem ser citados para justificar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento destas tecnologias são:

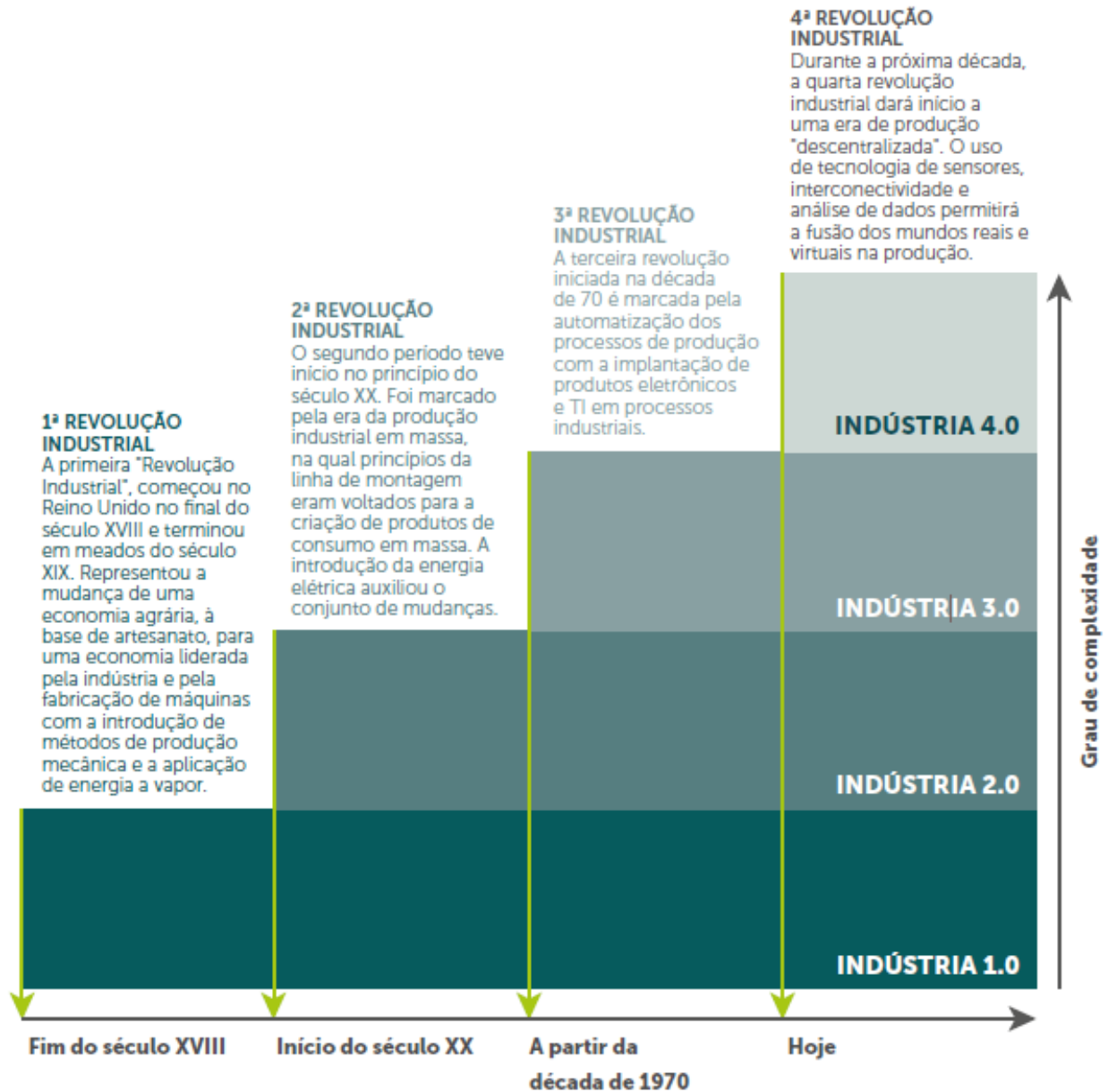
- a) garantir a continuidade de suprimento de atual demanda energética por aumentar as opções de fontes primárias;
- b) permitir o acesso à energia para consumidores situados em pontos ainda não atendidas pelo sistema;
- c) auxiliar na prevenção de eventuais interrupções no fornecimento de energia;
- d) permitir ainda o aumento da oferta com baixo custo e com manutenção dos atuais níveis de confiabilidade e qualidade para suprir a demanda reprimida.

Com tudo isso, o aumento do número de aplicações, como veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia, energias renováveis, *smart-grids* e sistemas de distribuição CC permitiram o desenvolvimento de diversos trabalhos e pesquisas sobre conversores CC-CC.

O surgimento de uma nova revolução industrial (Figura 1.1), chamada de 4ª Revolução Industrial, ocasionando maior conectividade e utilização da Internet das Coisas (IoT do inglês,

Internet of Things) já deixou de ser uma tendência para se tornar realidade (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Figura 1.1 - As quatro revoluções industriais



Fonte: (SISTEMA FIRJAN, 2016)

Atualmente as indústrias imerjam cada vez mais no universo cyber-físico, buscando maior conectividade e interação entre processos, equipamentos e ambientes. Além disso, instituições de ensino e laboratórios também buscam transformar seus processos e aumentar a produtividade através da inovação, abrindo portas para pesquisa e desenvolvimento (KONZEN, 2019).

Entretanto, para que ocorra essa contração entre o mundo físico e virtual, é imperativo que haja uma conversão e condicionamento de sinais e processos analógicos em digitais, comunicação eficiente e universalizada, entre outros aspectos.

Este trabalho propõe desenvolver um sistema de condicionamento de sinais e aquisição de dados adaptados especificamente a um conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente, que transforma sinais analógicos em digitais para permitir a interpretação e manipulação (ou armazenamento) por sistemas digitais. Para o conversor supracitado funcionar conforme esperado, é necessário que todas as variáveis de controle ou aquelas responsáveis pelo fluxo bidirecional entre armazenador de energia e rede de distribuição elétrica sejam adquiridas e monitoradas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver o sistema de condicionamento de sinais e aquisição de dados para as variáveis a serem monitoradas no conversor CC-CC trifásico bidirecional alimentado em corrente para armazenadores de energia a uma rede de distribuição CC.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Refazer e simular conversor CC-CC trifásico bidirecional alimentado em corrente para armazenadores de energia a uma rede de distribuição CC;
- Especificar e projetar sensores de corrente para aquisição de corrente nos indutores CC de conexão com as baterias e corrente de carga;
- Especificar e projetar sensores de tensão para aquisição de tensão no banco de baterias, barramento capacitivo e carga;
- Projetar filtros para eliminação de ruídos e ajustes necessários nos sinais adquiridos pelos sensores;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 consiste nesta breve introdução sobre o assunto a ser desenvolvido, motivações, justificativa e objetivos traçados.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre condicionamento de sinais e sistemas de aquisição de dados. Também será realizado uma revisão sobre sensores, filtros e conversores analógicos-digital.

No capítulo 3 apresenta-se especificações e projeto de sensores, projetos de filtros e especificação do conversor A/D

No capítulo 4 apresenta-se resultados de teste em ambientes de simulação para validação do modelo proposto.

No capítulo 5 apresenta-se as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

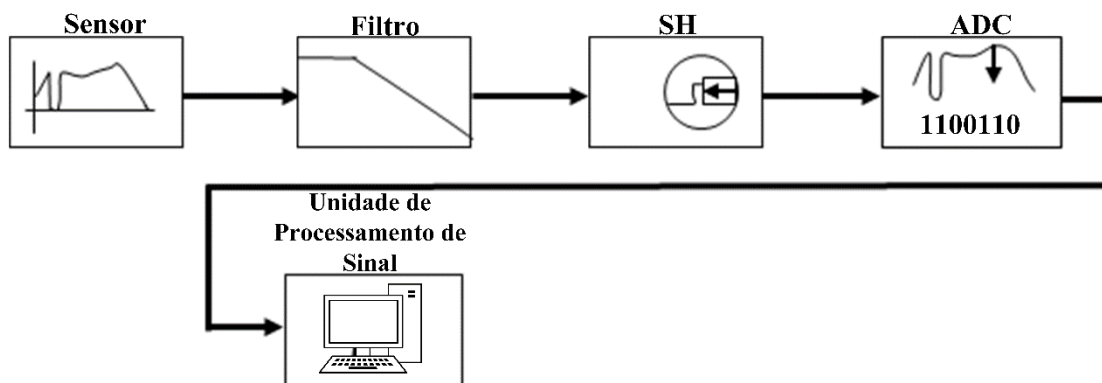
Neste capítulo fez-se uma breve revisão bibliográfica dos principais componentes de um sistema de condicionamento de sinais e aquisição de dados. Inicialmente foi abordado alguns conceitos básicos do processamento digital das grandezas físicas, isto é, trazer grandezas de fenômenos do mundo real para o processador de computadores (KONZEN, 2019).

Segundo Konzen (2019), é necessário que os sinais sejam medidos por sensores, permitindo o devido condicionamento para a correta aquisição de dados, que posteriormente, possam ser processados e apresentados de forma perceptível aos sentidos humanos. Este processo pode envolver sistemas de comunicação e transmissão de dados. E no final, apresentou-se o protótipo do conversor CC-CC Trifásico Bidirecional escolhido para condicionamento de sinais e aquisição de dados.

2.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A maior parte dos eventos do mundo real e a sua medição são de natureza analógica, isto é, a medição pode conduzir a uma gama de valores contínuos (BAPTISTA, 2005). Um sistema de aquisição de dados é qualquer arranjo que permita a transformação desses sinais analógicos em digitais para permitir a interpretação e manipulação por sistemas digitais (BALBINOT; BRUSAMENTO, 2015). A Figura 2.1 ilustra os principais elementos de um sistema de aquisição de dados genéricos em diagrama de blocos.

Figura 2.1 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados

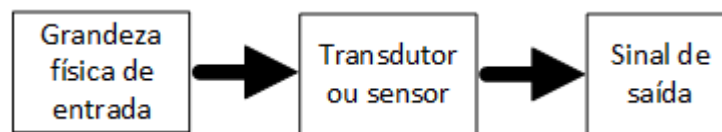


Fonte: Adaptado em (BALBINOT; BRUSAMENTO, 2015)

2.1.1 SENSORES E TRANSDUTORES

São os elementos que fazem a ligação direta entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados. Estes dispositivos respondem aos estímulos físicos de uma maneira específica, dessa forma grandezas físicas como temperatura, radiação solar, entre outros, são convertidas em grandezas elétricas (tensões, correntes) permitindo a sua leitura pelo sistema de medição como ilustra a Figura 2.2. Muitas vezes os termos “sensor” e “transdutor” são usados indistintamente (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). O Autor ainda define o transdutor como sendo instrumento completo que engloba sensor e todos os circuitos de interface capazes de serem utilizados numa aplicação industrial.

Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um sensor elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor

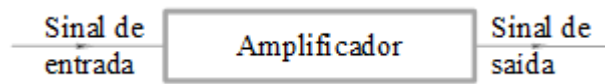
Na prática o que se espera de um sensor é que sua sensibilidade seja somente devido à quantidade em interesse (grandeza a ser medida) e que o sinal de saída seja inteiramente função da entrada. Porém, nenhuma medição é obtida em circunstâncias ideais e qualquer sensor sofre algum tipo de interferência e perturbações internas, como por exemplo, efeitos em temperatura, efeitos em pressões estáticas, efeitos devido a interferência magnética, etc.

2.1.2 CONDICIONADOR DE SINAIS

O condicionador de sinais tem como função converter um tipo de sinal (sinal de entrada) em outro (sinal de saída) em uma forma fácil de ler e compatível com sistemas de aquisição de dados (BOLTON, 2002). Quando um sinal elétrico for a saída do transdutor/sensor, o condicionador de sinais poderá ser um amplificador que aumenta o sinal. A razão entre saída e entrada geralmente é chamada de ganho de tal amplificador conforme a Figura 2.3.

$$ganho = \frac{saída}{entrada} \quad (0.1)$$

Figura 2.3 - Condicionador de sinais amplificador



Fonte: Elaborado pelo autor

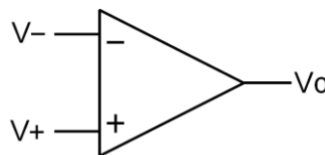
O condicionador de sinal começa com a medição de um sinal de saída do sensor elétrico e, em seguida, produz um sinal adequado para transmissão, exibição ou gravação, ou que melhor atenda aos requisitos de um equipamento ou dispositivo padrão subsequente. Normalmente consiste em circuitos eletrônicos que executam qualquer uma das seguintes funções: amplificação, deslocamento de nível, filtragem e entre outras (PALLÁS-ARENY; WEBSTER, 2001).

2.1.2.1 Amplificador Operacionais – AOPs

Atualmente, o amplificador operacional é um dos principais componentes no projeto de condicionamento de sinais e pode ser encontrado com diversas características (BALBINOT; BRUSAMENTO, 2015). Existem amplificadores operacionais construídos e otimizados para se consumir baixíssima energia, outros são otimizados para responder a sinais em ampla gama de frequência, e outros, para ter altos ganhos. De maneira geral, o AOP é indicado para situações em que são necessários ganhos altos, imunidade ao ruído, impedância de entrada alta e impedância de saída baixa, sem distorção e com estabilidade.

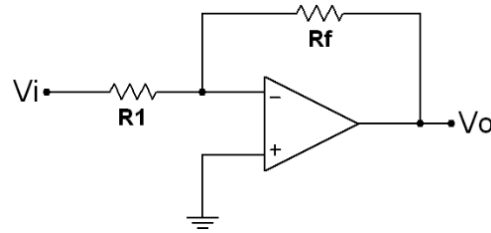
Em condições ideais, o amplificador operacional pode ser representado conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Representação do AOP ideal



Fonte: Adaptado em (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2015)

O modo de operação mais importante em circuitos com AOP é realimentação negativa, também conhecido como modo de operação em malha fechada, porém com resposta linear e ganho controlado. Na Figura 2.5 apresenta um AOP operando com realimentação negativa.

Figura 2.5 - AOP realimentação negativa

Fonte: Adaptado em (WENDLING, 2010)

2.1.2.2 Filtros ativos

Os filtros ativos são construídos com resistores, capacitores e AOPs. Eles são úteis abaixo de 1 MHz, têm ganho de potência e são fáceis de serem sintonizados. Os filtros podem separar os sinais desejados dos indesejados, bloquear sinais de interferência, melhorar e modificar sinais (MALVINO; BATES, 2016). Os filtros ativos têm se tornado cada vez mais úteis no campo da eletrônica em geral e com grande benefício para a instrumentação e as telecomunicações (PACTITIS, 2007). Dentro da área de instrumentação, é interessante ressaltar a eletromedicina ou bioeletrônica, na qual os equipamentos utilizados fazem grande uso dos filtros ativos (PERTENCE JR., 2003), na eletrônica de potência os filtros ativos são usados nos equipamentos com conceito de condicionamento da qualidade da energia.

Segundo Pertence Jr. (2003), existem inúmeras topologias de implementação para filtros ativos. As topologias mais comuns são:

- Realimentação Múltipla (MFB do inglês, *multiple-feedback*);
- Fonte de Tensão Controlada por Tensão (VCVS do inglês, *voltage-controlled voltage source*).

Ambas as topologias possuem algumas vantagens que as torna muito usuais na prática: boa estabilidade, baixa impedância de saída, facilidade de ajuste de ganho e de frequência, requerem poucos componentes externos, etc. A topologia MFB apresenta polaridade de saída invertida, ou seja, apresenta ganho invertido $-K$ ($K > 0$), essa característica não tem nenhum efeito prejudicial no desempenho da implementação desses filtros. A topologia VCVS costuma também ser denominada topologia de *Sallen e Key*. A denominação VCVS está relacionada com o fato do AOP, como amplificador de tensão, poder ser comparado a uma fonte de tensão cuja saída é função da tensão de entrada e do ganho do circuito (PERTENCE JR., 2003).

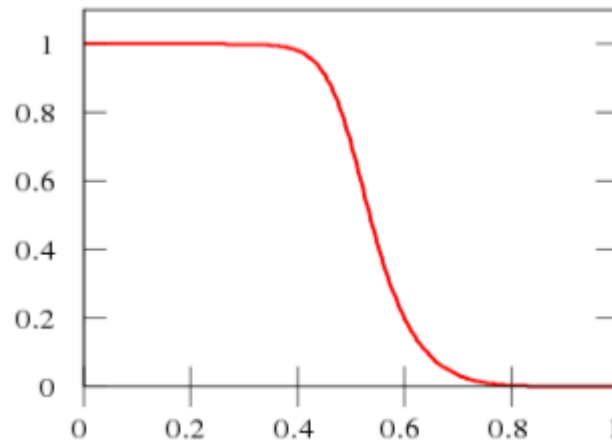
Principais classes filtros ativos

Filtro Butterworth: é um filtro cuja resposta é plana, ou seja, não apresenta *ripple* (ondulação); sendo assim, apresenta a variação monotônica (derivada da magnitude não muda de sinal a uma dada faixa de frequência). Os filtros de *Butterworth* possuem a seguinte função normalizada:

$$|H(j\omega)|^2 = H^2 \cdot \frac{1}{1 + (\omega)^{2n}} \quad (0.2)$$

sendo H^2 um fator de escala. Esta expressão matemática produz polos para filtro com características *Butterworth*, cuja resposta para um *Butterworth* é ilustrada na Figura 2.6

Figura 2.6 - Resposta de um filtro com característica *Butterworth*



Fonte: (BONFIM, 2010)

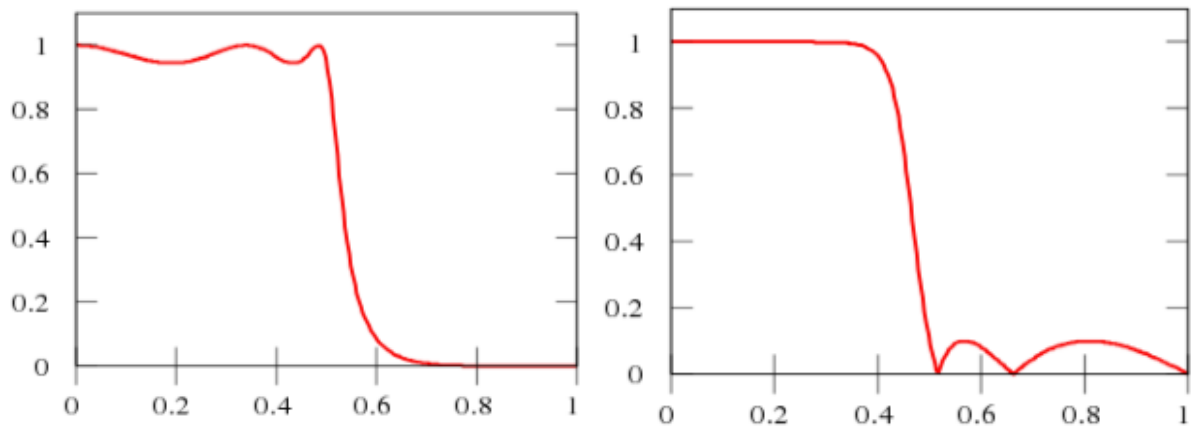
Filtros Chebyshev: são filtros que apresentam melhor resposta próxima à frequência de corte quando comparados aos filtros de *Butterworth*. Porém, apresenta *ripple* na banda de transição. Esses filtros são baseados no uso de polinômios especializados, que convergem rapidamente introduzindo um erro mínimo na aproximação. Esses polinômios são denominados polinômios de *Chebyshev*, em homenagem àquele que foi o primeiro a utilizá-los em seu estudo sobre motores a vapor. A característica desse filtro passa baixas é:

$$|H(j\omega)|^2 = H^2 \cdot \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot T_n^2(\omega)} \quad (0.3)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{r}{10}} - 1}$$

em que ε representa a magnitude do desvio da banda passante, r representa o *ripple* da banda passante e a expressão $T_n^2(\omega)$ é o polinómio de *Chebyshev* de ordem n . Os gráficos da Figura 2.7 apresentam a resposta de um filtro com característica de *Chebyshev*.

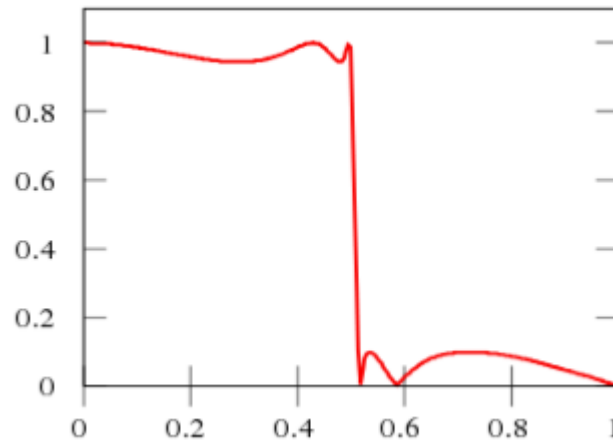
Figura 2.7 - Resposta de um filtro com característica *Chebyshev* (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: (BONFIM, 2010)

Os filtros de Cauer, ou filtros elípticos: apresentam *ripples* tanto na faixa de passagem como na faixa de corte. Todavia, são os que têm a melhor definição em termos de frequência de corte. Em outras palavras, a sua faixa de transição é bastante estreita. Esse tipo de filtro é muito utilizado em equipamentos que exigem alta precisão no ponto de corte, bem como uma atenuação acentuada na faixa de corte.

Figura 2.8 - Resposta de um filtro com característica elíptica

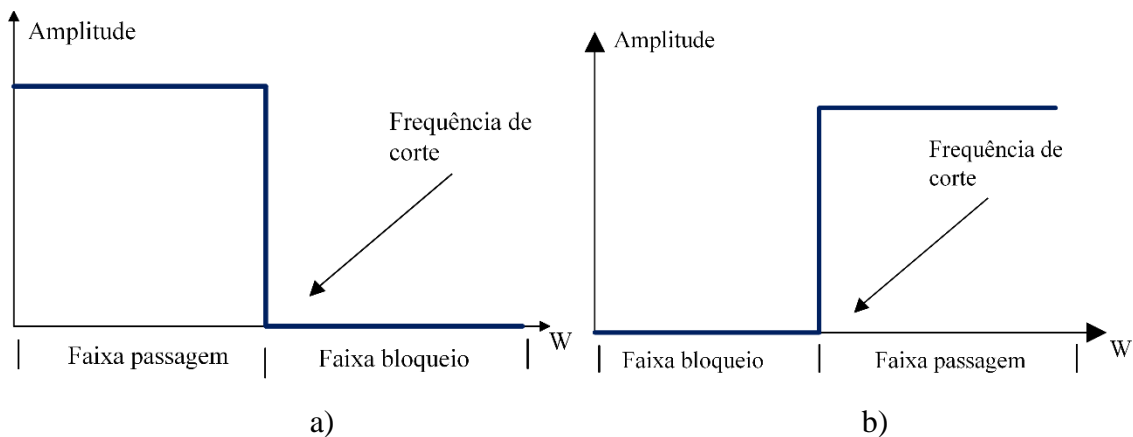


Fonte: (BONFIM, 2010)

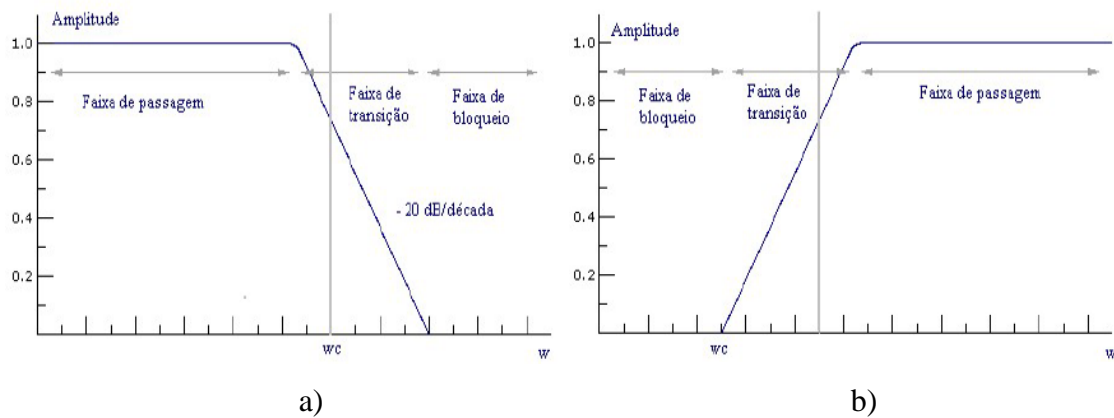
Topologia *sallen key* de filtros ativos

Em filtros ideais só existem duas faixas: a faixa de passagem e a faixa de bloqueio. Além disso, os filtros ideais possuem o mesmo ganho para toda faixa de passagem e ganho 0 para qualquer frequência na faixa de bloqueio. As Figuras 2.9 (a) e (b) mostram, respectivamente, um filtro passa baixas e um filtro passa-alta ideais. Esses filtros não são realizáveis na prática. Os filtros reais são mais parecidos com as Figura 2.10 (a) e (b), que apresentam as características de filtros passa baixas real e passa alta real, respectivamente. Nos filtros realizáveis existem três faixas: a faixa de passagem, a faixa de transição e a faixa de bloqueio (TELES; DUCCINI, 2015).

Figura 2.9 - Filtro ideal a) passa baixa e b) passa alta

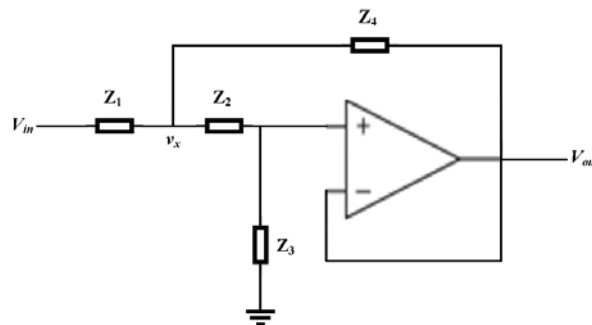


Fonte: Adaptado em (TELES; DUCCINI, 2015)

Figura 2.10 - Filtro realizável a) passa baixa b) passa alta

Fonte: (TELES; DUCCINI, 2015)

A função de transferência (FT) $H(s)$ de um filtro fornece muitas informações importantes do filtro. A Equação 2.4 apresenta $H(s)$ na forma geral de um filtro de segunda ordem:

Figura 2.11 – Estrutura básica para implementação de filtros PB, PA e PF

Fonte: Adaptado em (BONFIM, 2010)

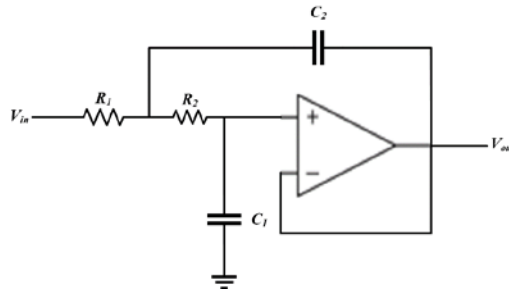
$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4} \quad (0.4)$$

Filtro Passa Baixa (PB), topologia *Sallen Key*

Dos muitos tipos de filtros que podem ser usados para deixar passar somente altas ou somente baixas frequências, o *Butterworth* é um dos mais utilizados (PACTITIS, 2007). Filtros complexos normalmente usam redes de primeira e segunda ordem. As redes de primeira ordem não são muito úteis porque só podem controlar a frequência central, enquanto que, usando filtros de segunda ordem podem

controlar além da frequência central também a impedância e o amortecimento (ou seu inverso que é o fator Q). A Figura 2.12 mostra uma configuração simples que faz uso de um amplificador operacional como seguidor de tensão do filtro passa baixa de segunda ordem.

Figura 2.12 - Filtro passa baixa (PB) segunda ordem, topologia *sallen key*



Fonte: Adaptado em (BONFIM, 2010)

onde

$$Z_1 = R_1, Z_2 = R_2, Z_3 = \frac{1}{sC_1}, Z_4 = \frac{1}{sC_2}$$

A função de transferência no domínio da frequência é:

$$H(s) = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + 2\pi \left(\frac{f_c}{Q}\right)s + (2\pi f_c)^2} \quad (0.5)$$

onde f_c é a frequência de corte e Q é fator de qualidade de filtro que são dados por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (0.6)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{C_1(R_1 + R_2)} = \frac{1}{2\pi f_c C_1 (R_1 + R_2)} \quad (0.7)$$

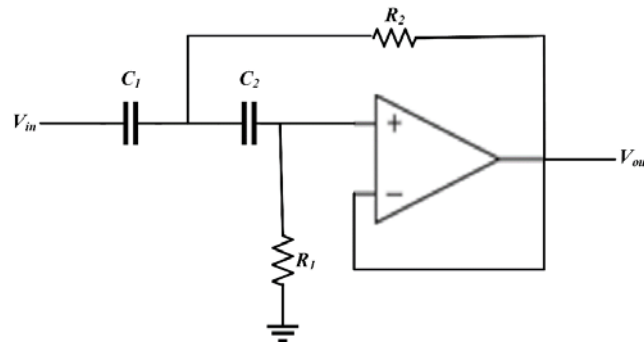
Substituindo (2.6) e (2.7) em (2.5), tem-se a função de transferência no domínio da frequência:

$$H(s) = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)s + (C_1C_2R_1R_2)s^2} \quad (0.8)$$

Filtro Passa Alta (PA), topologia *Sallen Key*

Um filtro PA pode ser obtido a partir da estrutura de um filtro PB, bastando, para tanto, fazer a permutação dos resistores por capacitores e dos capacitores por resistores. Essa permutação é denominada transformação $RC \rightarrow CR$. Esse tipo de filtro, rejeita frequências inferiores a uma frequência específica, ou seja, atenua baixas frequências. A Figura 2.13, mostra as configurações básicas de um filtro passa alta de segunda ordem.

Figura 2.13 - Filtro passa alta (PA) segunda ordem, topologia *sallen key*



Fonte: Adaptado em (BONFIM, 2010)

$$Z_1 = \frac{1}{sC_1}, Z_2 = \frac{1}{sC_2}, Z_3 = R_1, Z_4 = R_2,$$

A função de transferência no domínio da frequência é:

$$H(s) = \frac{(s)^2}{s^2 + 2\pi \left(\frac{f_c}{Q}\right) s + (2\pi f_c)^2} \quad (0.9)$$

A frequência de corte f_c e fator da qualidade Q do filtro são dados por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (0.10)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_2 (C_1 + C_2)} = \frac{1}{2\pi f_c R_2 (C_1 + C_2)} \quad (0.11)$$

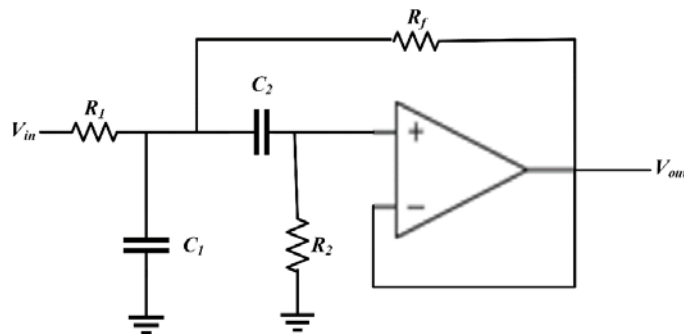
Substituindo (2.10) e (2.11) em (2.9), tem-se a função de transferência no domínio da frequência:

$$H(s) = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)s + (C_1C_2R_1R_2)s^2} \quad (0.12)$$

Filtro Passa Faixa (PF), topologia *Sallen Key*

O filtro PF é aquele que permite a passagem da entrada para a saída de sinais cujas frequências estejam compreendidas entre dois valores, denominados frequência de corte inferior e frequência de corte superior. Idealmente para sinais com frequências abaixo da frequência de corte inferior, ou para sinais com frequências acima da frequência de corte superior, será ofertado ganho de tensão nulo, enquanto que para sinais com frequências compreendidas entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior, o ganho de tensão ofertado pelo filtro ao sinal de entrada será o ganho máximo (CARVALHO, 2020).

Figura 2.14 - Filtro passa faixa (PF) segunda ordem, topologia *sallen key*



Fonte: Adaptado em (BONFIM, 2010)

A função de transferência no domínio da frequência é:

$$H(s) = \frac{s}{s^2 + \left(\frac{f_0}{Q}\right)s + f_0^2} \quad (0.13)$$

A frequência de corte f_c e fator da qualidade Q do filtro são dados por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_f + R_1}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_f}} \quad (0.14)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_1 + R_f}{R_1 R_f R_2 C_1 C_2}}}{\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right)} = \frac{2\pi f_0}{\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right)} \quad (0.15)$$

Substituindo (2.14) e (2.15) em (2.13), tem-se a função de transferência no domínio da frequência:

$$H(s) = \frac{\frac{s}{R_1 C_1}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right)s + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_f R_2 C_1 C_2}\right)} \quad (0.16)$$

2.1.3 CONVERSOR A/D

São dispositivos (ADC ou A/D) que convertem um nível de tensão (entrada analógica) em um número binário (saída digital), normalmente a relação entre tensão de entrada e o número de saída é linear. O processo de conversão analógico-digital (A/D) é mais complexo e consome mais tempo que D/A, entretanto, as técnicas empregadas fornecem uma compreensão dos fatores que determinam o desempenho de um ADC (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011). A principal característica a ser observada num conversor analógico-digital é a sua taxa de desempenho, ou seja, a sua taxa de processamento (*throughput*). Segundo teorema de *Nyquist* uma entrada deve ser amostrada no mínimo a uma taxa duas vezes mais rápida que a componente de frequência mais alta do sinal a ser adquirido.

Segundo Balbinot & Brusamento (2015), para escolha correta de um ADC são considerados estas características básicas:

Resolução ou erro de quantização: é a maior diferença entre qualquer tensão de entrada em relação ao número de saída. Como existe forte relação entre resolução e o número de bits do conversor, normalmente utiliza-se o termo “resolução de n bits”;

Tempo de conversão: tempo necessário para produzir a saída digital após o início da conversão;

Taxa de conversão: é a maior taxa que o ADC pode realizar as conversões. Para ADCs simples, a máxima taxa é o inverso do tempo de conversão;

Estabilidade à temperatura: é a insensibilidade das características anteriores às alterações da temperatura.

Para evitar a reprodução de sinais amostrados em uma conversão A/D que não caracterizam o original, o fenômeno conhecido por recobrimento (*aliasing*), deve-se, segundo o teorema de Shannon, garantir que a frequência de amostragem seja igual a frequência de Nyquist (OLIVEIRA FILHO, 2015). O objetivo do *filtro antialiasing* é de eliminar ou reduzir as frequências desnecessárias, reduzindo a largura de banda do circuito, o que ajuda na minimização do ruído.

2.2 CONVERSORES CC-CC ISOLADOS BIDIRECIONAIS

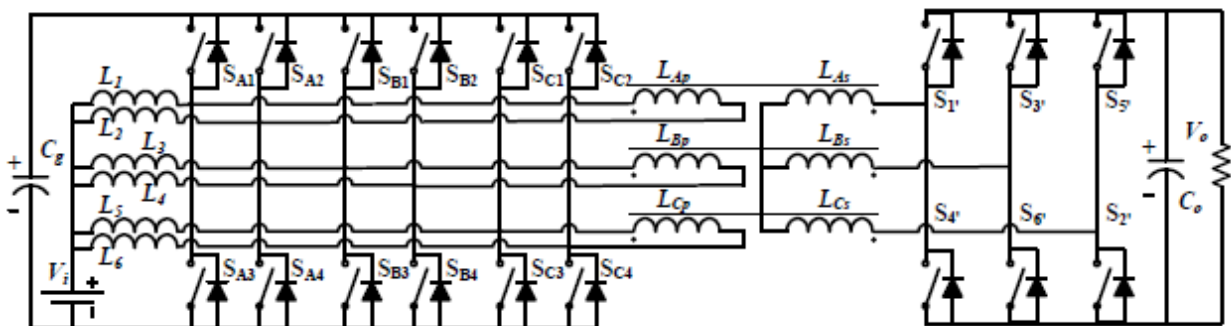
A maioria dos conversores CC-CC usados nas pesquisas são alimentados por tensão (DONCKER; DIVAN; KHERALUWALA, 1991; HART, 2011). No entanto, para sistemas que exibem dispositivos de armazenamento de energia, a alimentação em tensão não é adequado, tendo em conta que este tipo de topologia proporciona elevadas ondulações de correntes que possibilita a redução da vida útil destes dispositivos (OLIVEIRA, 2018). Com isso, segundo Oliveira (2018) os conversores baseados no DAB alimentado em corrente apresentam uma solução eficiente quando o sistema possui dispositivos armazenadores de energia, como por exemplo, banco de baterias. Algumas vantagens desta topologia são: baixas ondulações na corrente de entrada, ampla faixa de variação da tensão nos barramentos e capacidade de multiportas em uma topologia integrada (SHI et al., 2015). Portanto, com base nas características dos conversores isolados alimentados em corrente, com duas portas, encontrados na literatura, permitiu-se projetar o conversor utilizado para aquisição de dados.

2.2.1 CONVERSOR PROPOSTO

A topologia utilizada para aplicação no sistema da aquisição de dados é apresentada na Figura 2.15. Trata-se do conversor proposto por Oliveira Filho (2015) adaptado para ser alimentado em corrente e os parâmetros utilizados nas simulações foram definidos no trabalho de Oliveira Filho et al. (2017) e Costa (2018). A transferência de energia entre os dois lados ocorre a partir da técnica conhecida como *phase shift* e o ajuste da razão cíclica é obtido através da modulação PWM na ponte primária, na ponte secundária a razão cíclica é fixa em 0,5.

O circuito proposto deve condicionar sinais de tensão de barramento capacitivo, bateria e na ponte secundário do conversor e sinais de corrente de indutores CC, da fonte de entrada e saída do conversor, adequando-os aos níveis de entrada do dispositivo de aquisição de dados, isolando-os galvanicamente, filtrando ruídos, além de proteger o sistema contra surtos de corrente e/ou tensão.

Figura 2.15 - Topologia do conversor proposta



Fonte: Adaptado em (COSTA, 2018; OLIVEIRA FILHO et al., 2017)

3 PROCEDIMENTO DE PROJETO PARA VALIDAÇÃO DE MODELO

A estrutura da topologia apresentada na Figura 2.15, conta com uma ponte completa por fase no primário e uma meia ponte por braço no secundário, os indutores na entrada garantem a alimentação em corrente e os capacitores realizam o grampeamento ativo da estrutura. A Tabela 3.1 mostra os valores utilizados na simulação e que foram empregados como base para a escolha dos sensores e componentes necessários para a construção e medição do conversor.

Tabela 3.1 - Especificações de projeto

Tensão de entrada (V_{bat})	48 V
Tensão do barramento capacitivo (V_C)	96 V
Potência de saída (P_o)	3,5 kW
Frequência de chaveamento (f_s)	20 kHz
Razão cíclica (D)	0,5
Corrente média da fonte de entrada ($I_{i,méd}$)	72,92 A
Corrente média dos indutores CC ($I_{L,méd}$)	12,15 A
Corrente máxima nos indutores CC $I_{L,máx}$	12,45 A
Ondulação nos indutores CC (ΔI_{CC})	0,61 A
Tensão de saída (V_o)	400 V

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 DIMENSIONAMENTO DE SENSORES

3.1.1 SENSORES DE CORRENTE DOS INDUTORES CC

Para medir a corrente dos indutores utilizou-se o sensor HO 25-NP fabricado pela LEM. A escolha desse sensor foi baseada em (OLIVEIRA, 2018), a estrutura de trabalho, embora diferente, apresenta características próximas a deste trabalho, principalmente com relação as correntes nos indutores, a principal característica do sensor é a saída isolada em tensão, outras características estão relacionadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características do sensor de corrente HO 25-NP

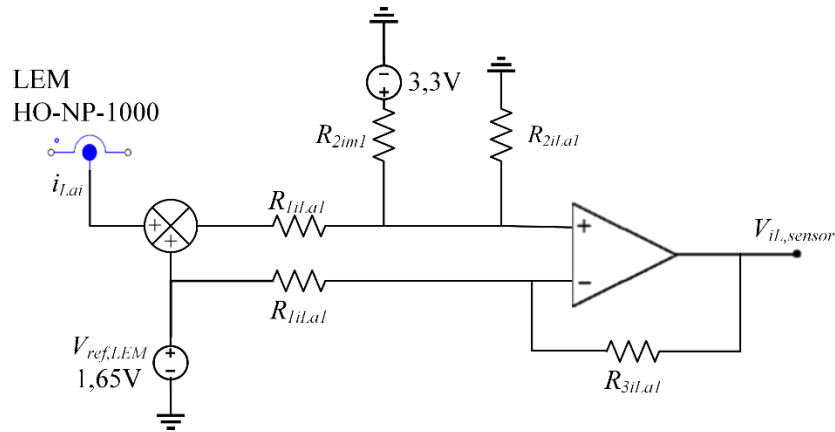
Tensão de alimentação	3,3 V
Corrente eficaz	25 A
Corrente de pico máximo (I_p)	62,5 A
Variação da tensão de saída para (I_p)	1,15
Corrente de pico mínimo ($-I_p$)	-62,5A
Variação de tensão de saída para ($-I_p$)	-1,15
Ganho do sensor ($G_{I_L, sen}$)	0,032

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como no trabalho de Oliveira (2018), o valor máximo de corrente nos indutores $I_{L,máx}$ é significativamente menor do que o valor máximo do sensor que é de 62,5A, dessa forma, optou-se por adicionar um circuito de ganho em série com o sensor que permite melhorar a aquisição dos dados. A estrutura utilizada foi proposta por Guimarães (2016) e, trata-se de um circuito amplificador diferencial (Figura 3.1).

Esse circuito tem por finalidade, além de oferecer um ganho para a corrente medida, eliminar a tensão de *offset* do sensor, visto que o sensor possui um *offset* intrínseco de 1,65V, o circuito adiciona uma fonte de tensão de mesma magnitude a outra entrada. Como se trata de um circuito amplificador diferencial, entradas diferentes serão amplificadas ao passo que entradas iguais serão pouco amplificadas, desse modo, o circuito elimina o *offset* presente no sensor (GUIMARÃES, 2016). O ganho do circuito é dado por:

$$G_{real} = \frac{R_{3iLa1}}{R_{1iLa1}} \quad (0.17)$$

Figura 3.1 - Circuito de ganho do sensor de corrente nos indutores

Fonte: Adaptado em (OLIVEIRA, 2018)

e a tensão de saída do sensor $V_{iL,sensor}$ é dada por:

$$V_{iL,sensor} = (i_{L,máx} \cdot G_{iL,sen} \cdot G_{AMP}) + V_{ref,LEM} \quad (0.18)$$

onde G_{AMP} é o ganho do circuito que deve atuar sobre essa parcela, admite-se que a corrente máxima sobre o sensor é $1,5 \cdot i_{L,máx}$ e para esse caso a tensão de saída do sensor deve ser de 3,3 V pode-se calcular o valor do ganho analógico do circuito:

$$G_{AMP} = \frac{V_{iL,sensor} - V_{red,LEM}}{1,5 \cdot i_{L,máx} \cdot G_{iL,sen}} = \frac{3,3 - 1,65}{1,5 \cdot 12,45 \cdot 0,032} = 2,76. \quad (0.19)$$

Os valores comerciais de resistores R_{1iLa1} e R_{3iLa1} escolhidos são $5,6k\Omega$ e $15k\Omega$ dessa forma, o ganho real é dado por:

$$G_{real} = \frac{R_{3iLa1}}{R_{1iLa1}} = \frac{15 \cdot 10^3}{5,6 \cdot 10^3} = 2,68. \quad (0.20)$$

Portanto, o ganho de sensor é:

$$H_{iLa1} = G_{iL,sen} \cdot G_{real} = 0,032 \cdot 2,68 = 49,31 \cdot 10^{-3} \quad (0.21)$$

3.1.2 SENSOR DE TENSÃO DO BARRAMENTO CAPACITIVO

O sensor escolhido para esse fim foi o sensor LV 20-P fabricado pela LEM. O sensor em questão é isolado e sua saída é em corrente, algumas características podem ser vistas na Tabela 3.3.

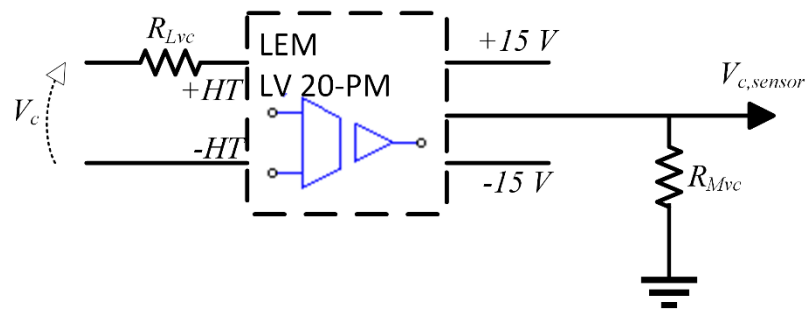
Tabela 3.3 - Características do sensor LV 20-P

Tensão de alimentação	$\pm 12 \dots 15$
Corrente RMS no primário	10 mA
Corrente RMS no secundário	25 mA
Tensão máxima de medição	500 V
Ganho do sensor $G_{c, sen}$	$2500 : 1000$

Fonte: Elaborado pelo autor

O esquemático do circuito é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Circuito do sensor de tensão no barramento capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o projeto desse circuito, algumas observações devem ser feitas, o projeto depende basicamente dos resistores R_{Lvc} e R_{Mvc} , o resistor R_{Lvc} é responsável por limitar a corrente no primário, esse valor não deve ultrapassar 10 mA , por razões de segurança, adotou-se a tensão equivalente 1,4 tensão do barramento capacitivo (V_c), desse modo o valor comercial de resistência escolhida foi de $12 \text{ k}\Omega$ e a corrente limitada a 8 mA , esse valor foi escolhido baseando em (3.6)

$$R_{Lvc} = \frac{1,4 \cdot V_c}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{1,4 \cdot 96}{10 \cdot 10^{-3}} = 13,44 \text{ k}\Omega. \quad (0.22)$$

A tensão de saída máxima medida será 3,3V devido ao controlador digital, dessa forma tem-se que:

$$G_{c,sen} = R_{Mvc} \cdot \frac{I_{RMS}}{V_{c,sensor}} \quad (0.23)$$

Para o resistor R_{Mvc} é dado por (3.8), sendo recomendado a utilização de um potenciômetro de 0-200 Ω para o ajuste da resistência desejada.

$$R_{Mvc} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 / 2,5) = 132 \Omega. \quad (0.24)$$

Portanto, o ganho do sensor V_c é definida por:

$$H_{vc} = \frac{3,3}{1,4 \cdot V_c} = 0,0245 \quad (0.25)$$

3.1.3 SENSOR DE CORRENTE DA FONTE DE ENTRADA

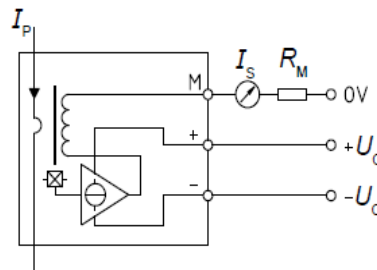
O sensor escolhido foi o LA 100-TP produzido pela LEM, esse sensor caracteriza-se por ser de efeito hall com saída em corrente, algumas características desse sensor podem ser vistas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características do sensor LA 100-TP

Corrente nominal do primário	100A
Corrente máxima no secundário	50 mA
Tensão de alimentação	$\pm 12 \dots 15$ V
Ganho	1 : 2000

Fonte: Elaborado pelo autor

A corrente a ser medida é de aproximadamente 73 A, que é relativamente próximo do valor nominal da corrente do sensor, o esquemático do circuito do sensor pode ser visto na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Circuito do sensor LA 100-TP

Fonte: LEM

A corrente máxima permitida para o secundário é de 50mA , por razões de segurança admite-se que o valor máximo de corrente no primário é de 1,5 vezes o valor médio a ser medido e, que o ganho do sensor é de $1/2000$, tem-se:

$$I_{\text{sec}} = 1,5 \cdot I_{p,\text{méd}} \cdot G_i = \frac{1,5 \cdot 73}{2000} = 54,75 \text{ mA} \quad (0.26)$$

De acordo com a Figura 3.3 do sensor de corrente, o sinal amostrado é fornecido em forma de corrente. Portanto, é necessária a utilização de um resistor na saída do sensor para converter o sinal de corrente amostrado em uma amostra de tensão. Este resistor de conversão é mostrado em (3.11).

$$R_M = \frac{V_{i,\text{sensor}}}{I_{\text{sec}}} = \frac{3,3}{54,75 \cdot 10^{-3}} \approx 56\Omega \quad (0.27)$$

3.1.4 SENSOR DE CORRENTE DA SAÍDA DO CONVERSOR

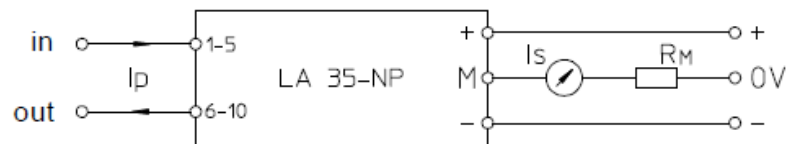
O sensor escolhido foi o LA 35-NP produzido pela LEM, o sensor em questão realiza medições a partir do efeito hall e possui saída em corrente, um fato interessante sobre esse sensor é que seus valores nominais e máximos de corrente de primário e secundário, e obviamente seu ganho, variam de acordo com o número de espiras utilizadas no primário, a corrente a ser medida é de aproximadamente $9,3 \text{ A}$, analisando o *datasheet* do sensor, notamos que esse valor é próximo do valor nominal de corrente com 3 espiras no primário, algumas características do sensor nessa configuração podem ser vistas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características do sensor LA 35-TP

Tensão de alimentação	$\pm 15V$
Corrente <i>rms</i> máxima no primário	$22 A$
Corrente <i>rms</i> máxima no secundário	$33mA$
Ganho	$3/1000$

Fonte: Elaborado pelo autor

O esquemático recomendado para a montagem do sensor está mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Circuito do sensor LA 35-TP

Fonte: LEM

O resistor R_M mostrado deve limitar a corrente em seu valor máximo de $33mA$, por razões de segurança admite-se que o valor máximo de corrente no primário é de 1,5 vezes o valor médio a ser medido, tem-se que:

$$I_{sec} = \frac{1,5 \cdot 9,3 \cdot 3}{1000} = 41,85 \text{ mA} \quad (0.28)$$

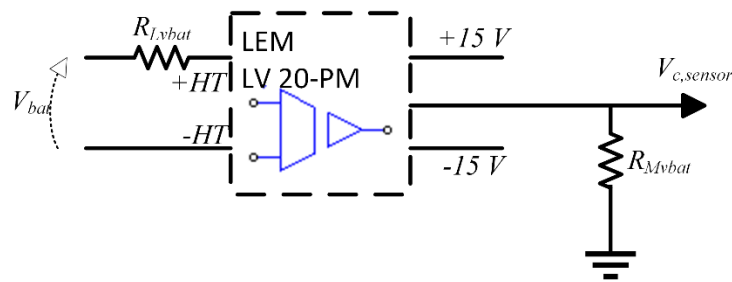
Como calculado em (3.11), o valor comercial de R_M escolhido é de 75Ω .

3.1.5 SENSOR DE TENSÃO DAS BATERIAS

O sensor escolhido é o LV 20-P produzido pela LEM, o sensor possui saída isolada em corrente, as características são mesmas já apresentadas na Tabela 3.3.

O esquemático do sensor pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Circuito do sensor LV 20-P



Fonte: Elaborado pelo autor

Como descrito no projeto da tensão do barramento capacitivo, algumas observações devem ser feitas sobre os resistores R_{Lvat} e R_{Mvbat} . O resistor R_{Lvc} é responsável por limitar a corrente no primário, esse valor não deve ultrapassar $10mA$, por razões de segurança, adotou-se a tensão equivalente $1,15$ tensão da bateria (V_{bat}), desse modo o valor comercial de resistência escolhida foi de $5,6k\Omega$ e a corrente limitada a $8,57mA$. esse valor foi escolhido baseando em (3.13)

$$R_{Lvat} = \frac{1,15 \cdot V_{bat}}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{1,15 \cdot 48}{10 \cdot 10^{-3}} = 5,52 \text{ k}\Omega. \quad (0.29)$$

A tensão de saída máxima medida será $3,3V$ devido ao controlador digital, dessa forma temos que:

$$G_{bat, sen} = R_{Mvbat} \cdot \frac{I_{RMS}}{V_{bat, sensor}} \quad (0.30)$$

Para o resistor R_{Mvbat} é dado por (3.15), sendo recomendado a utilização de um potenciômetro de $0-200 \Omega$ para o ajuste da resistência desejada.

$$R_{Mvbat} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 / 2,5) = 132 \Omega. \quad (0.31)$$

Portanto, o ganho do sensor V_{bat} é definido por:

$$H_{vbat} = \frac{3,3}{1,15 \cdot V_{bat}} = 0,06 \quad (0.32)$$

3.1.6 SENSOR DE TENSÃO NO SEGUNDO BRAÇO DO CONVERSOR

O sensor escolhido é o **LV 20-P** produzido pela **LEM**, o sensor possui saída isolada em corrente, as características são mesmas já apresentadas na Tabela 3.3 e o esquemático do sensor é a mesma já apresentada na Figura 3.5.

Como descrito no projeto do sensor de barramento capacitivo, algumas observações devem ser feitas sobre os resistores R_{Lvo} e R_{Mvo} . O resistor R_{Lvo} é responsável por limitar a corrente no primário, esse valor não deve ultrapassar $10mA$, por razões de segurança a tensão é 1,25 tensão do secundário (V_0), desse modo o valor comercial de resistência escolhida foi de $51k\Omega$ e a corrente limitada a $7,84mA$, esse valor foi escolhido baseando em (3.17).

$$R_{Lvc} = \frac{1,25 \cdot V_0}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{1,25 \cdot 400}{10 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ k}\Omega. \quad (0.33)$$

A tensão de saída máxima medida será $3,3V$ devido ao controlador digital, dessa forma temos que:

$$G_{vo, sen} = R_{Mvo} \cdot \frac{I_{RMS}}{V_{o, sensor}} \quad (0.34)$$

Para o resistor R_{Mvo} é dado por (3.19), sendo recomendado a utilização de um potenciômetro de $0-200 \Omega$ para o ajuste da resistência desejada é:

$$R_{Mvc} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 / 2,5) = 132 \Omega. \quad (0.35)$$

Portanto, o ganho do sensor V_{bat} é definida por:

$$H_{vo} = \frac{3,3}{1,25 \cdot V_o} = 0,0066 \quad (0.36)$$

3.2 PROJETO DE FILTROS PARA OS SENSORES

3.2.1 FILTROS DO SENSOR DA CORRENTE NOS INDUTORES

O chaveamento em alta frequência pode causar ruídos, estes por sua vez prejudicam a aquisição de dados, logo, é importante a utilização de um filtro, o modelo escolhido trata-se de um filtro passa baixa de segunda ordem *Sallen e key*, porque esse modelo causa menores defasagens (OLIVEIRA, 2018). O esquemático do circuito foi apresentado na Figura 2.12

A função transferência desse filtro no regime da frequência é dado por:

$$H(s) = \frac{1}{1 + C_{i2}(R_{i1} + R_{i2})s + (C_{i1}C_{i2}R_{i1}R_{i2})s^2} \quad (0.37)$$

A partir da equação (3.21), nota-se que a frequência natural e coeficiente de amortecimento são, respectivamente:

$$\omega_n = f_c \cdot 2\pi = \frac{1}{\sqrt{R_{i1}R_{i2}C_{i1}C_{i2}}} \quad (0.38)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{C_{i1}}{C_{i2}}} \quad (0.39)$$

Da literatura, um bom coeficiente de amortecimento é 0,7, desse modo, esse valor foi escolhido para projeto, fixando $C_1 = 1 \text{ nF}$ tem-se:

$$C_{i2} = \frac{C_{i1}}{\delta^2} = \frac{1 \cdot 10^{-9}}{0,7^2} = 2 \text{ nF} \quad (0.40)$$

Assim como no trabalho de Oliveira Filho (2015), a presença de componentes contínuas de corrente nos indutores a frequência de corte deve ser baixa, como a frequência de trabalho da estrutura é 20 kHz, optou-se por uma frequência de corte uma década atrás da frequência de trabalho do conversor (2 kHz) para o filtro, fixando $R_{i1} = R_{i2}$ tem-se:

$$R_{i1} = \frac{1}{2\pi f_c \cdot \sqrt{C_{i1}C_{i2}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}} = 56,3 \text{ k}\Omega \quad (0.41)$$

Os valores comerciais escolhidos podem ser vistos na Tabela 3.8.

Tabela 3.6 - Componentes do filtro para sensor corrente

Capacitor (C_{i1})	1 nF
Capacitor (C_{i2})	2 nF
Resistor (R_{i1})	56 k Ω
Frequência de corte (f_c)	2 kHz

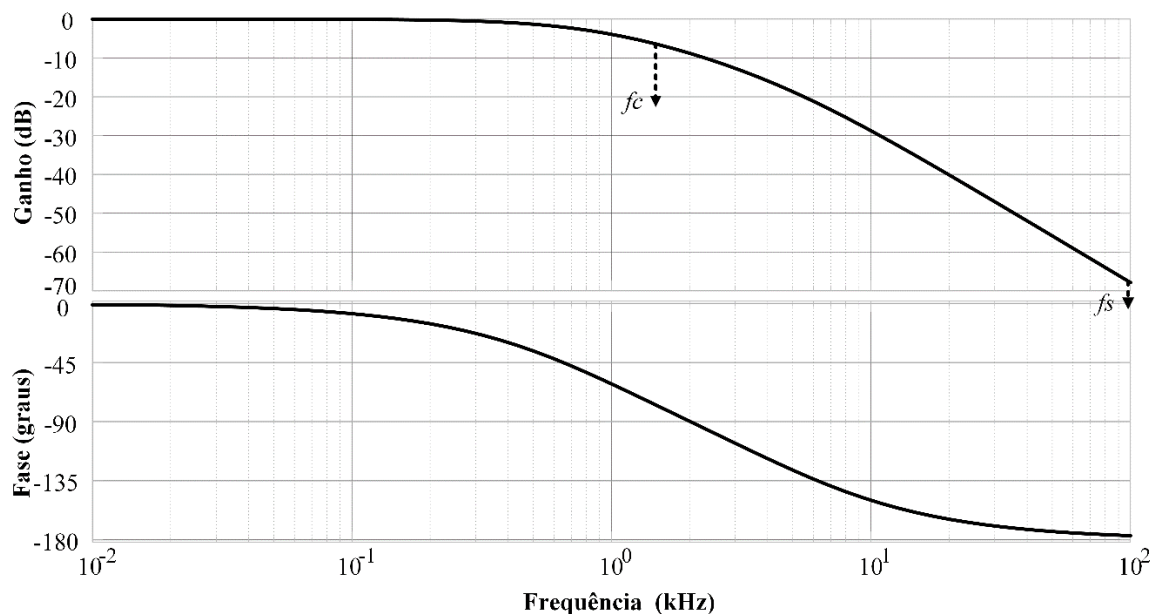
Fonte: Elaborado pelo autor

A função transferência é dada por:

$$H_{f,il}(s) = \frac{1,6 \cdot 10^8}{s^2 + 3,5 \cdot 10^4 s + 1,6 \cdot 10^8} \quad (0.42)$$

A Figura 3.6 apresenta o diagrama de Bode da função de transferência de filtro de sensor de corrente nos indutores. No gráfico, pode-se notar que o ganho é negativo, visto que corresponde uma atenuação de sinal. A partir da frequência de corte, de 2 kHz, o ganho passa a diminuir com 10 dB/dec.

Figura 3.6 - Diagrama de bode da função de transferência de filtro de sensor de corrente nos indutores



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 FILTRO DOS SENSORES DAS TENSÕES

O filtro utilizado é o mesmo já apresentado na Figura 3.6, a frequência de corte foi escolhida como sendo 10kHz, como sugerido em (OLIVEIRA, 2018). os valores dos componentes utilizados podem ser vistos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Componentes do filtro para sensor tensão

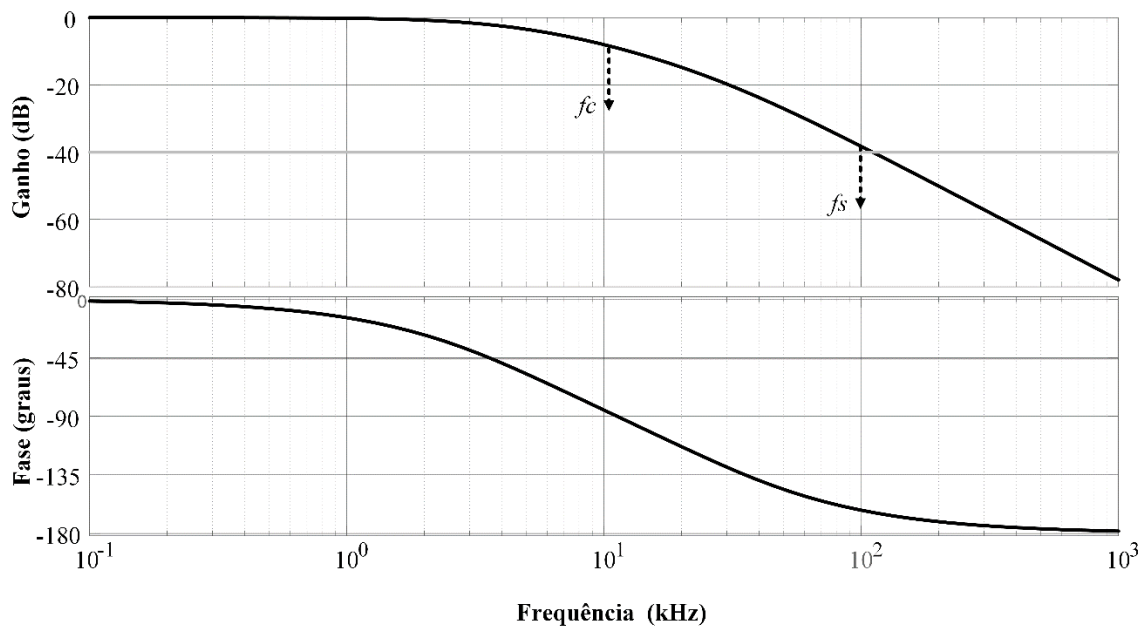
Capacitor (C_{v1})	1 nF
Capacitor (C_{v2})	2 nF
Resistor (R_{v1})	10 kΩ
Frequência de corte (f_c)	10,73 kHz

Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, a função de transferência do filtro é dada por

$$H_{f,v}(s) = \frac{5 \cdot 10^9}{s^2 + 2 \cdot 10^5 s + 5 \cdot 10^9} \quad (0.43)$$

Figura 3.7 - Diagrama de bode da função de transferência de filtro de sensor das tensões



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.7 apresenta o digrama de bode da função transferência de filtro de sensor das tensões. No gráfico, pode-se notar que o ganho é negativo, visto que corresponde uma atenuação de sinal. A partir da frequência de corte, de 10 kHz, o ganho passa a diminuir com 20 dB/dec.

3.3 CONVERSOR A/D

A Tabela 3.8 apresenta características do conversor A/D adotado para realizar a captura digital do sinal amostrado pelos sensores. O modelo proposto é uma unidade de microcontrolador TMS de ponto flutuante projetada para aplicações avançadas de controle de circuito fechado, como motores industriais; inversores solares; veículos elétricos e transporte; sensoriamento e processamento de sinal.

A partir dos dados de resolução e tensão de amostragem é possível obter o ganho de quantização em (3.29) do sistema de realimentação. Por se tratar dos sinais que operam de forma contínua, não é necessária uma elevada taxa de amostragem, portanto adotou-se uma frequência de amostragem indicada em (3.28), ou seja, na mesma frequência da comutação do conversor

Tabela 3.8 - Características de conversor A/D utilizado

Fabricante	Texas Instruments
Modelo	TMS320F28379D
Número de bits (n_{bits})	12 bits
Clock de conversão	5 a 50 MHz
Taxa de amostragem	3,5 msp/s
Tensão de amostragem $V_{A/D}$	3,3 V
Número de canais	8 canais

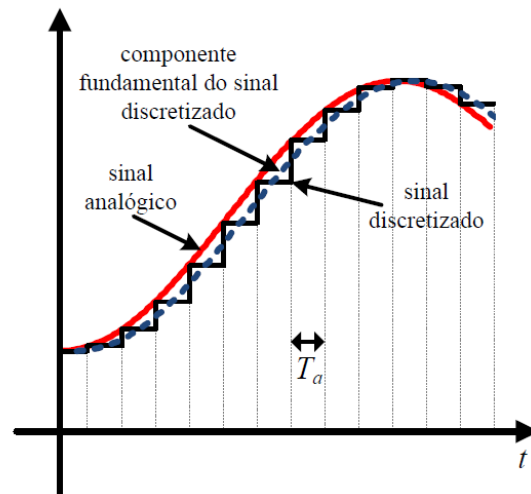
Fonte: Elaborado pelo autor

$$f_a = f_s = 20kHz \quad (0.44)$$

$$K_{A/D} = \frac{2^{n_{bits}} - 1}{V_{A/D}} \rightarrow K_{A/D} = \frac{2^{12} - 1}{3,3} = 1240,91 \quad (0.45)$$

Como descrito no trabalho de Oliveira Filho (2015), o circuito de S&H mencionado previamente é modelado matematicamente como um retentor ideal e chamado de segurador de ordem zero (ZOH do inglês, *zero order hold*). O atraso de fase que este elemento insere na aquisição pode ser analisado a partir de um exemplo de amostragem e reconstituição de um sinal na Figura 3.7.

Figura 3.8 - Efeito de Amostragem e Retenção: comparação de um sinal analógico com a sua versão reconstruída (componente fundamental).



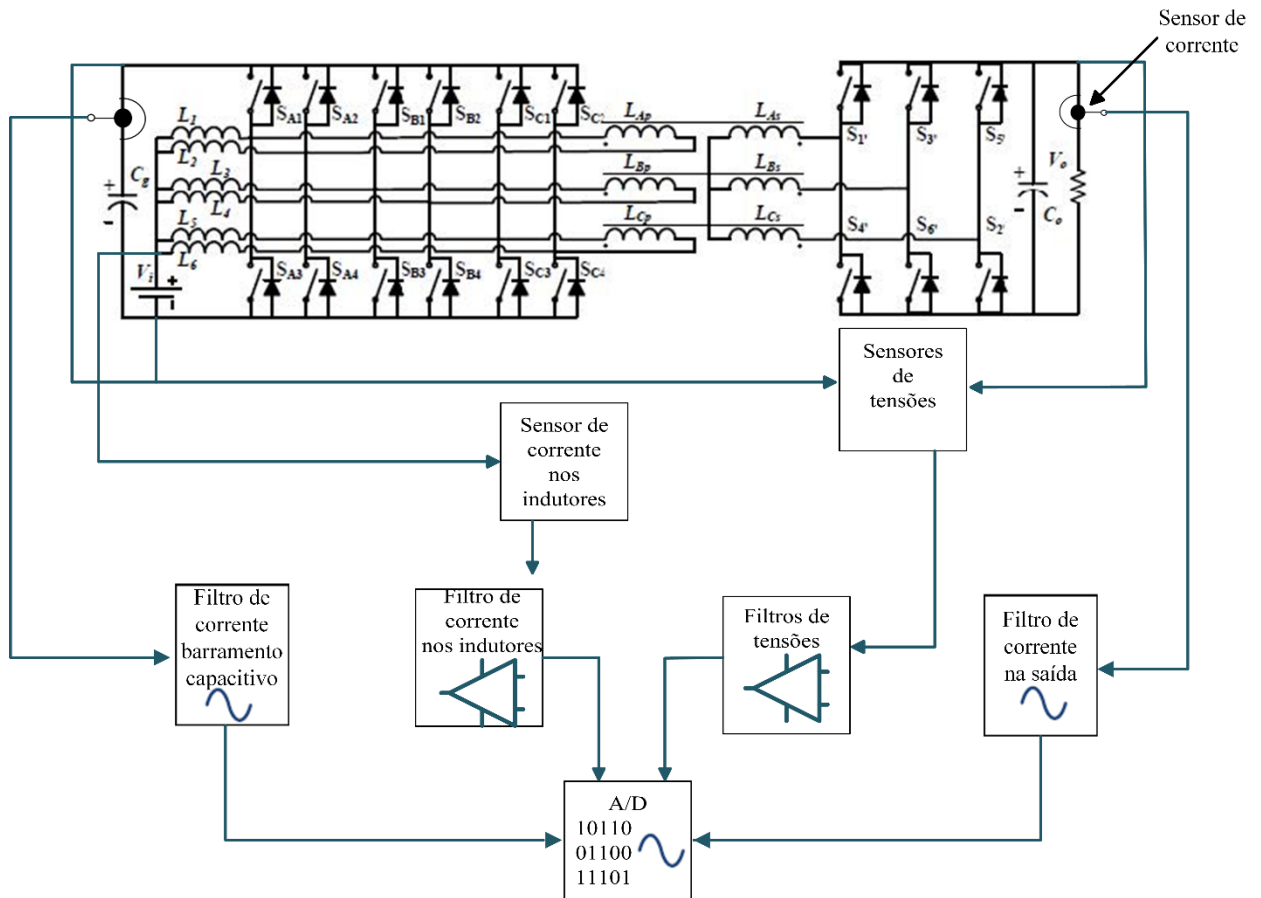
Fonte: (OLIVEIRA FILHO, 2015)

3.4 CONDICIONAMENTO DE SINAIS E AQUISIÇÃO DE DADOS

A Figura 3.9, apresenta a proposta do conversor CC-CC juntamente com sistema da aquisição de dados nas tensões dos barramentos capacitivos, bateria e na saída do conversor e das correntes nos indutores, na fonte de entrada e na saída do conversor. O sistema é composto por sensores de tensões e correntes, filtro para eliminar ruídos de sinal amostrado, conversor analógico-digital e processamento dos sinais, através do *C block* simplificado.

Os sensores e filtros captam o sinal de referência para controle, o conversor A/D realiza o processo de amostragem e retenção (S&H do inglês, *sample and hold*), esse processo discretiza os dados obtidos pelos sensores tornando possível a supervisão, monitoramento e/ou controle da estrutura, para realizar o ajuste e amplificação do sinal de controle.

Figura 3.9 - Conversor proposto juntamente com sistema da Aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor

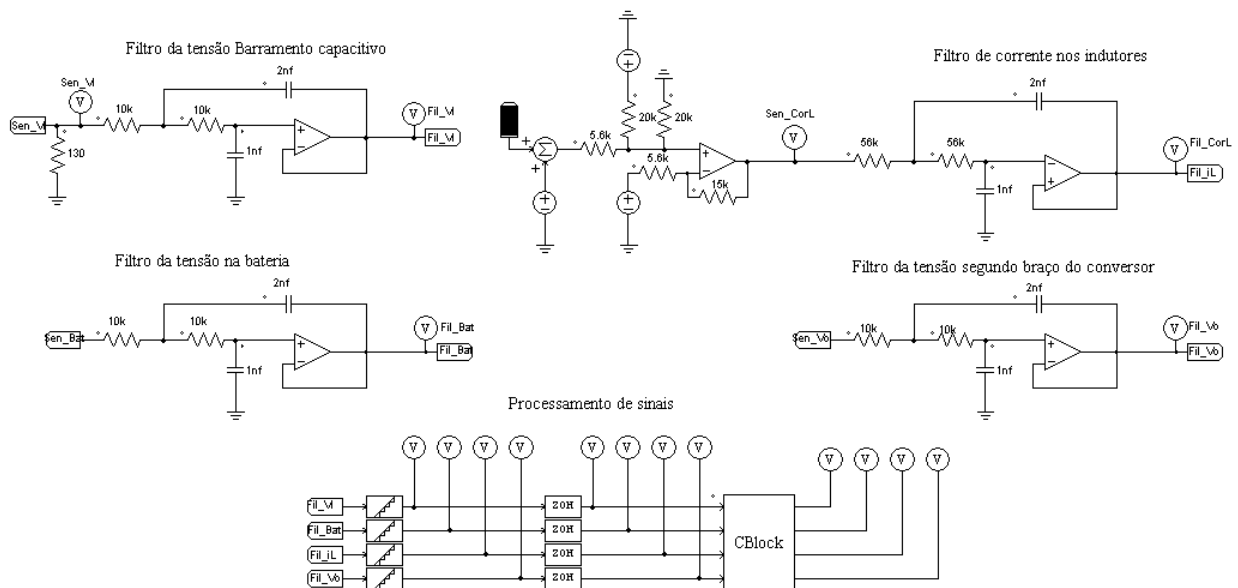
4 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Todas as simulações do conversor sob estudo foram realizadas utilizando a ferramenta computacional PSIM[®]. A Figura 4.2 ilustra o circuito do conversor onde no lado primário há três pontes H enquanto que no secundário há um inversor trifásico. As duas pontes são conectadas através de um transformador isolador de alta frequência em uma configuração delta aberto/estrela.

Para fazer as verificações necessárias para avaliar se o conversor está funcionando adequadamente, optou-se por realizar medições de corrente indutores CC, além de monitorar a tensão nas baterias, no grampeamento capacitivo e na saída do secundário do conersor.

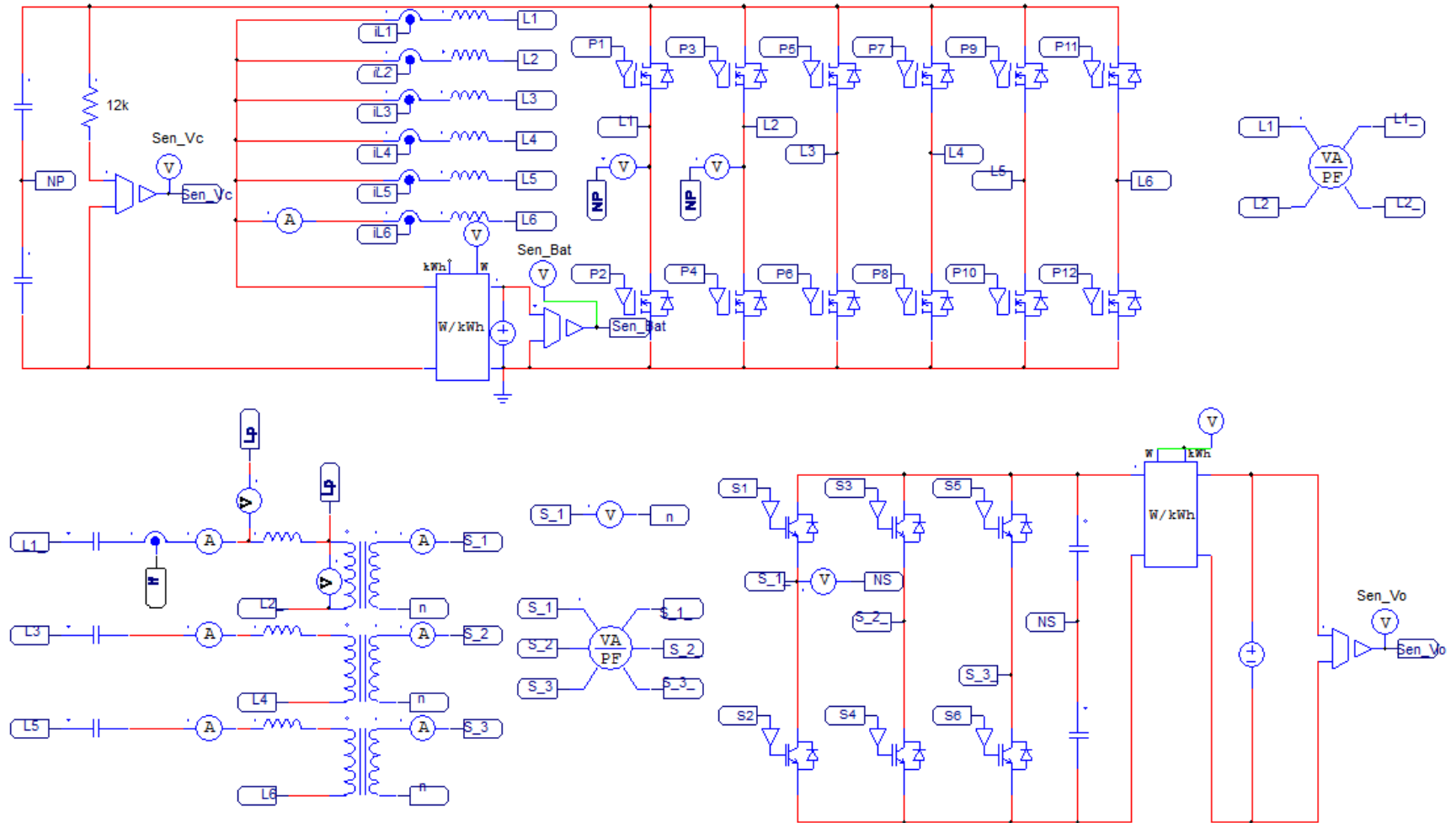
Na Figura 4.1, ilustra-se o circuito de aquisição de dados e condicionamento de sinais. Esta configuração permite a aquisição e processamento de sinais adquiridos pelos sensores descritos na seção 3.1 deste trabalho.

Figura 4.1 - Circuito da aquisição de dados e condicionamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo autor

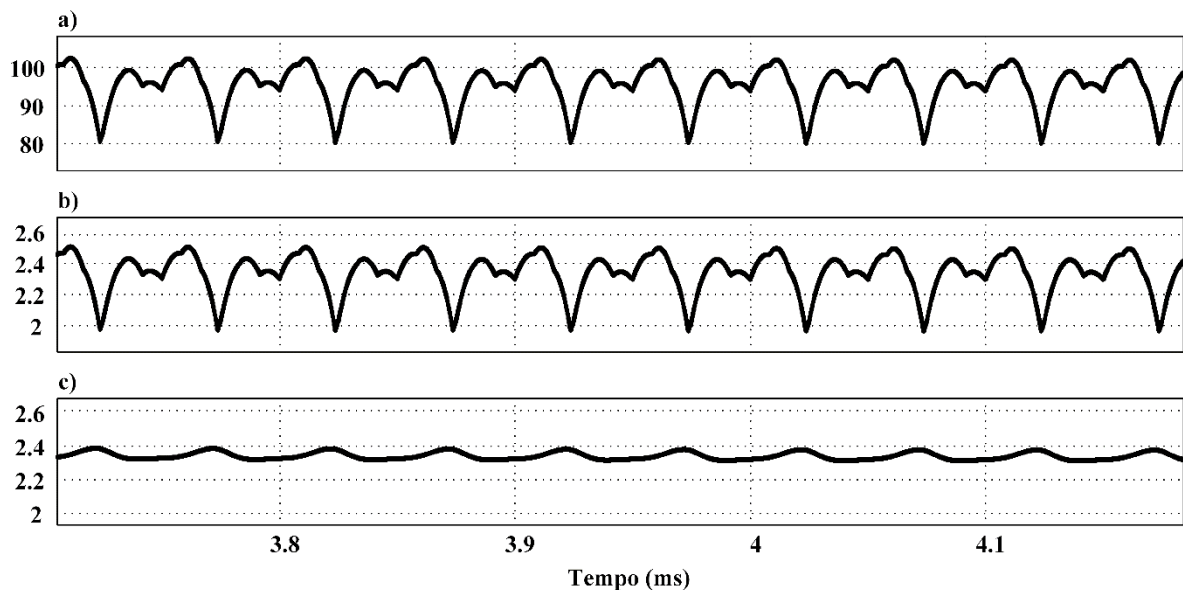
Figura 4.2 - Circuito do conversor



Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 4.3 mostram sinais de tensão de barramento capacitivo: o sinal original da tensão (a) apresenta um valor médio de 95,51V que está aproximadamente ao valor do projeto 96V, esse sinal foi captado pelo sensor (b) e que foi atenuado de acordo com o ganho especificado no projeto. Nota-se que devido o funcionamento do conversor, inclui que a forma de onda possua harmônicos que afetaria transformação direta, para isso utilizou-se filtro (c) com função de eliminar harmônicos de alta frequência para deixar forma de onda um pouco retinha que facilite o trabalho do sistema digital. O valor médio do sinal original teve uma redução e a ondulação diminuiu-se de aproximadamente 23% após a passagem pelo filtro.

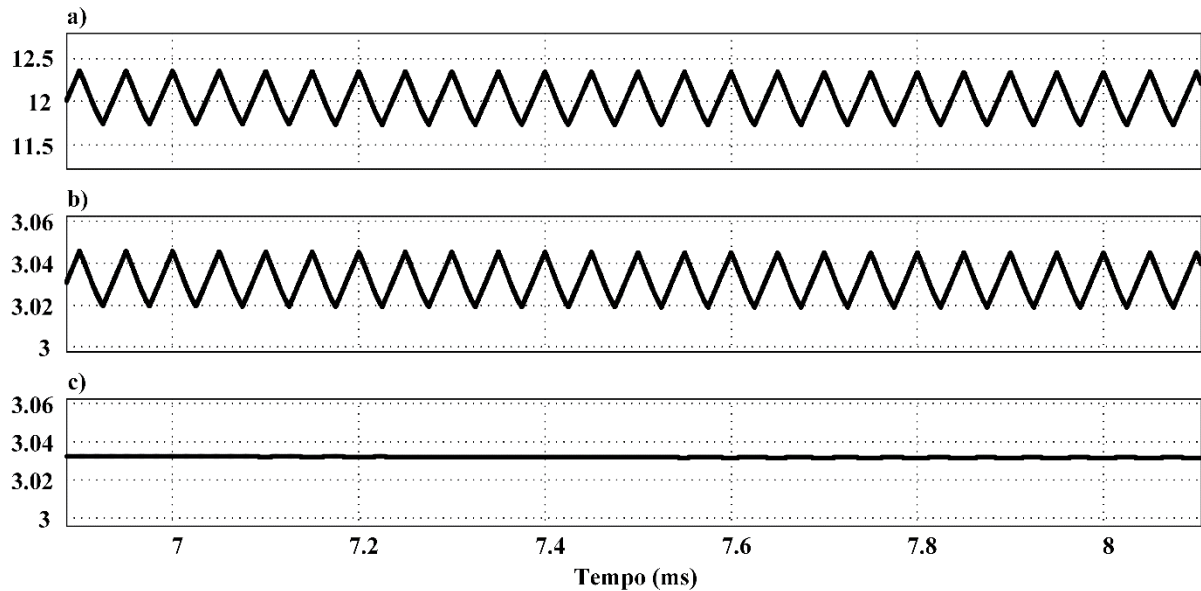
Figura 4.3: Sinais na tensão de barramento capacitivo (V) a) sinal original; b) antes do filtro e c) após do filtro



Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 4.4, ilustram sinais de corrente em amperes (a) e tensão captados pelo sensor de corrente nos indutores antes (b) e depois (c) da atuação do filtro em volts. O valor medido antes do filtro foi aproximado conforme ganho especificado no projeto, houve uma variação no valor médio do sinal original após a passagem pelo filtro com uma redução de ondulação de aproximadamente 11,98%, redução essa que teve como função reduzir harmônicos.

Figura 4.4 - Sinais de corrente (A) a) sinal original e de tensões nos indutores (V) a) antes do filtro; b) após o filtro

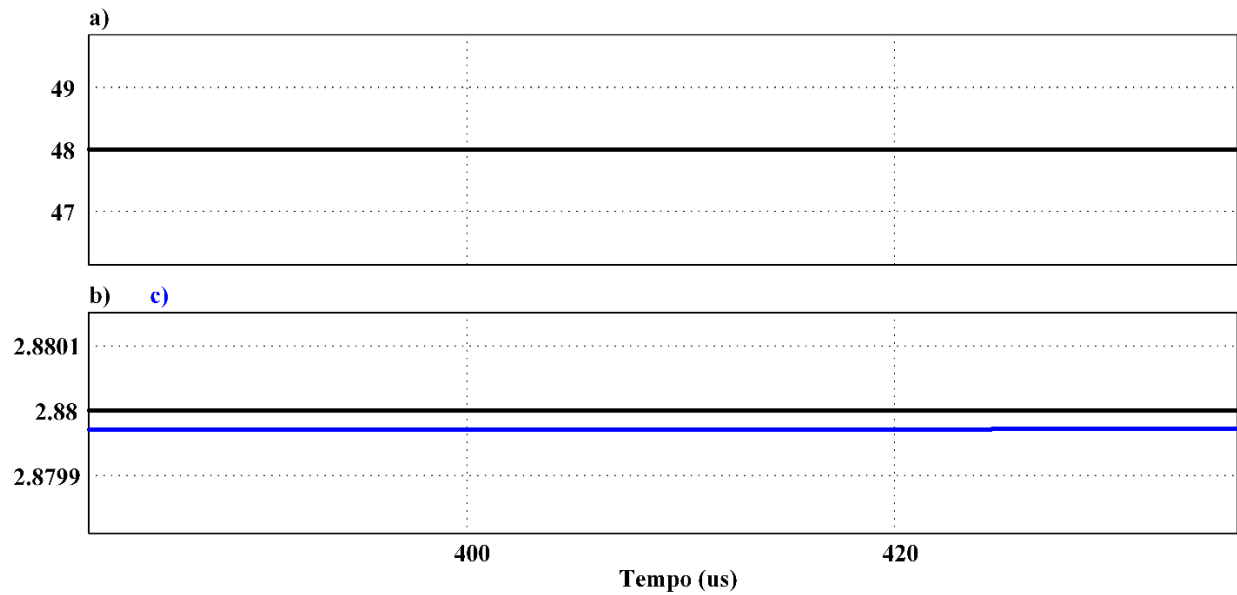


Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 4.5 ilustram sinais de tensões da bateria a) sinal original; b) antes e c) depois da atuação do filtro. O valor medido pelo sensor foi aproximado conforme ganho especificado no projeto. Houve uma diminuição no valor médio do sinal original após a passagem pelo filtro.

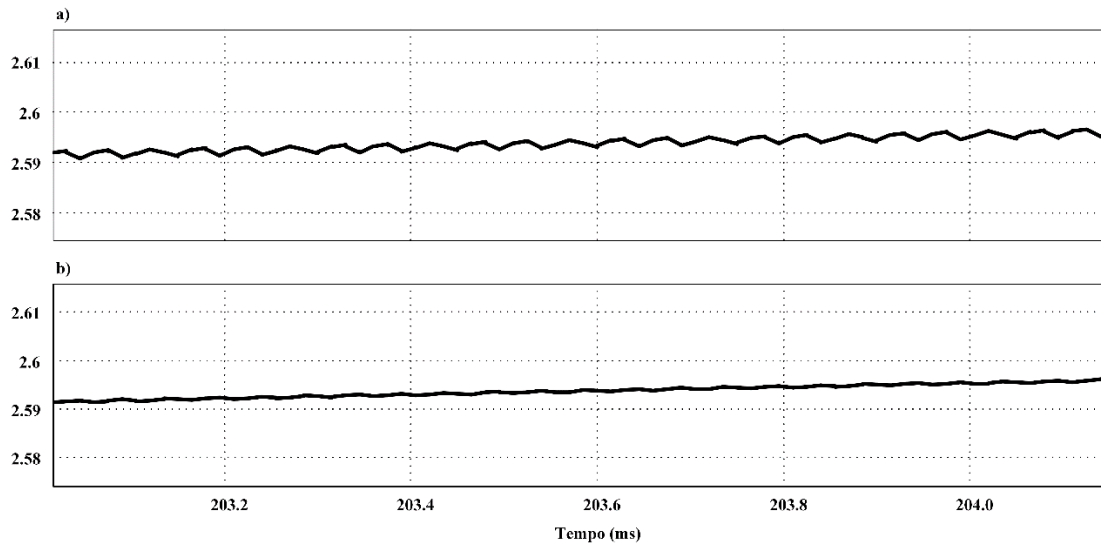
Para as Figuras 4.6, apresentam-se sinais de tensão na a) saída do segundo braço do conversor b) antes da atuação do filtro e c) depois do filtro. Foi verificado uma redução da ondulação de aproximadamente 23,53% do sinal após o filtro em relação antes da atuação do filtro. Além desta redução da ondulação, o valor medido foi aproximado conforme ganho especificado no projeto.

Figura 4.5 - Sinais de tensão na bateria (V) a) original; b) antes do filtro e b) após o filtro



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.6 - Sinais de Tensão na saída do conversor (V) a) saída do sensor; b) saída de filtro



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta o estudo de um sistema de condicionamento de sinais e aquisição de dados para um conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente. O projeto teve notável contribuição para a formação em Engenharia de Energias, não apenas pela contribuição técnica, mas pelo desafio de lidar com todas as etapas e adversidades deste trabalho.

Além de aprimorar e exigir um aprofundamento na teoria e nas técnicas de condicionamento de sinais, a produção deste trabalho, exigiu uma revisão e estudo de diversas áreas da Engenharia. É válido destacar que o desenvolvimento deste projeto envolveu, diretamente, conceitos relacionados a sinais e sistemas, eletrônica analógica e digital, circuitos elétricos, entre diversas outras, muitas vezes já abordadas durante a graduação.

Pôde-se notar que tanto o circuito de condicionamento de corrente nos indutores quanto a de tensões de barramento capacitivo, bateria e saída do lado secundário do conversor apresentam saídas adequadas à entrada do conversor A/D que variam entre 0 a 3,3 V.

Ao analisar os resultados obtidos pela simulação no PSIM[®], pode-se concluir que não houve grandes discrepâncias em relação aos valores esperados. O resultado final pode ser considerado uma solução simples, eficaz e precisa para o sistema proposto.

Como trabalho futuro, propõe-se: 1) desenvolvimento do protótipo do conversor e do sistema proposto para validar experimentalmente a modelagem realizada e 2) desenvolvimento de algoritmos de monitoramento e supervisão de variáveis adquiridos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

BALBINOT, A.; BRUSAMENTO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**, volume 1. 2^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BAPTISTA, M. **Sistema de aquisição de dados**. Disponível em:

<http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/maeb/im/Teorica_Bibliografia/Cap_E_Sistemas de Aquisição de Dados/1-Introdução/Texto de Estudo - Sistemas de Instrumentação - Capitulo 4.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2019.

BASTOS, R. F. **Sistema de Gerenciamento para a Integração em CC de Fontes Alternativas de Energia e Armazenadores Híbridos Conectados a Rede de Distribuição via Conversores Eletrônicos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2016.

BOLTON, W. **Instrumentação & Controle - Sistemas, transdutores, condicionadores de sinais, unidades de indicação, sistemas de medição, sistemas de controle, respostas de sinais**. São Paulo: Hemus, 2002.

BONFIM, M. J. C. **CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES: Filtros ativos**. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/marlio/te054/capitulo5.pdf>>. Acesso em: 3 jan. 2020.

CARVALHO, H. H. DE. **FILTROS ATIVOS – Primeiras noções**. Disponível em:

<[http://professorhumbertoifsp.pro.br/Filtros Ativos.pdf](http://professorhumbertoifsp.pro.br/Filtros%20Ativos.pdf)>. Acesso em: 7 fev. 2020.

CORRÊA, J. M. **Desenvolvimento e Implementação de uma Micro-Rede Avançada de Alta Frequência para Integração de Fontes Alternativas de Energia**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

COSTA, G. N. D. S. **Conversor CC-CC Trifásico Isolado Bidirecional Alimentado em Corrente com Comutação Suave**. [s.l.] Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB, 2018.

DEMASCENO, A. C. H. **Controle preditivo de corrente aplicado a um controlador de carga de baterias baseado em conversor CC-CC bidirecional**. [s.l.] Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

DONCKER, R. W. A. A. DE; DIVAN, D. M.; KHERALUWALA, M. H. A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 27, n. 1, p. 63–73, 1991.

FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07–16, 2011.

GUIMARÃES, J. S. **Sistema de Conversão de Energia Eólica Interligado à Rede**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2016.

HART, D. W. **Power Electronics**. 1st. ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review>. Acesso em: 13 fev. 2020.

KONZEN, J. A. **Unidade de condicionamento de sinais como elemento de interface entre transformadores de instrumentação e dispositivo de aquisição de dados**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica [recurso eletrônico]**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. v. 2

OLIVEIRA, R. N. M. DE. **Conversor CC-CC PWM Bidirecional Trifásico com três Portas e Isolado em Alta Frequência para Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2018.

OLIVEIRA FILHO, H. M. DE. **Conversor CC-CC Trifásico Isolado Bidirecional com Comutação Suave Utilizando Dual Phase-Shift e Razão Cíclica Variável**. [s.l.] Univerdidade Federal do Ceará, 2015.

_____ et al. A soft switching current fed bidirectional isolated three-phase DC-DC converter. **14th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP**, p. 6, nov. 2017.

PACTITIS, S. A. **Active Filters: Theory and Design**. 1st. ed. Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, 2007.

PALLÁS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. **Sensors and Signal Conditioning**. 2^a ed. New York, NY: JOHN WILEY & SONS, INC, 2001.

PERTENCE JR., A. **Eletrônica analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório**. 6^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

SHI, Y. et al. Optimized Operation of Current-Fed Dual Active Bridge DC-DC Converter for PV Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 0046, n. c, p. 6986–6995, 2015.

SISTEMA FIRJAN. **Indústria 4.0**. Disponível em:

<<https://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8A555B47FF01557D8802C639A4>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

TELES, C.; DUCCINI, G. M. B. **Filtros Ativos de Primeira e Segunda Ordem**. Disponível em: <https://www.academia.edu/30482108/Filtros_Ativos_de_Primeira_e_Segunda_Ordem>. Acesso em: 4 fev. 2020.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. DE. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Sistemas Digitais - Princípios e Aplicações**. 11^a

ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

WENDLING, M. **Amplificadores Operacionais**. Disponível em:

<<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2019.