



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

Projeto e Construção de um Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica

Autor: Paulo Henrique Alves dos Reis
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF
2017



Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2017

Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica/ Paulo Henrique Alves dos Reis. – Brasília, DF, 2017-
43 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2017.

1. Monitoramento. 2. Qualidade de Energia Elétrica. I. Prof. Dr. Alex Reis.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto e Construção
de um Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica

CDU 02:141:005.6

Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de julho de 2017 – Data da aprovação do trabalho:

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

Prof. Dr. Rudi Henri Van Els
Convidado 1

Prof. Dra. Carla Silva Rocha Aguiar
Convidado 2

Brasília, DF
2017

Resumo

Este trabalho tem como objetivo projetar e construir um sistema de monitoramento de qualidade de energia elétrica para baixas tensões. Até a presente etapa de desenvolvimentos deste trabalho, foi projetada uma placa de aquisição e condicionamento de sinais contendo sensores de tensão e corrente, circuitos de filtros anti-*aliasing*, atenuadores e somadores. Foram obtidas as funções de transferências desses circuitos e feitos os dimensionamentos dos componentes, em seguida foi projetado um sistema de alimentação visando prover uma tensão simétrica para os amplificadores operacionais e sensores. Os resultados das simulações mostraram que os circuitos em questão foram capazes de atenuar os ruídos acima da frequência de corte e o sistema de alimentação se mostrou eficiente em fornecer uma tensão estável e uma corrente suficiente para alimentar os circuitos. O resultado deste trabalho poderá auxiliar na tomada de decisão para sistemas que não estejam em conformidade com a qualidade de energia elétrica, no intuito de reduzir custos e desperdícios.

Palavras-chaves: Monitoramento. Indicadores. Qualidade de Energia. Filtros. *Aliasing*.

Abstract

This work aims to design and build a low voltage electrical power quality monitoring system. Up to the present stage of development of this work, a signal acquisition and conditioning plate was designed containing voltage and current sensors, anti-aliasing filter circuits, attenuators and adders. The transfer functions of these circuits were obtained and component sketches were made, then a power system was designed to provide a symmetrical voltage for the operational amplifiers and sensors. The results of the simulations showed that the circuits in question were able to attenuate noise above the cutoff frequency and the power system proved to be efficient in providing a stable voltage and a current sufficient to power the circuits. The result of this work can help in the decision making for systems that do not conform to the quality of electric energy, in order to reduce costs and waste.

Key-words: Monitoring. Indicators. Power Quality. Filters. Aliasing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplos de transitórios. Fonte:Adaptado de Dugan et al. (1995). . . .	16
Figura 2 – Componentes harmônicos de 3°, 5°, 7° e 9°. Fonte:(VELASCO, 2007). . .	17
Figura 3 – Efeitos de offset e notching.	17
Figura 4 – Presença de ruídos em um sinal alternado senoidal. Fonte: Própria. . .	18
Figura 5 – Variação da tensão ocasionada pela operação de um forno a arco. Fonte:(MEHL, 2012).	19
Figura 6 – Exemplo da variação de frequência ao longo do tempo. Fonte:(FERNANDES, 2012).	20
Figura 7 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragens. Fonte:(OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).	21
Figura 8 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa baixas real mostrando suas regiões de análise. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	23
Figura 9 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa baixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	23
Figura 10 – Diagrama de <i>Bode</i> de uma filtro passa alta real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	24
Figura 11 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa faixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	24
Figura 12 – Diagrama de <i>Bode</i> de uma filtro rejeita faixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	25
Figura 13 – Respostas em frequência do filtro <i>Butterworth</i> para $f_c = 5kHz$ segunda ordem. Fonte:Própria.	25
Figura 14 – Respostas em frequência do filtro <i>Chebyshev</i> para $f_c = 5kHz$ segunda ordem. Fonte:Própria.	26
Figura 15 – Respostas em frequência do filtro <i>Chebyshev</i> para $f_c = 5kHz$ segunda ordem. Fonte:Própria.	26
Figura 16 – Diagrama de Conexões do LV 25-P. Fonte:(LEM, 2014).	28
Figura 17 – Diagrama de conexão do transdutor LA 55-P. Fonte:(LEM, 2015). . . .	29
Figura 18 – Processo do sistema de monitoramento de qualidade de energia. Fonte: Própria.	30
Figura 19 – Processo de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria. . . .	30
Figura 20 – Circuito do filtro Anti-aliasing com topologia <i>Sallen Key</i> . Fonte: Própria.	31
Figura 21 – Circuito Atenuador de Tensão. Fonte: Própria.	34
Figura 22 – Circuito Somador de sinais. Fonte: Própria.	34
Figura 23 – Circuito regulador de tensão ajustável para 3.3V. Fonte:(UNISONIC TECHNOLOGIES CO., 2016, p.4).	35

Figura 24 – Circuito regulador de tensão ajustável para 1.5V. Fonte:Adaptado (CAR- TER, 2012).	36
Figura 25 – Esquemático do sistema de alimentação. Fonte:Própria.	38
Figura 26 – Circuito completo do do filtro e condicionador de sinais. Fonte: Própria.	39
Figura 27 – Gráfico com os sinais de entrada e saída com ruído de $7kHz$. Fonte:Própria.	39
Figura 28 – Simulação da placa de aquisição de dados. Fonte: Própria.	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. Fonte:(ANEEL, 2016).	19
Tabela 2 – Comparações das respostas de filtros passa baixas. Fonte: Adaptado de Malvino e Bates (2007, p.238, vol.2).	27
Tabela 3 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LV 20-P. Fonte:(LEM, 2014).	29
Tabela 4 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LA 55-P. Fonte:(LEM, 2015).	30
Tabela 5 – Especificações técnicas do amplificador operacional TL071. Fonte:(TEXAS INSTRUMENTS, 2015).	37
Tabela 6 – Consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados. Fonte: Própria.	37

Lista de símbolos

Ω	Unidade de Resistência Elétrica
V	Tensão Elétrica
I	Corrente Elétrica
R	Resistência Elétrica
Z	Impedância
Hz	Hertz
ω	Frequência Angular
$H(s)$	Função de Transferência no domínio de Laplace
dB	Decibel
F	Farad
Q	Fator de Qualidade
K	Ganho
Kc	Ganho na Região de Corte
fc	Frequência de Corte
fo	Frequência Natural
fp	Frequência de Pólos
C	Capacitor
Vo	Tensão de Saída
Vi	Tensão de Entrada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.2.0.1	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Qualidade de Energia	15
2.1.1	Fenômenos que Afetam a Qualidade de Energia	15
2.1.1.1	Transitórios	15
2.1.1.2	Distorções na Forma de Onda	16
2.1.1.2.1	Distorções Harmônicas	16
2.1.1.2.2	Offset DC e Notching	17
2.1.1.2.3	Ruídos	17
2.1.1.3	Variações de Tensão de Longa Duração	18
2.1.1.4	Variações de Tensão de Curta Duração	18
2.1.1.5	Flutuações de Tensão	19
2.1.1.6	Desequilíbrios de Tensão	20
2.1.1.7	Variações de Frequência	20
2.2	Aquisição e Condicionamento de Sinais	20
2.2.1	O Teorema da Amostragem	20
2.2.2	Efeito <i>Aliasing</i>	21
2.2.3	Filtro Passa Baixas	23
2.2.4	Filtro Passa Altas	23
2.2.5	Filtro Passa Faixas	24
2.2.6	Filtro Rejeita Faixas	24
2.2.7	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Butterworth</i>	25
2.2.8	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Chebyshev</i>	25
2.2.9	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Bessel</i>	26
2.2.10	Comparação	26
3	MÉTODOS E RESULTADOS	28
3.1	Sensores	28
3.1.1	Sensor de Tensão	28
3.1.2	Sensor de Corrente	29
3.2	Cálculo da função de Transferência do Filtro <i>Anti-aliasing</i>	30
3.3	O Circuito Atenuador	34

3.4	O Circuito Somador de Tensão	34
3.5	Os Circuitos Reguladores de Tensão	35
3.6	A Escolha do Amplificador Operacional	36
3.7	O Sistema de Alimentação	37
3.8	Simulações	38
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 Introdução

1.1 Justificativa

O modelo regulatório do setor elétrico sofreu várias reestruturações e criação de órgãos no decorrer dos anos, sendo que uma das grandes mudanças foi a desverticalização das empresas de energia, por meio da segmentação em geração, transmissão e distribuição. Tais mudanças conduziram uma competitividade entre os agentes do setor, que agora buscam não apenas garantir o fornecimento de energia, mas também em otimizar o uso dos recursos. Os esforços dos agentes do setor conduziram a Qualidade de Energia Elétrica (QEE), o termo QEE, está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência de sinais de tensão e/ou corrente. As características da carga elétrica conectada à rede é um dos fatores que interferem diretamente na QEE.

Ao longo dos anos, a carga do Sistema Elétrico de Potência (SEP) sofreu algumas alterações. Até meados da década de 1970 as cargas elétricas eram predominantemente lineares, isso se deve aos equipamentos nas residências, comercios e indústrias eram, em sua maioria, compostos por resistores, indutores ou capacitores. Com o passar dos anos e com a evolução da eletrônica de potência, mais e mais dispositivos eletrônicos foram criados e suas quantidades aumentaram significativamente em todos os setores. Tais dispositivos possuem a característica de não linearidade, o que significa que a relação entre tensão e corrente não é diretamente proporcional. Assim, fontes chaveadas, inversores de frequência, *soft-starters*, reatores de lâmpadas, dentre outros equipamentos, tem a capacidade de provocar distúrbios no sinal elétrico, afetando, portanto, a qualidade da energia (MEHL, 2012).

A preocupação com a QEE deve-se pelo fato de que os aparelhos e equipamentos são sensíveis as variações do sinal na rede elétrica e, por isso, podem não funcionar de forma adequada. Assim, os efeitos advindos de distúrbios na QEE são diversos, tais como: cintilação luminosa, vibração em motores elétricos, acionamento imprevisto de reles. Em casos extremos, pode-se verificar a interrupção de processos produtivos, com conseqüente perda de produção e materiais, em função de interrupções e distúrbios no fornecimento de energia (DUGAN et al., 1995).

Pragmaticamente, o estudo da qualidade da energia elétrica pode ser dividida em duas vertentes:

Qualidade do serviço: a qualidade do serviço está associada à disponibilidade da energia elétrica, sendo considerado os aspectos de gestão e atendimento aos consumidores. Nesse sentido, as agências reguladoras estabelecem metodologias para apurar a continuidade e

os tempos de atendimento às ocorrências emergenciais na rede elétrica;
Qualidade do produto: vertente relacionada ao suprimento da energia elétrica, o qual deve ser realizado com tensão de magnitude e frequência constante e forma de onda senoidal. Neste contexto, verifica-se que existem diversos fenômenos no sistema elétrico que impactam a tensão disponibilizada aos consumidores, implicando na definição de um conjunto de índices para “quantificar” a qualidade do produto.

Segundo o módulo 8 do PRODIST(Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) (ANEEL, 2016), os principais fatores considerados na QEE são:

- ★ Tensão em regime permanente;
- ★ Fator de Potência;
- ★ Distorções Harmônicas;
- ★ Desequilíbrios de Tensão;
- ★ Flutuação de Tensão;
- ★ Variação de Frequência;
- ★ Variação de Tensão de curta duração.

A medição de grandezas possui das várias funções, uma muito importante que é empregada para o monitoramento de fenômenos físicos, a partir disso é possível realizar uma tomada de decisão, como atuação em sistemas de proteção, chaveamento em linhas de transmissão, atuação de sistemas de controle ou o monitoramento da qualidade de energia.

A elaboração deste trabalho de conclusão de curso irá produzir um aparelho que poderá ser utilizado de forma geral em alguma das aplicações acima citadas ou de forma específica nas disciplinas laboratoriais do curso de Engenharia de Energia na Faculdade do Gama (FGA), em que os alunos passarão a ter um recurso a mais em laboratório e ter a chance de desenvolver ainda mais suas competências em engenharia.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral o projeto e construção de um sistema de monitoramento de qualidade de energia elétrica para baixas tensões.

1.2.0.1 Objetivos Específicos

Para realização do projeto e construção do sistema de monitoramento de qualidade de energia serão realizadas as seguintes etapas:

1. Projeto e Confecção de placa de aquisição e condicionamento de sinais. Para tal, será realizado as seguintes atividades:
 - a) Escolha de sensores de corrente e tensão;
 - b) Definição de circuitos de condicionamento;
 - c) Definição de sistema de alimentação da placa;
 - d) Elaboração de layouts;
 - f) Montagens e testes.
2. Implementação de algoritmos de cálculo de indicadores de QEE em microcontrolador.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Qualidade de Energia

Atualmente a avaliação da Qualidade de Energia se tornou uma ferramenta presente em todos os segmentos da sociedade, comercial e industrial, e de forma indispensável, seja pela forma que seus impactos afetam os custos ou seja pela conscientização de que o recurso tem ficado cada vez mais escasso durante os anos. Para as pessoas a falta de qualidade é percebida principalmente pelas cintilações luminosas nas lâmpadas, falta de fornecimento de energia ou quando um equipamento é danificado, para as empresas os efeitos são mais severos, pois uma momentânea falta de fornecimento pode prejudicar toda uma cadeia de produção. Tendo em mente que os equipamentos atualmente estão mais sensíveis as perturbações na rede, as cobranças pela maior estabilidade se fizeram presente.

A disponibilidade de energia elétrica, se mostra um salto na qualidade de vida da sociedade, visto a diversidade de produtos eletroeletrônicos no cotidiano que funcionam com energia elétrica. É sabido que as cargas eletrônicas provocam maiores distúrbios na rede elétrica, com isso manter a qualidade de energia dentro de níveis adequados têm-se tornado cada vez mais difíceis. Esses níveis são regulamentados pelo PRODIST-Módulo 8, que especifica os indicadores de QEE sobre o aspecto da qualidade do serviço e a qualidade do produto, apenas a qualidade do produto será abordado neste trabalho.

2.1.1 Fenômenos que Afetam a Qualidade de Energia

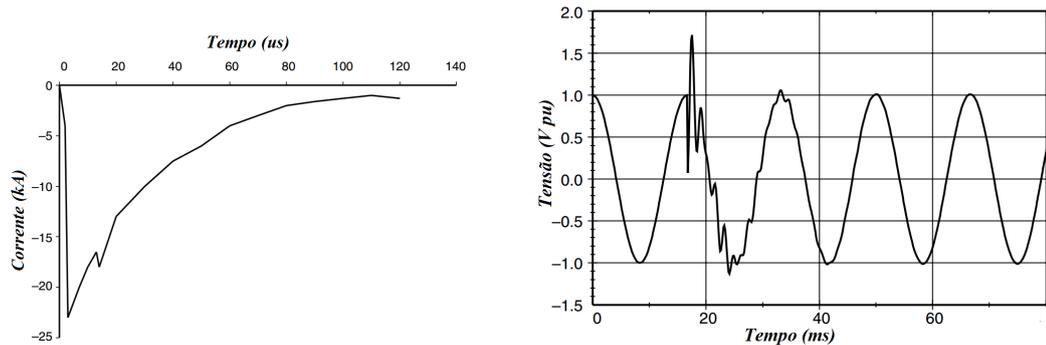
Aqui serão descritos os principais fenômenos que afetam a QEE e que estão previstos no Módulo 8 do PRODIST.

2.1.1.1 Transitórios

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições de operação de um sistema de energia elétrica. Sua duração geralmente é curta, mas de extrema importância para dimensionamentos de equipamentos, pois os submete a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Basicamente existem dois tipos de transitórios:

Transitório impulsivo: É uma mudança súbita na condição de regime permanente de tensão, corrente ou ambas, caracterizado por impulsos unidimensionais positivos ou negativos onde é importante observar seus tempos de crescimento e decaimento, esse distúrbio é geralmente provocado por descargas atmosféricas.

Transitório oscilatório: É uma mudança súbita na condição de regime permanente de tensão, corrente ou ambas que inclui valores de impulsos unidirecionais de polaridade positiva e negativa. Um transiente desse tipo tem duração média de dezenas de milissegundos, pode ser subdividido em oscilatórios de baixa, média e alta frequência e são provocados por eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, e outras (DUGAN et al., 1995).



(a) Transitório impulsivo causado por uma corrente de raio. (b) Transitório oscilatório causado pela energização de um banco de capacitores.

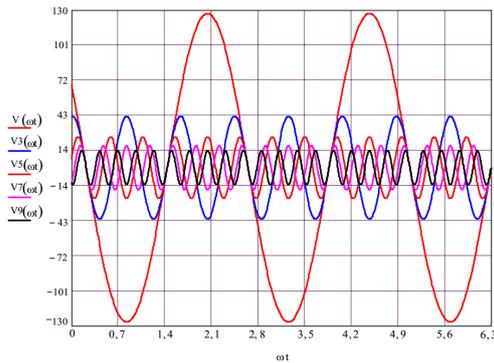
Figura 1 – Exemplos de transitórios. Fonte: Adaptado de Dugan et al. (1995).

2.1.1.2 Distorções na Forma de Onda

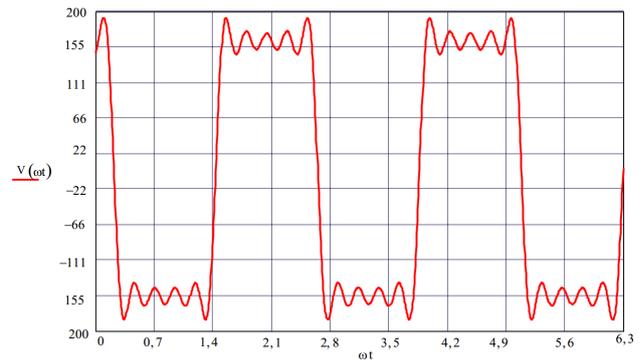
As distorções na forma de onda são definidas como um desvio em regime permanente a partir de uma onda puramente senoidal, na frequência fundamental e caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral (DUGAN et al., 1995). Existem cinco tipos principais de distorções na forma de onda:

2.1.1.2.1 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são classificadas em **harmônicos** e **interharmônicos**, os **harmônicos** são deformações no sinal puramente senoidal (tensão ou corrente) causadas pela combinação de outros sinais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, esses efeitos são provocados por equipamentos e cargas não lineares instalados no sistema de distribuição. Os **interhamônicos** são deformações no sinal puramente senoidal (tensão ou corrente) causadas pela combinação de outros sinais com frequências não múltiplas da frequência fundamental provocados pelos conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução, fornos a arco, etc (VELASCO, 2007; DUGAN et al., 1995).



(a) Frequência Fundamental e Harmônicos.



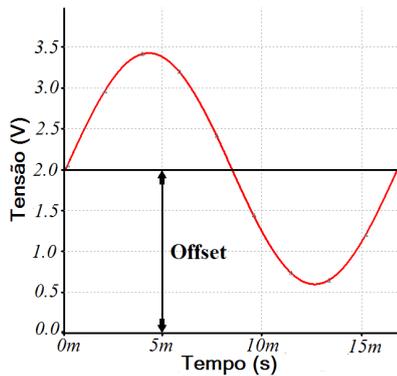
(b) Resultado da distorção dos Harmônicos.

Figura 2 – Componentes harmônicos de 3°, 5°, 7° e 9°. Fonte:(VELASCO, 2007).

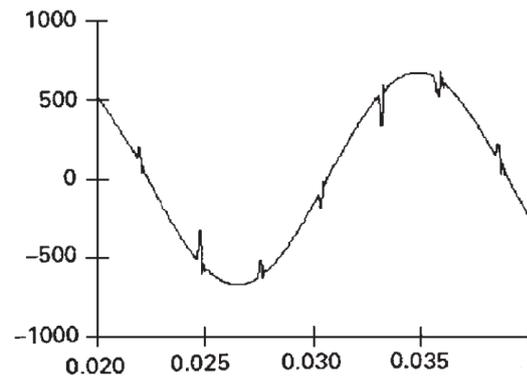
2.1.1.2.2 Offset DC e Notching

Notching(Recortes) é uma perturbação de tensão periódica causada por transições sucessivas e bruscas de tensão quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Os componentes de frequência associados podem ser bastante altos. A figura 3b mostra um exemplo de notching de tensão de um conversor trifásico onde a perturbação ocorre na mudança entre fases causando curto-circuitos momentâneos (DUGAN et al., 1995).

Offset é o efeito causado pela presença de uma componente contínua de tensão e/ou corrente em um sistema elétrico de corrente alternada provocando o deslocamento da tensão média no eixo.



(a) Exemplo de *offset* para um sinal alternado de 1Vrms e contínuo de 2V . Fonte: Própria.



(b) Exemplo de *notching* de tensão de um conversor trifásico. Fonte:(DUGAN et al., 1995).

Figura 3 – Efeitos de offset e notching.

2.1.1.2.3 Ruídos

Os ruídos são sinais elétricos indesejados, contendo uma faixa espectral inferior a $200kHz$, as quais são sobrepostos à tensão ou corrente causando alterações na onda

puramente senoidal. Eles podem ser causados por chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência, radiações eletromagnéticas, circuitos de controle, fontes de alimentação chaveadas e outros (DUGAN et al., 1995).

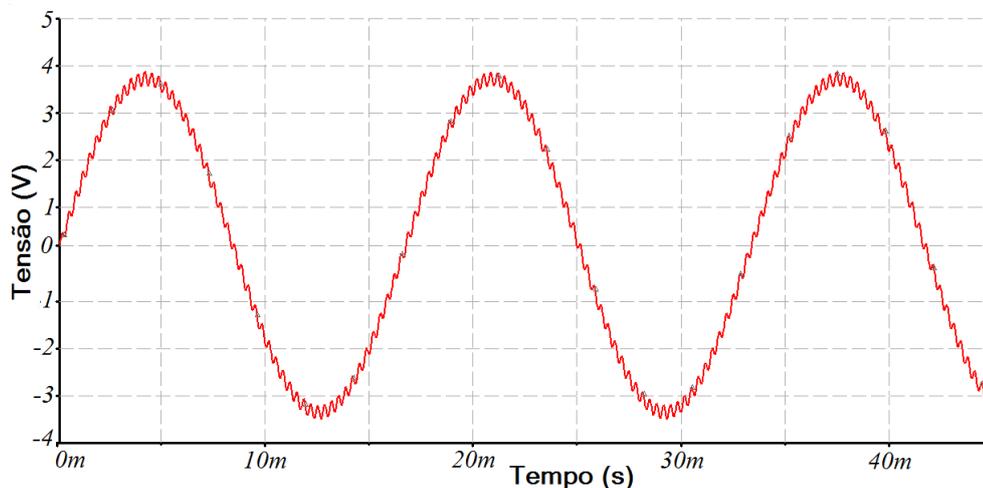


Figura 4 – Presença de ruídos em um sinal alternado senoidal. Fonte: Própria.

2.1.1.3 Variações de Tensão de Longa Duração

As Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD), são variações no valor da tensão eficaz com duração superior a três minutos, sendo consideradas distúrbios em regime permanente. Elas são classificadas em **sobretensão** quando ocorre um acréscimo no valor eficaz da tensão maior que 10%, normalmente são resultados de desligamentos de grandes cargas, energização de bancos de capacitores ou o ajuste incorreto da posição do comutador em transformadores, **subtensão** quando ocorre um decréscimo no valor eficaz da tensão maior que 10% e geralmente são provocados por fatores opostos aos que causam sobretensão, e por fim, **interrupção sustentada**, quando o valor da tensão eficaz é nulo por mais de um minuto, onde geralmente as interrupções desse tipo são permanentes e necessitam de intervenção manual de uma equipe emergencial, afim de restabelecer o fornecimento de energia (DUGAN et al., 1995).

2.1.1.4 Variações de Tensão de Curta Duração

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), são variações significativas na amplitude de tensão que tem duração momentânea ou temporária causadas tipicamente por faltas, energizações ou desenergizações de grandes cargas. A regulamentação e classificação é feita segundo o PRODIST-Módulo 8 considerando uma variação de tempo e amplitude da tensão, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. Fonte:(ANEEL, 2016).

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão(valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

2.1.1.5 Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão são variações na tensão nominal compreendidas na faixa de 0.9 e 1.1 pu, são caracterizadas como uma série de pequenas e rápidas variações de forma aleatória ou contínua. Dentre as manifestações das flutuações de tensão pode-se destacar o efeito de cintilação (flicker) visto nas lâmpadas dado pela variação do fluxo luminoso. O sinal de cintilação é definido pela magnitude eficaz da variação de tensão, dada em porcentagem do sinal fundamental, o efeito de cintilação nas lâmpadas é produzido pelo sinal de cintilação que possui frequência de 0 a 30Hz, nesta faixa o olho humano é sensível a variação luminosa o que tornou possível a observação do efeito (DUGAN et al., 1995; MEHL, 2012).

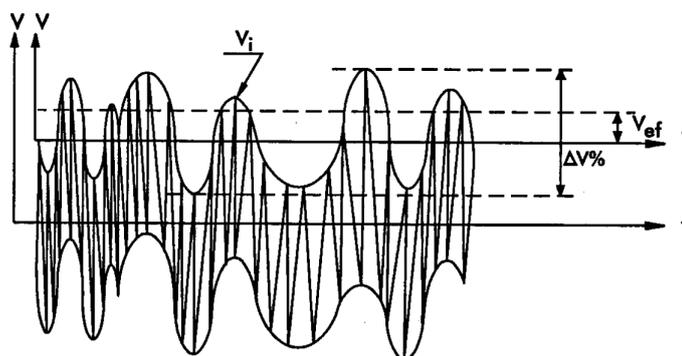


Figura 5 – Variação da tensão ocasionada pela operação de um forno a arco. Fonte:(MEHL, 2012).

2.1.1.6 Desequilíbrios de Tensão

Os desequilíbrios de tensão são quaisquer variações na amplitude de tensão entre as três fases ou defasagem elétrica de 120° em um sistema trifásico. As principais fontes de desequilíbrios são cargas não uniformemente distribuídas nas fases do sistema de alimentação (ANEEL, 2016).

2.1.1.7 Variações de Frequência

As variações de frequência são definidas como uma variação da frequência fundamental do sistema a partir do seu valor nominal, são causadas por perdas de geração ou excesso de carga podendo causar danos nos geradores e palhetas das turbinas. A frequência está vinculada com a rotação dos geradores síncronos e pode variar caso não haja o equilíbrio entre geração e carga, que no Brasil é realizado pelo ONS. O PRODIST-Módulo 8 especifica que a variação de frequência deve estar compreendida entre 59.5Hz e 60.1Hz nas condições normais de operação em regime permanente. No caso de distúrbios na rede de distribuição ou geração ele ainda especifica outros limites de tempo e frequências (VELASCO, 2007; DUGAN et al., 1995; ANEEL, 2016).

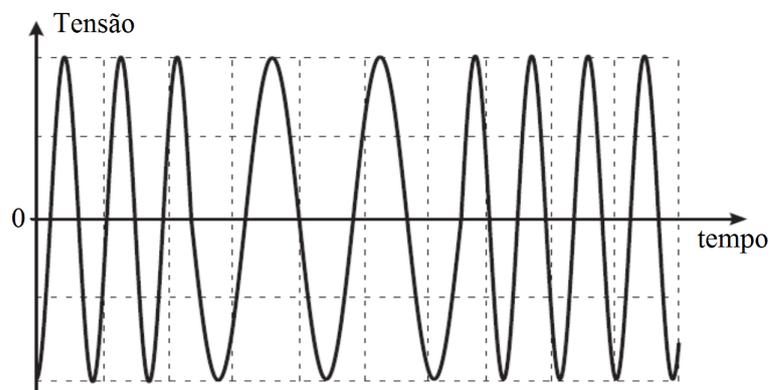


Figura 6 – Exemplo da variação de frequência ao longo do tempo. Fonte:(FERNANDES, 2012).

2.2 Aquisição e Condicionamento de Sinais

2.2.1 O Teorema da Amostragem

As grandezas da natureza como velocidade, temperatura, tensão e corrente elétrica são representadas por funções contínuas no tempo, isso quer dizer que existe um valor dessa grandeza para qualquer infinitésimo de tempo. No entanto, nos sistemas de medição digitais essas grandezas são discretizadas (descontínua no tempo), ou seja, representadas tomando-se uma determinada quantidade de amostras, mas que ainda represente esse sinal. Para que um sinal seja discretizado de forma eficaz, a forma que isso ocorre deve

acontecer seguindo o teorema da amostragem, na qual, deve haver uma quantidade mínima de amostras do sinal contínuo no tempo para que ele possa ser representado discretamente de forma fiel (OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

Segundo o teorema da amostragem, tomando-se uma sequência de amostras uniformemente espaçadas por unidade de tempo, o sinal apenas poderá ser reconstruído perfeitamente se as amostras forem tomadas com uma frequência mais alta existente no sinal. Nesse contexto, a taxa com que são obtidas as amostras é chamada de frequência de amostragem (ω_s) e ela deve ser maior do que duas vezes a frequência mais alta do sinal (ω_m) que se quer amostrar (OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

$$\omega_s > 2\omega_m \tag{2.1}$$

Segundo Oppenheim, Willsky e Nawab (2010, p.307)“A frequência ($2\omega_m$), que, conforme o teorema da amostragem, deve ser menor que a frequência de amostragem, comumente é conhecida como taxa de Nyquist.”

2.2.2 Efeito *Aliasing*

Quando a frequência de amostragem não é suficientemente alta, ou seja, de acordo com o teorema da amostragem em que $\omega_s > 2\omega_m$, esse sinal não pode reconstruído de forma fiel, tal diferença entre o sinal real e o reconstruído é conhecido como efeito *aliasing*.

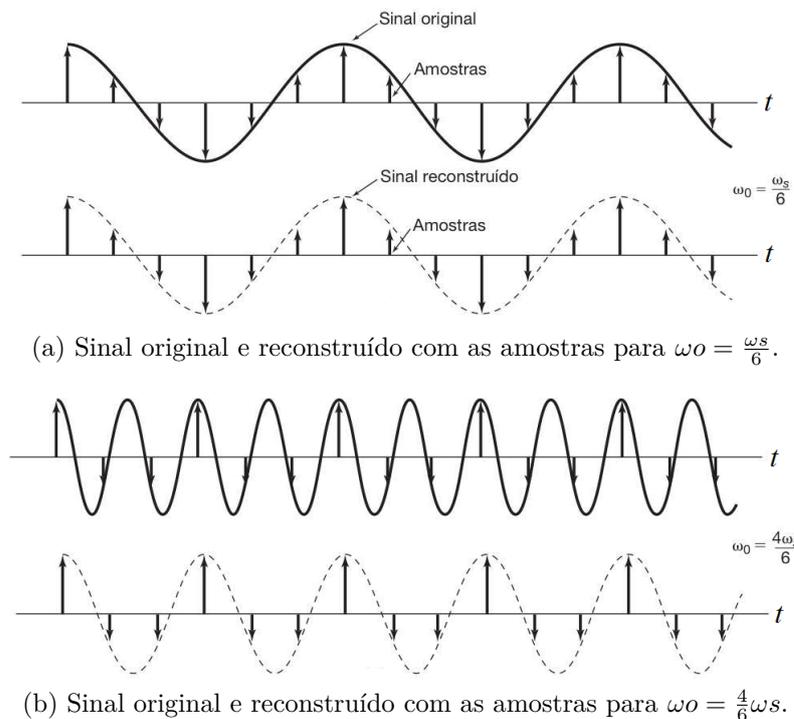


Figura 7 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragens. Fonte:(OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

Na figura 7a o sinal pode ser reconstruído de forma fiel pois a frequência de amostragem (ω_s) é seis vezes maior que a frequência do sinal (ω_m), já para a figura 7b o sinal reconstruído é diferente pois a frequência de amostragem é apenas três meios da frequência do sinal original, com isso temos o efeito *aliasing*.

Na eletrônica analógica o processamento de sinais elétricos é feito utilizando elementos denominados filtros, de acordo com Boylestad (2004, p.693) “Qualquer combinação de dispositivos passivos (R, L e C) e/ou (transistores e amplificadores operacionais) projetada para selecionar ou rejeitar uma faixa de frequência é denominada filtro”.

Os filtros são circuitos capazes de permitir a passagem de determinadas frequências e bloquear outras removendo informações indesejadas. O filtro que permite a passagem de uma faixa de frequências baixas é um filtro passa baixas, permitindo a passagem uma faixa frequências altas o filtro é um passa alta, podendo ainda ser um passa faixas permitindo a passagem de uma faixa de frequências ou rejeita faixas impedindo a passagem das mesmas. Filtros que contém apenas dispositivos passivos (R, L e C) são considerados filtros passivos, ao passo que os que contém dispositivos ativos (transistores e amplificadores operacionais) associados com dispositivos passivos são considerados filtros ativos (BOYLESTAD, 2004).

O tipo de filtro é caracterizado pela sua resposta em frequência, que pode ser visualizada em um gráfico do ganho de tensão em relação a frequência, conhecido também como diagrama de *Bode*, por esse diagrama é possível analisar o comportamento do filtro por meio das suas regiões descritas a seguir:

- Faixa (banda) de passagem: Faixa onde se permite a passagem de frequências de interesse.
- Faixa (banda) de rejeição: Faixa onde se bloqueia a passagem das frequências indesejadas.
- Faixa (banda) de transição: Intervalo entre a faixa de passagem e de rejeição.

A figura 8 mostra uma resposta em frequência de um filtro compreendido entre as regiões reais consideradas como passagem, transição (entre f_c e f_s) e atenuação.

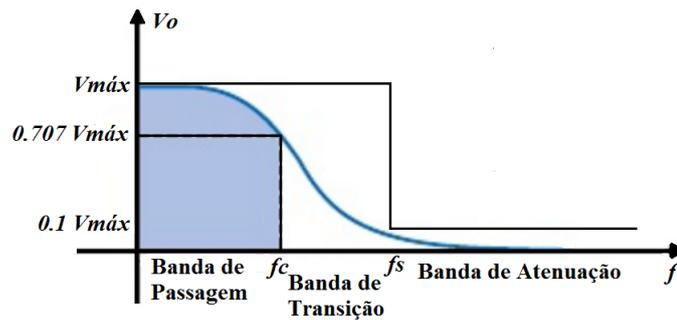


Figura 8 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa baixas real mostrando suas regiões de análise. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

Outro parâmetro importante é a ordem, num filtro ativo a ordem indica sua complexidade tanto matemática quanto na implementação do circuito, ela pode ser determinada pela quantidade de circuitos RC, ou em outras palavras pela quantidade de pólos na sua função de transferência, uma aproximação prática pode ser feita utilizando a ordem do filtro igual ao número de capacitores ([MALVINO; BATES, 2007](#), vol.2).

2.2.3 Filtro Passa Baixas

Este filtro consiste em uma faixa de passagem BW limitada pela região de frequência de zero até a frequência de corte. A medida que aumenta a frequência os sinais passam pelo filtro com a mesma amplitude inicial, ao aproximar-se de f_c eles começam a ser atenuados aos poucos até o valor de 0.707 de sua amplitude inicial, em seguida a atenuação é maior conforme aumenta frequência, até serem completamente atenuados.

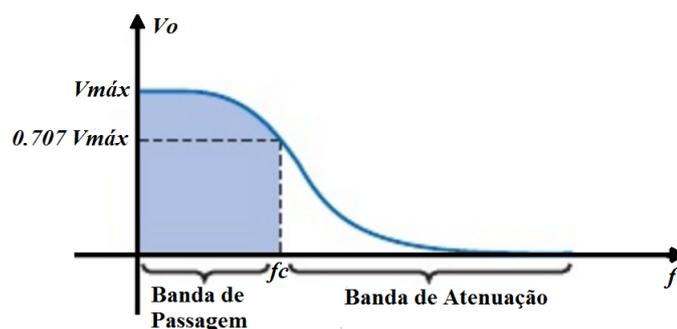


Figura 9 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa baixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.4 Filtro Passa Altas

Este filtro consiste em uma faixa de passagem BW a partir da frequência de corte. Conforme a frequência varia a partir do zero os sinais são atenuados a uma alta taxa, conforme suas frequências se aproximam de f_c a taxa diminui, em seguida já estando na faixa

de passagem, a taxa de atenuação continua a diminuir até que as amplitudes dos sinais sejam iguais aos de entrada, para frequências superiores os sinais passam integralmente.

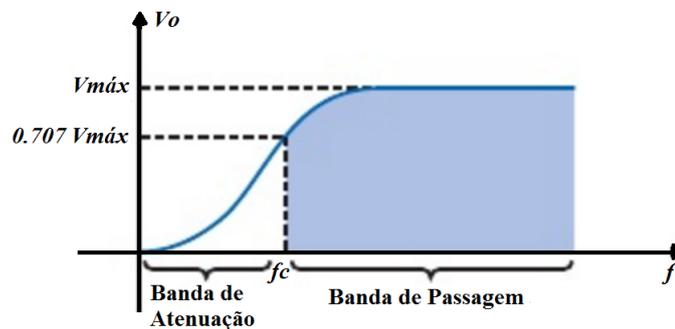


Figura 10 – Diagrama de *Bode* de uma filtro passa alta real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.5 Filtro Passa Faixas

Este filtro consiste em permitir a passagem de frequências em uma região limitada BW de uma frequência inicial f_1 (corte inferior) até uma frequência final f_2 (corte superior) e atenuando as demais frequências dos sinais. Ao variar a frequência a partir do zero os sinais são atenuados a uma alta taxa, ao se aproximar de f_1 a taxa de atenuação diminui, assim como são bastante atenuados a partir de f_2 , a região compreendida entre f_1 e f_2 que é a região de interesse os sinais são pouco atenuados até chegar em f_0 onde a amplitude dos sinais é máxima.

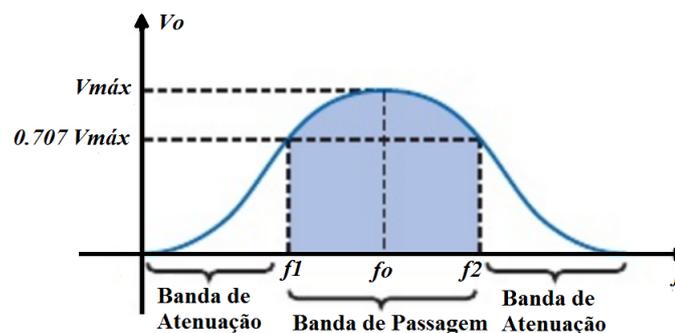


Figura 11 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa faixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.6 Filtro Rejeita Faixas

Um filtro rejeita faixa consiste em rejeitar uma faixa de frequência em uma região dada pela frequência inicial f_1 e frequência final f_2 e permite a passagem nas demais regiões. Ao aumentar a frequência a partir do zero o sinal é pouco atenuado até chegar em f_1 , em seguida na banda de atenuação os sinais são bastante atenuados até a frequência de atenuação máxima em f_0 , depois a taxa diminui até f_2 , e em seguida na banda de

passagem a taxa continua a diminuir, mas agora lentamente, até atingir a amplitude máxima do sinal, os sinais com frequências superiores passam integralmente.

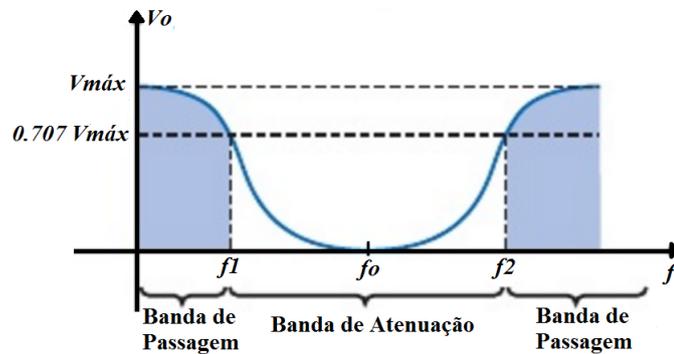


Figura 12 – Diagrama de *Bode* de um filtro rejeita faixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.7 Filtro Passa Baixas com Resposta *Butterworth*

O filtro com resposta *Butterworth* tem como característica principal uma curva maximamente plana na região de passagem comparada com outras aproximações e uma taxa de decaimento relativamente lento, de acordo com a figura 13 este filtro possui baixo deslocamento de fase em baixas frequências e pouca variação da amplitude em um transiente de tempo.

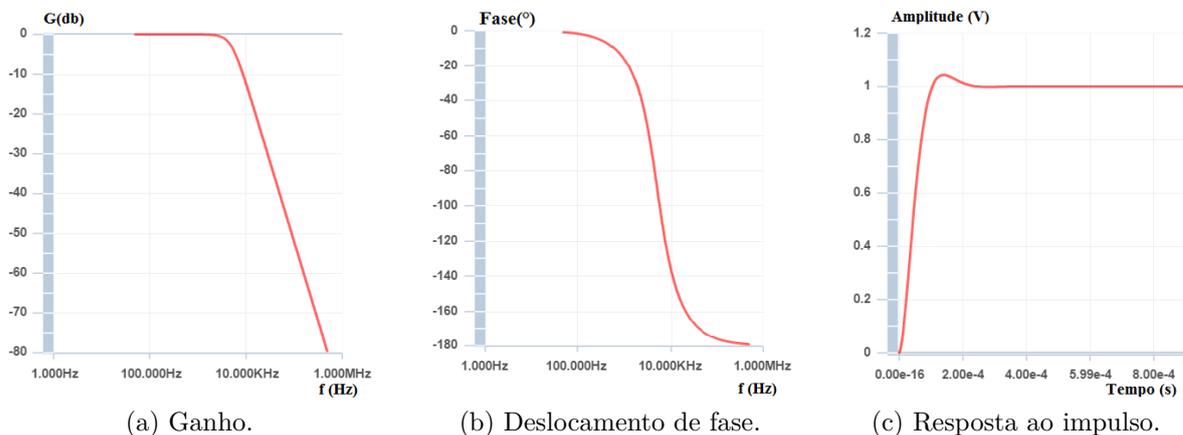


Figura 13 – Respostas em frequência do filtro *Butterworth* para $f_c = 5\text{kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.

2.2.8 Filtro Passa Baixas com Resposta *Chebyshev*

O filtro com resposta *Chebyshev* tem como característica principal um decaimento rápido na região de transição em comparação com outras topologias, no entanto, ele possui uma oscilação na banda de passagem principalmente na região próxima a frequência de

corde, de acordo com a figura 14 este filtro possui pouca variação da fase para baixas frequências e uma considerável variação da amplitude com um transiente de tempo.

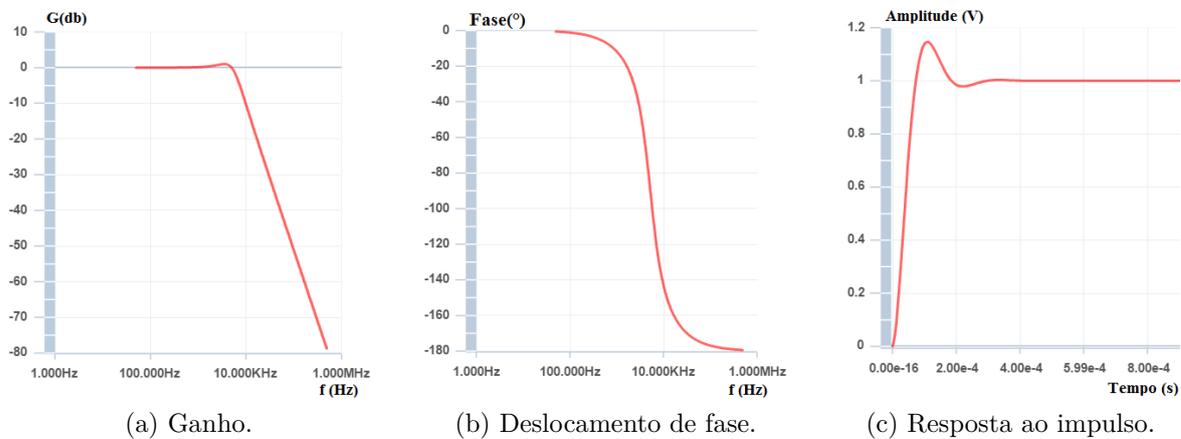


Figura 14 – Respostas em frequência do filtro *Chebyshev* para $f_c = 5kHz$ segunda ordem. Fonte:Própria.

2.2.9 Filtro Passa Baixas com Resposta *Bessel*

O filtro com resposta *Bessel* tem como característica principal um deslocamento linear de fase na região de passagem comparado com outras aproximações e uma resposta plana, entretanto, seu decaimento é mais lento que a resposta *Butterworth*, de acordo com a figura 15 este filtro possui baixa variação da fase em baixas frequências e praticamente nenhuma variação da amplitude com um transiente de tempo.

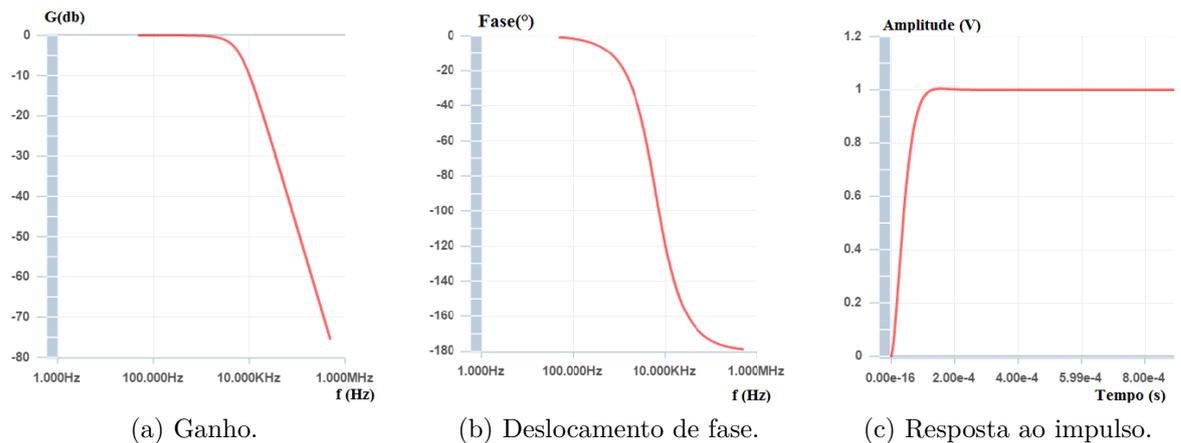


Figura 15 – Respostas em frequência do filtro *Chebyshev* para $f_c = 5kHz$ segunda ordem. Fonte:Própria.

2.2.10 Comparação

A tabela 2 reúne as principais características das principais respostas dos filtros passa baixas, de forma a tornar fácil a seleção.

Tabela 2 – Comparações das respostas de filtros passa baixas. Fonte: Adaptado de Malvino e Bates (2007, p.238, vol.2).

Aproximações de Filtro				
Tipo	Banda de Passagem	Banda de Corte	Decaimeto	Resposta ao Degrau
<i>Butterworth</i>	Plana	Monotônica	Bom	Bom
<i>Chebyshev</i>	Com ondulações	Monotônica	Muito Bom	Ruim
<i>Bessel</i>	Plana	Monotônica	Ruim	Melhor

3 Métodos e Resultados

Este capítulo trata de forma detalhada as partes que compõem o sistema, como equacionamento utilizando as leis de *Kirchhoff* dos nós, cálculo das funções de transferência dos circuitos e a escolha dos componentes que os compõem.

3.1 Sensores

3.1.1 Sensor de Tensão

O sensor de tensão usado é um transdutor LV 25-P produzido pela empresa LEM que faz a medição com princípio de funcionamento baseado no efeito *Hall*, podendo ser utilizado para medições de tensões alternadas (C.A.), contínuas (C.C.) e pulsantes, além disso ele possui um isolamento galvânico entre o circuito primário (alta potência) e secundário (baixa potência) que traz como vantagem isolamento elétrico entre as partes e consequentemente proteção do circuito medidor contra surtos de tensão.

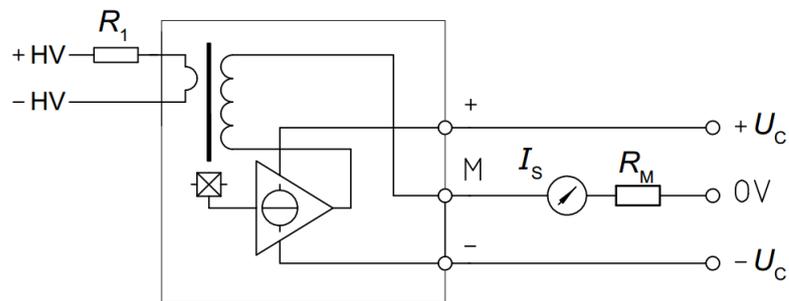


Figura 16 – Diagrama de Conexões do LV 25-P. Fonte:(LEM, 2014).

De acordo com a figura 16 as conexões $+U_c$ e $-U_c$ são responsáveis pela alimentação, a conexão M pela medição e as conexões +HV e -HV correspondem as conexões que devem se conectar a rede para ser medida. O resistor R1 deve ser selecionado de forma que a corrente que flui através dele seja proporcional à tensão a ser medida, com isso R1 deve ser calculado de tal forma que considerando a tensão a ser medida a corrente que flui através dele seja de $10mA$, que é a corrente nominal primária que otimiza o transdutor (LEM, 2014).

Pode-se calcular R1 da seguinte forma:

$$R1 = \frac{Vin(V)(tensão\ a\ ser\ medida)}{0.01(A)} \quad (3.1)$$

O resistor de medição R_M é definido pelo fabricante em virtude da tensão de alimentação como pode ser visto a seguir:

Tabela 3 – Valores de R_M de acordo com as tensões de alimentação do LV 20-P. Fonte:(LEM, 2014).

Alimentação (V)(C.C.)	Corrente máxima (mA)	R_M mínimo (Ω)	R_M máximo (Ω)
$\pm 12V$	± 10	30	190
± 15	± 10	100	350

A seguir outras características técnicas:

- * Temperatura ambiente de operação: 0 a $+70^\circ C$;
- * Corrente nominal de saída: 25 mA (eficaz);
- * Faixa de medição de tensão: 10 a 500 V;
- * Precisão: $\pm 1.1\%$.

3.1.2 Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado é um LA 55-P produzido pela empresa LEM, capaz de realizar medições em correntes alternadas (C.A.), contínuas (C.C.) e pulsantes. Assim como o sensor de tensão ele traz um isolamento galvânico entre primário e secundário capaz de proteger o circuito medidor contra surtos de corrente e curto-circuito.

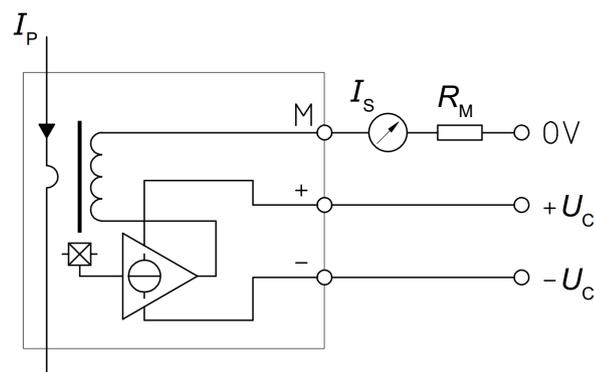


Figura 17 – Diagrama de conexão do transdutor LA 55-P. Fonte:(LEM, 2015).

Como pode ser visto na figura 17 o sensor LA 55-P é alimentado pelos terminais $+U_C$ e $-U_C$ com tensão de 15V, no terminal M é inserido um resistor R_M em série para transformar um sinal de corrente em um sinal de tensão, seu valor é definido segundo o fabricante de acordo com a tensão de alimentação. A tabela 4 mostra os valores de R_M de acordo com a tensão de alimentação e temperatura ambiente de $70^\circ C$.

Tabela 4 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LA 55-P. Fonte:(LEM, 2015).

Alimentação (V)(C.C.)	Corrente máxima (mA)	RM mínimo (Ω)	RM máximo (Ω)
$\pm 12V$	± 10	10	100
± 15	± 10	50	160

A seguir outras características técnicas:

- * Temperatura ambiente de operação: -40 a $+85^{\circ}C$;
- * Corrente nominal de saída: 50 mA (eficaz);
- * Faixa de medição: 0 a 50 A (eficaz);
- * Precisão: 0.90%.

3.2 Cálculo da função de Transferência do Filtro *Anti-aliasing*

O sinal analógico necessita passar por diversas etapas para que seja possível analisar a qualidade de energia, a figura 18 mostra o processo em etapas.

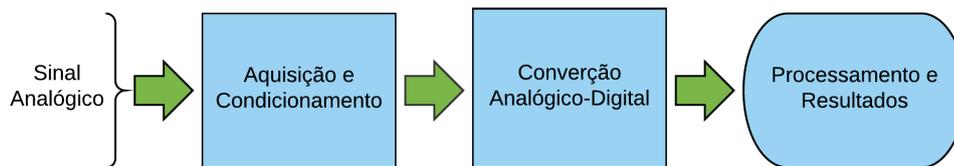


Figura 18 – Processo do sistema de monitoramento de qualidade de energia. Fonte: Própria.

O processo de aquisição e condicionamento de sinais é uma parte importante deste trabalho, ele é capaz de eliminar os ruídos que estão sobrepostos ao sinal de interesse e condicioná-lo para um processamento e análise digital, a figura 19 mostra de uma forma simples as etapas e o que acontece com o sinal desde a medição dos sensores até estar pronto para o microcontrolador.

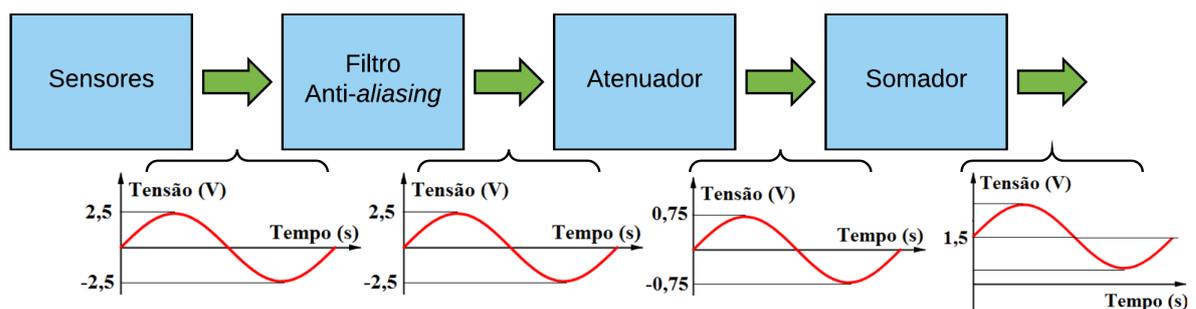


Figura 19 – Processo de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

O tipo de filtro escolhido para este trabalho foi um passa baixa com aproximação *Bessel*, a primeira consideração foi a frequência de interesse de $60Hz$, por isso um filtro passa baixas, em seguida a escolha se baseou nos seguintes aspectos:

- ▷ **Ordem:** Utilizou-se um filtro de segunda ordem devido a maior complexidade de filtros de ordem superior tanto para a obtenção da função de transferência quanto para a implementação do circuito.
- ▷ **Resposta:** Uma resposta não plana tem como resultado ganhos maiores em frequências maiores, isso provocaria um ganho maior nos ruídos e harmônicos, pois eles possuem frequências bem maiores que a de interesse, resultando uma distorção maior na saída do filtro. Os filtros com resposta *butterworth* e *Bessel* como pode ser visto nas figuras 13 e 15, possuem uma resposta plana na região de passagem, a resposta *Butterworth* é ainda mais plana que a *Bessel*, no entanto, a resposta *Bessel* tem como vantagem uma resposta ao degrau plana resultando em menor distorção do sinal na saída.
- ▷ **Topologia:** Utilizou-se a topologia Sallen-Key pois ela é simples e de fácil implementação da função de transferência.

Utilizando a Lei de *Kirchhoff* dos nós calcula-se a função de transferência do circuito da figura 20:

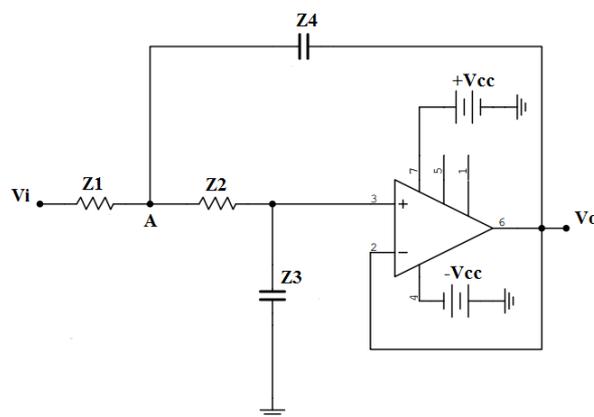


Figura 20 – Circuito do filtro *Anti-aliasing* com topologia *Sallen Key*. Fonte: Própria.

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + s \frac{(R1+R2)}{R1R2C^2} + \frac{1}{R1R2C1C2}} \quad (3.2)$$

Segundo Dorf e Svoboda (2013, p.808) "a função de transferência de um filtro de segunda ordem é de acordo com a equação 3.3".

$$H(s) = \frac{K\omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q} + \omega_o^2} \quad (3.3)$$

Comparando a função de transferência obtida com a equação 3.3 pode-se calcular a frequência de polos da seguinte maneira:

$$\omega_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.4)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.5)$$

$$2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.7)$$

Fazendo $R_1 = R_2 = R$ temos:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.8)$$

Temos ainda da equação que:

$$\frac{\omega_o}{Q} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_2} \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.10)$$

$$Q = \frac{C_2}{2\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.11)$$

$$K\omega_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.12)$$

$$K \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.13)$$

$$K = 1 \quad (3.14)$$

BW (*Bandwidth*) é a largura de banda dada pela diferença entre as frequências de -3dB de corte superior e inferior, assim:

$$BW = f_{cs} - f_{ci} \quad (3.15)$$

Para um filtro passa baixas:

$$BW = f_c \quad (3.16)$$

$$Q = \frac{f_o}{BW} = \frac{f_o}{f_c} \quad (3.17)$$

$$f_o = K_o f_p \quad (3.18)$$

K_o é o ganho na região de passagem, como ele é unitário temos:

$$f_o = f_p \quad (3.19)$$

$$f_c = K_c f_o \quad (3.20)$$

$$f_c = K_c f_p \quad (3.21)$$

Segundo [Malvino e Bates \(2007, p.203, vol.2\)](#), "uma resposta *Bessel* possui um fator de Qualidade $Q = 0.577$ e ganho $K_c = 0.786$ ". Devido a função que determina o valor do fator de qualidade depender apenas dos capacitores, temos que eles são os componentes principais para se obter a resposta do filtro desejada. Tomando a frequência de corte em 5kHz:

$$f_c = \frac{K_c}{2\pi R\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.22)$$

Definindo o valor de $R = 2.2k\Omega$

$$C_1 C_2 = \left(\frac{0.786}{2\pi R f_c}\right)^2 \quad (3.23)$$

$$C_1 C_2 = \left(\frac{0.786}{2\pi * 2200 * 5000}\right)^2 \quad (3.24)$$

$$C_1 C_2 = 1.293302107^{-16} \quad (3.25)$$

Definindo o valor de $C_1 = 10nF$ temos que:

$$C_2 = 12.9333nF \quad (3.26)$$

Como não existe um capacitor com essa capacitância comercialmente, pode-se aproximar C_2 associando 4 capacitores em paralelo, sendo um de 10nF, e outros três de 1 nF, obtendo:

$$C_2 = 13nF \quad (3.27)$$

3.3 O Circuito Atenuador

De forma que o sistema de condicionamento de sinais possa ser utilizado em uma ampla gama de dispositivos, fixou-se que a placa de aquisição de dados deve disponibilizar um sinal de, no máximo, 3,3 V, uma vez que este é o valor máximo de entradas analógicas de microcontroladores. Para que isso aconteça será feita uma atenuação do sinal após o filtro para que ao não ultrapasse o limite desejado.

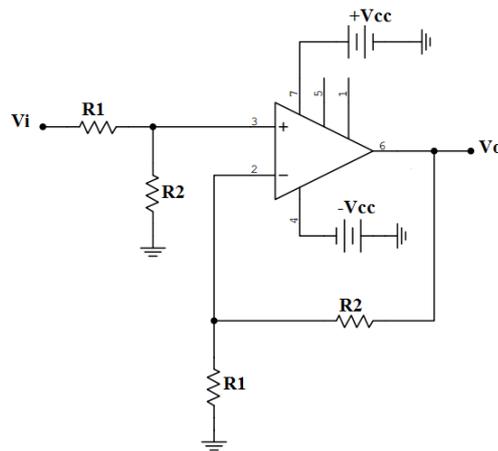


Figura 21 – Circuito Atenuador de Tensão. Fonte: Própria.

$$V_o = V_i \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.28)$$

Para este projeto, é necessário atenuar o sinal em 70%, implicando, portanto, em $R_1 = 33k\Omega$ e $R_2 = 10k\Omega$.

3.4 O Circuito Somador de Tensão

O circuito somador tem a função de deixar o sinal apenas positivo para o microcontrolador, para isso o sinal advindo do circuito atenuador será somado com 1.5V(C.C).

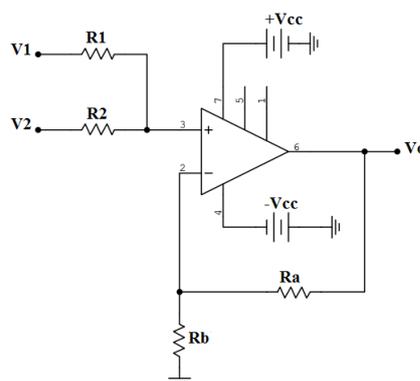


Figura 22 – Circuito Somador de sinais. Fonte: Própria.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \left(\frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}\right) \quad (3.29)$$

De acordo com a equação 3.29, escolhendo todos os resistores com valores iguais obtemos um ganho unitário, logo $R_1 = R_2 = R_a = R_b = 1k\Omega$.

3.5 Os Circuitos Reguladores de Tensão

Estes circuitos são responsáveis por proporcionar uma tensão de 1.5V para ser somado ao sinal do filtro anti-aliasing. O circuito da figura 23 é responsável por ajustar uma tensão de 3.3V a partir de uma entrada de 15V da fonte de alimentação. A equação 3.30 mostra a relação entre as resistências para se obter a tensão de saída desejada (UNISONIC TECHNOLOGIES CO., 2016).

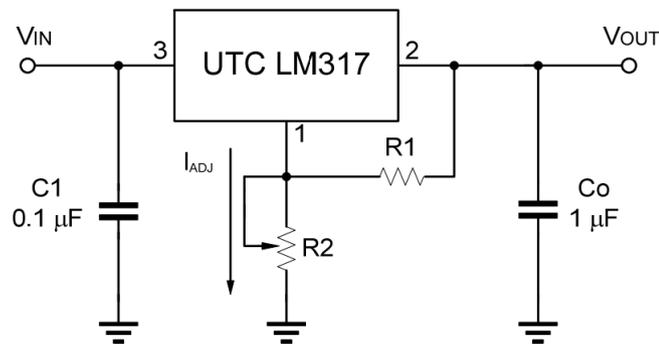


Figura 23 – Circuito regulador de tensão ajustável para 3.3V. Fonte:(UNISONIC TECHNOLOGIES CO., 2016, p.4).

$$V_o = 1.25V \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} R_2 \quad (3.30)$$

"O capacitor C_1 é necessário quando o regulador está em uma distância considerada da fonte de alimentação e C_0 é necessário para melhorar a resposta transitente."(UNISONIC TECHNOLOGIES CO., 2016, p.4). Este circuito deve ser ajustável pelo Trimpot para obter 3.3V, para isso definiu-se o resistor $R_1 = 1k\Omega$ e o trimpot de $2k\Omega$ multivoltas para obter um ajuste fino.

Um amplificador operacional quando entra em curto transfere a tensão de alimentação em sua saída, com isso o circuito da figura 24 tem a função de além de ajustar uma tensão de 1.5V para o somador, separar o circuito de aquisição e condicionamento de sinais da entrada do microcontrolador, de forma que na ocorrência de um defeito em algum amplificador operacional ele proteja a entrada do microcontrolador. O trimpot será multivoltas para obtenção de um ajuste fino da tensão.

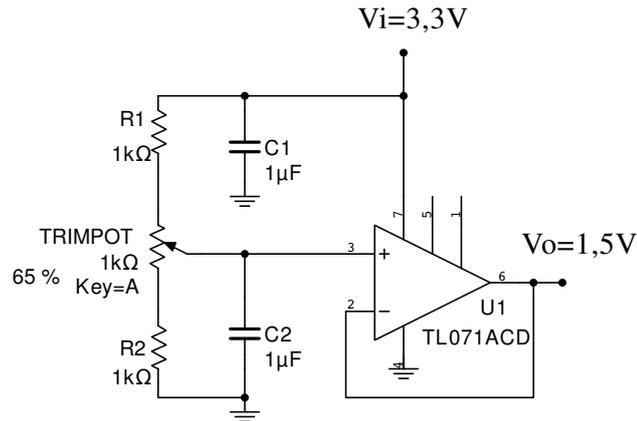


Figura 24 – Circuito regulador de tensão ajustável para 1.5V. Fonte: Adaptado (CARTER, 2012).

3.6 A Escolha do Amplificador Operacional

A escolha do AmpOp deve levar em consideração os seguintes critérios (BAKER; MICROCHIP, 2003):

1. Especificações principais:

- Largura de banda: A largura de banda deve ser de cem vezes superior a frequência de corte do filtro, conforme equação 3.31;
- Slew Rate (SR): deve ser maior ou igual ao produto de 2π , a tensão de saída e a frequência de corte, conforme a equação 3.32;

2. Especificações secundárias:

- *Input Common Mode Voltage* (V_{CMR}): esta variável define o limite do alcance do sinal de entrada;
- *Input Current Bias* (I_B): esta variável indica a quantidade de corrente entrando ou saindo dos pinos de entrada do AmpOp.

$$BW = 100fc \quad (3.31)$$

$$BW = 100 * 5000 = 0.5MHz$$

$$SlewRate \geq 2\pi V_{o(p-p)} \quad (3.32)$$

$$SlewRate \geq 2\pi * 2 * 2.5 * \sqrt{2} * 5000 = 222.144 * 10^3 \frac{V}{s}$$

$$SlewRate \geq \frac{222.144 * 10^3 V}{1 * 10^6 \mu s}$$

$$SlewRate \geq 0.222 \frac{V}{\mu s}$$

Visando atender as especificações mínimas acima, foi selecionado o amplificador operacional TL071, as características desse amplificador operacional estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do amplificador operacional TL071. Fonte:([TEXAS INSTRUMENTS, 2015](#)).

Característica	Valor
Largura de Banda	3 MHz
Slew Rate	13V/ μs
V_{CMR}	-12 a 15 V
I_B	65 a 200 nA
CMRR	100 dB

3.7 O Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é constituído de uma fonte de alimentação com entrada em 220V em corrente alternada e uma saída simétrica com $\pm 15V$ em corrente contínua, que deve ser capaz de alimentar os sensores de tensão e corrente e os AmpOp's. A tabela 6 mostra o consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados fornecendo a corrente mínima de projeto para o sistema de alimentação.

Tabela 6 – Consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados. Fonte: Própria.

Componentes	Quantidade	Corrente Unitária (mA)	Total de Corrente (mA)
LV 25-P	4	10(entrada)+25(saída)	140
LA 55-P	4	10(entrada)+50(saída)	240
TL071	25	1.5(nominal), 2.5(máxima)	62.5
Total			442.5

O transformador abaixador foi escolhido tendo em mente que a fonte deve ser simétrica, e para isso necessita que o Trafo tenha um tap central, 15V(RMS) de secundário para alimentar o circuito e fornecer uma corrente mínima de até 0.442A. O transformador reduz a tensão da rede de 220V(RMS) para 15V(RMS), em seguida essa tensão é retificada por um retificador em ponte de diodos obtendo uma tensão contínua pulsante com o dobro da frequência inicial.

A tensão no regulador de tensão deve ser no mínimo 15V, com isso o ripple não pode ser maior que a tensão proveniente da ponte retificadora menos a tensão do regulador, ou seja $(15\sqrt{2} - 1.4) - 15 = 4.81V$, como a tensão do transformador é um pouco maior que a tensão de saída tem-se uma considerável faixa permitida para o *ripple*, com isso

considerando uma margem de segurança e uma tensão mais estável para o regulador define-se que a tensão de ripple V_r seja de 5% da tensão máxima da fonte. "Através da equação 3.33 pode-se calcular o capacitor necessário para se obter tal variação." (BUSO, 2016, p.29).

$$C = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3}fV_r} \quad (3.33)$$

$$C = \frac{1}{4\sqrt{3} * 120 * 0.75}$$

$$C = 1.60375 * 10^{-3}$$

$$C = 1603.75\mu F$$

Como não existe um capacitor com essa capacitância comercialmente opta-se por utilizar uma associação em série de dois capacitores de $3300\mu F$. Os capacitores cerâmicos de $0.1\mu F$ foram utilizados para uma melhor resposta transiente assim como no regulador de tensão. Os reguladores de tensão são os LM 7815 para tensões positivas e o LM 7915 para tensões negativas ajustando a tensão de saída para $\pm 15V$. Por fim, a seguir encontra-se o esquemático do sistema de alimentação.

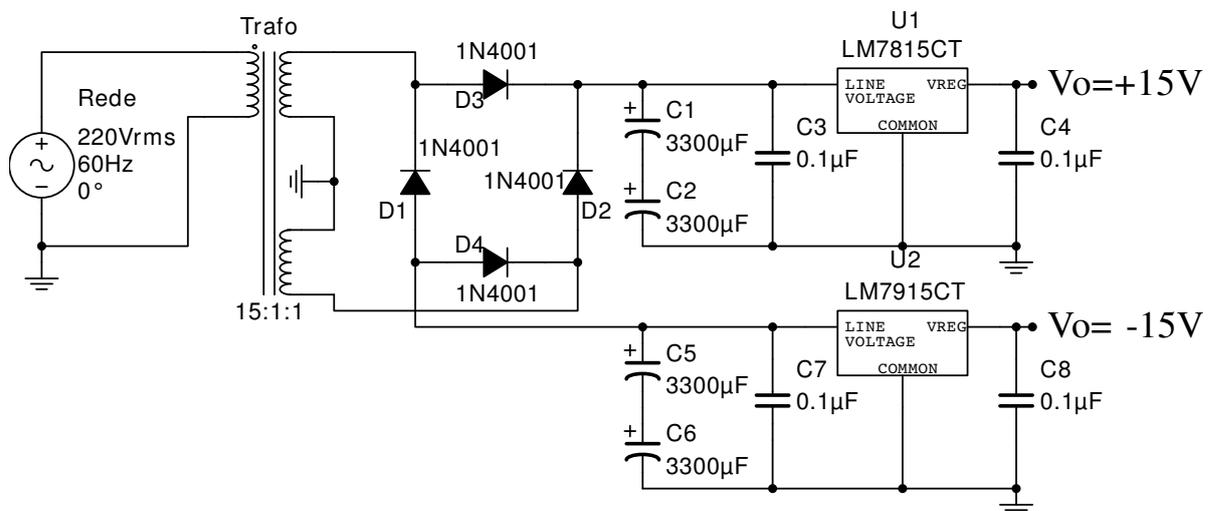


Figura 25 – Esquemático do sistema de alimentação. Fonte:Própria.

3.8 Simulações

A figura 26 mostra o circuito completo do filtro e condicionador de sinais para um sensor, o diodo zener na saída com $V_z = 3.3V$ tem a função de proteger a entrada do microcontrador em caso de algum amplificador operacional entrar em curto. Este trabalho utilizará oito circuitos idênticos a este sendo quatro deles utilizando o sensor de tensão e quatro utilizando o sensor de corrente.

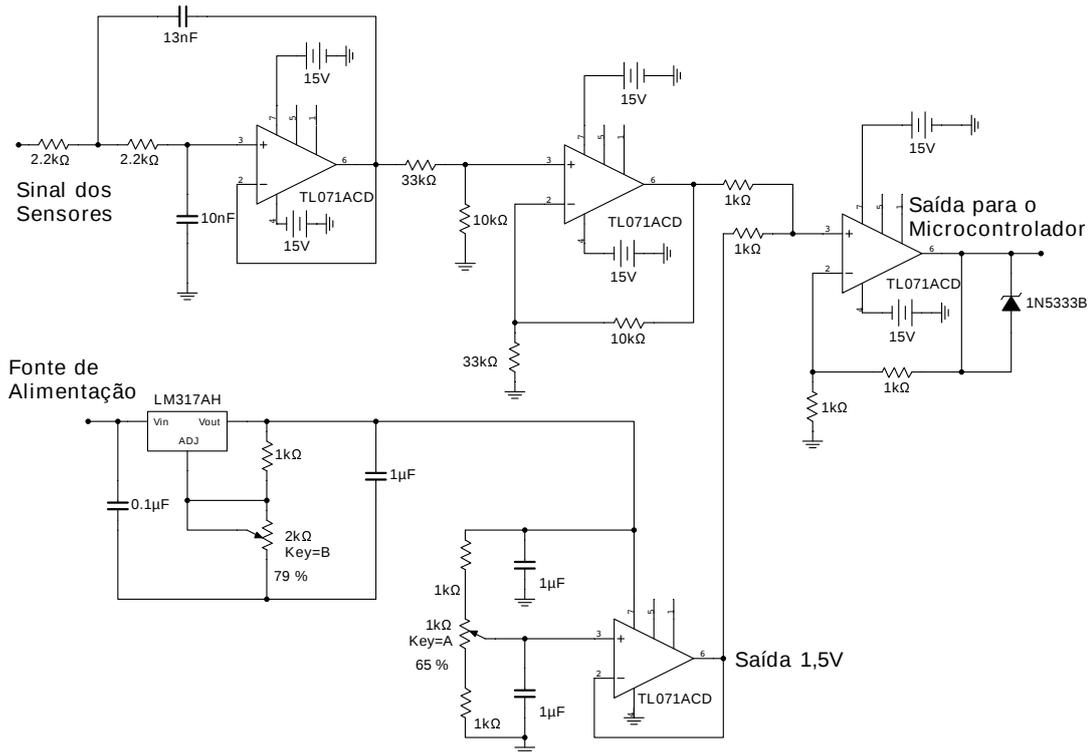


Figura 26 – Circuito completo do do filtro e condicionador de sinais. Fonte: Própria.

As figura 27 mostra o os sinais de entrada e saída do circuito do filtro com um ruído de 0,1V, evidenciando que ele realmente atenua os sinais com frequência acima da frequência de corte $f_c = 5kHz$.

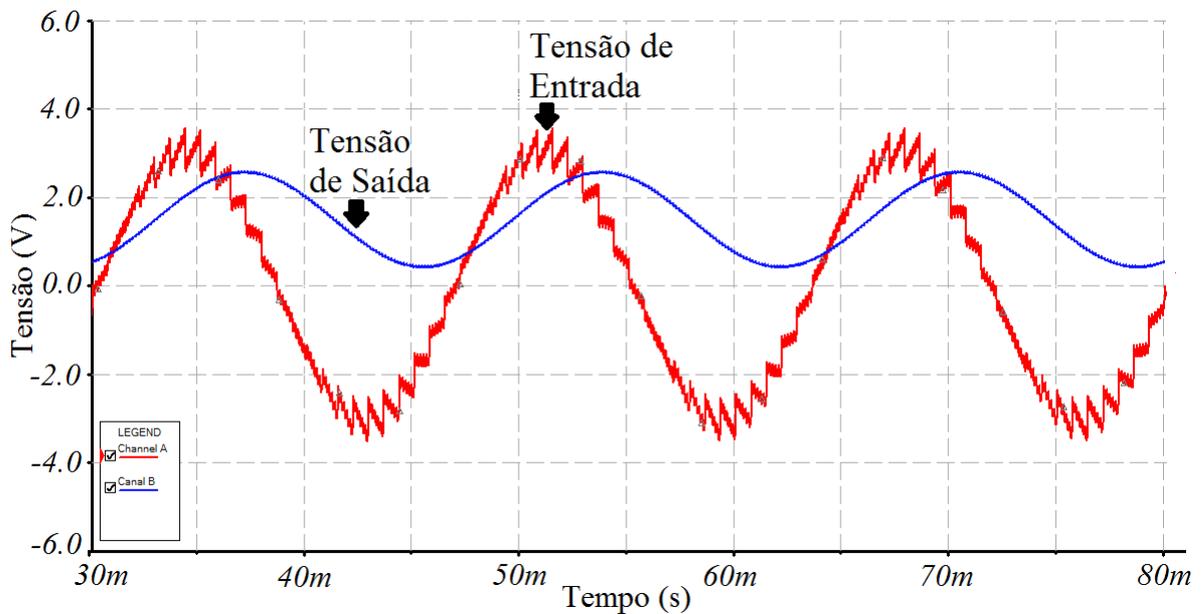


Figura 27 – Gráfico com os sinais de entrada e saída com ruído de 7kHz. Fonte:Própria.

O circuitos foram simulados no *software* Multisim, a figura 28 mostra a simulação de todos os subcircuitos.

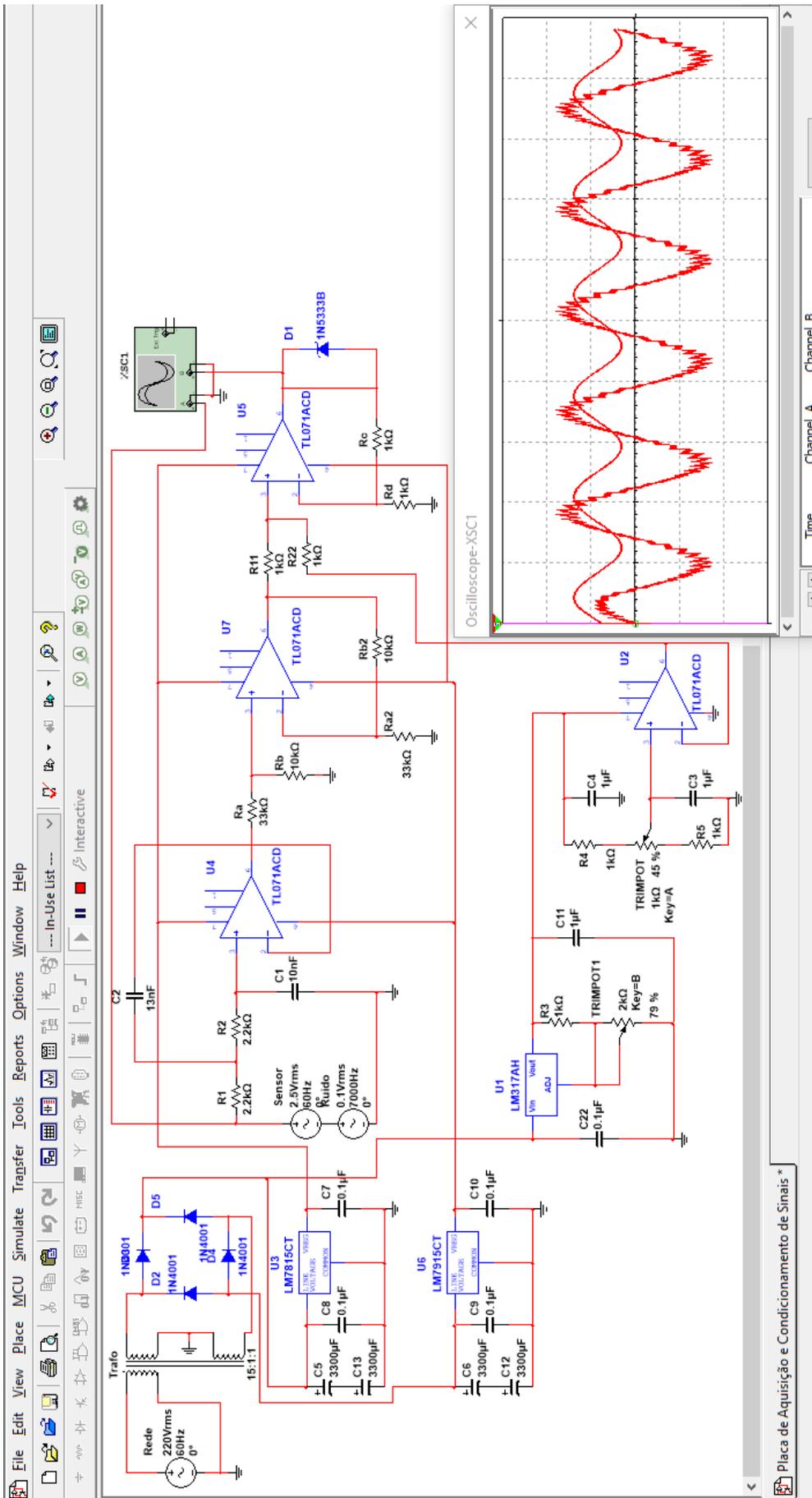


Figura 28 – Simulação da placa de aquisição de dados. Fonte: Própria.

4 Considerações Finais

Conforme ressaltado anteriormente, deste Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo a construção de um sistema de monitoramento de qualidade de energia. Este dispositivo será constituído por elementos de hardware, os quais se caracterizam por placas de aquisição e condicionamento de sinais, bem como elementos de software, destinados ao processamento dos dados medidos.

Até a presente etapa dos trabalhos, foram definidos as topologias e elementos que constituem a placa de aquisição e condicionamento de sinais. Os trabalhos a serem abordados na sequência deste projeto são:

- ◇ A elaboração do layout da placa de circuito impresso e testes para medição de tensão e corrente.
- ◇ Estudo de microcontroladores e implementação de funções para aquisição de sinais.
- ◇ Implementação e validação de funções para armazenamento da forma de onda.
- ◇ Implementação e validação de funções para cálculo de valor eficaz.
- ◇ Implementação e validação de funções para cálculo de potência ativa, reativa e aparente.
- ◇ Implementação e validação de funções para cálculos de distorções harmônicas.
- ◇ Implementação e validação de funções para cálculo de desequilíbrios de tensão.
- ◇ Implementação e validação de funções para caracterização de variações de tensão.

Referências

- ANEEL, A. N. d. E. E. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST*: Módulo 8-qualidade de energia elétrica. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Acesso em: 23 de Junho de 2017. Citado 4 vezes nas páginas 8, 13, 19 e 20.
- BAKER, B. C.; MICROCHIP, T. *Select the Right Operational Amplifier for your Filtering Circuits-Analog Design Note ADN003*. [S.l.], 2003. Citado na página 36.
- BOYLESTAD, R. L. *Introdução à Análise de Circuitos*. 10. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 6, 22, 23, 24 e 25.
- BUSO, R. R. *Projeto e construção de uma fonte de alta tensão DC para aplicação em pulverização catódica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2016. Citado na página 38.
- CARTER, B. *Op Amps for Everyone*. [S.l.]: Elsevier Science, 2012. ISBN 9780123944061. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. *Introduction to Electric Circuits*. 9. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781118560600. Citado na página 32.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 1995. Citado 7 vezes nas páginas 6, 12, 16, 17, 18, 19 e 20.
- FERNANDES, T. D. M. *Análise da Qualidade de Energia Elétrica em Instalações de Grande Complexidade*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2012. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 20.
- LEM. *Voltage Transducer LV 25-P*: Electrical data. [S.l.], 2014. 4 p. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf>. Acesso em: 21 de Junho de 2017. Citado 4 vezes nas páginas 6, 8, 28 e 29.
- LEM. *Currente Transducer LA 55-P*: Electrical data. [S.l.], 2015. 3 p. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/la_55-p_e.pdf>. Acesso em: 21 de Junho de 2017. Citado 4 vezes nas páginas 6, 8, 29 e 30.
- MALVINO, A.; BATES, D. J. *Eletrônica*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Ltda, 2007. Volume 2. Citado 4 vezes nas páginas 8, 23, 27 e 33.
- MEHL, E. L. Qualidade da energia elétrica. *Universidade Federal do Paraná*, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 6, 12 e 19.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. [S.l.]: Person Prentice Hall, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 21.
- TEXAS INSTRUMENTS. *TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers*. [S.l.], 2015. (SLOS080M). Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/slos080m/slos080m.pdf>>. Acesso em: 05 de Julho de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 37.

UNISONIC TECHNOLOGIES CO. *LM 317 Linear Integrated Circuit*: High current 1.3v to 37v adjustable voltage regulator. [S.l.], 2016. 5 p. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 35.

VELASCO, L. N. *Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira-SP, Abril 2007. Citado 4 vezes nas páginas 6, 16, 17 e 20.