



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

“Sistema de Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Normativos e Sugestão de Características para um Futuro Protótipo”

RELATÓRIO DE PROJETO FINAL

ALUNO: ALAOR FARIA MIGUEL – 97/19822
ORIENTADORES: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO
FRANCISCO ASSIS DE OLIVEIRA NASCIMENTO

BRASÍLIA, FEVEREIRO DE 2003.

AGRADECIMENTOS:

Acima de tudo, gostaria de dedicar este trabalho à fonte de todo bem e sabedoria: Deus. Agradecer-Lhe é mais que uma obrigação, visto que nada seria sem a Sua proteção e bênçãos.

Em segundo lugar vem a minha família que, com todo carinho e confiança, deu-me condições de obter mais esta conquista.

Também não poderia olvidar a participação marcante do professor Anésio, não só como orientador deste projeto, mas como amigo nos mais diversos momentos.

Merecem também a minha gratidão especial os demais professores que tiveram uma maior participação na minha acadêmica, dentre eles: o professor Assis, Adson, Lélío e Beaklini.

Por fim, gostaria de dizer muito obrigado a todos os professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica e da UnB que, de forma direta ou não, contribuíram para que eu chegasse onde estou hoje.

ÍNDICE GERAL:

1 – INTRODUÇÃO	01
2 – QUALIDADE DA ENERGIA	02
2.1 – Definição.....	02
2.2 – Histórico.....	02
2.3 – Itens que caracterizam uma rede com problemas de qualidade.....	03
3 – O QUE DIZ A LEGISLAÇÃO	05
3.1 – Considerações iniciais.....	05
3.2 – Normas aplicadas à QEE no Brasil.....	05
3.2.1 – Resolução 24/2000 da ANEEL.....	05
3.2.2 – Resolução 505/2001 da ANEEL.....	10
3.2.3 – Procedimentos de Rede do ONS.....	15
3.2.4 – Procedimentos de Distribuição.....	20
4 – EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	23
4.1 – Características necessárias - Protocolo.....	23
4.1.1 – Sinais a serem medidos.....	24
4.1.2 – Técnicas de medição.....	24
4.1.3 – Intervalos de medição.....	25
4.1.4 – Armazenamento dos resultados.....	26
4.1.5 – Formação dos bancos de dados.....	27
4.1.6 – Portabilidade.....	27
4.1.7 – Segurança.....	27
4.1.8 – Comunicação.....	28
4.1.9 – Software Dedicado.....	28
4.1.10 – Circuitos de entrada.....	28
4.1.11 – Sensores.....	28
4.1.12 – Tensão de alimentação.....	31
4.1.13 – Precisão.....	32
4.1.14 – Demais características.....	32
4.2 – Avaliação de medidores comercialmente disponíveis.....	32
4.2.1 – Medidor A.....	33
4.2.2 – Medidor B.....	35
4.3 – Medidores atualmente em estudo.....	37
4.3.1 – Projeto SIDAQEE.....	37

4.3.2 – Sugestões para um futuro protótipo.....	39
5 – FILTRO ANTI-ALIASING.....	41
5.1 – Filtro passa-baixa ideal.....	42
5.2 – Aproximação de Butterworth.....	42
5.3 – Topologia Sallen-Key.....	45
5.4 – Filtros com capacitores chaveados.....	47
5.5 – Projeto e implementação do filtro anti-aliasing.....	48
6 – CONCLUSÃO.....	58
7 – BIBLIOGRAFIA.....	59
ANEXO I.....	61
ANEXO II.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 2.1 –	Exemplos de distúrbios causadores de depreciação da qualidade da energia.....	04
Figura 4.1 –	Intervalos de medição sugeridos para o protocolo.....	26
Figura 4.2 –	Respostas em frequência de TPI's para diversas classes de tensão.....	30
Figura 4.3 –	Resposta em frequência de um TPC ($f_0 = 50\text{Hz}$).....	30
Figura 4.4 –	Resposta em frequência de um transformador de corrente.....	31
Figura 4.5 –	Montagem realizada para os ensaios dos medidores.....	33
Figura 4.6 –	Análise harmônica efetuada pelo Medidor A.....	34
Figura 4.7 –	Análise harmônica realizada pelo Medidor A.....	34
Figura 4.8 –	Análise harmônica efetuada pelo Medidor B.....	35
Figura 4.9 –	Outra análise harmônica realizada com o Medidor B.....	36
Figura 4.10 –	Diagrama de blocos do projeto SIDAQEE.....	38
Figura 5.1 –	Resposta de um filtro passa-baixa ideal.....	42
Figura 5.2 –	Gráfico de Bode da amplitude de filtros passa-baixa Butterworth de diversas ordens.....	43
Figura 5.3 –	Gráfico comparativo da fase da resposta em frequência de filtros passa-baixa Butterworth de diversas ordens.....	43
Figura 5.4 –	Diagrama de um filtro passa-baixa Sallen-Key.....	46
Figura 5.5 –	Exemplo de um circuito simples e o seu correspondente a capacitor chaveado.....	47
Figura 5.6 –	Resposta em frequência de cada filtro Sallen-Key individual, juntamente com o fator de qualidade correspondente.....	49
Figura 5.7 –	Gráfico de Bode do filtro de sexta ordem com $\omega_c = 7680\text{Hz}$ ou 48255 rad/s	50
Figura 5.8 –	Gráfico de Bode do filtro de sexta ordem com frequência de corte igual a 3840Hz ou 24127 rad/s	51
Figura 5.9 –	Diagrama completo do filtro anti-aliasing.....	51
Figura 5.10 –	Diagrama completo do filtro anti-aliasing com $\omega_c = 7680\text{Hz}$, incluindo a descrição valor dos componentes.....	53
Figura 5.11 –	Diagrama de Bode do filtro passa-baixa Butterworth de sexta ordem, implementado no laboratório.....	54
Figura 5.12 –	Diagrama de ligação e pinagem do circuito integrado TLC14.....	55
Figura 5.13 –	Gráfico de Bode do filtro a capacitor chaveado com frequência de corte igual a 7680Hz	56

ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 3.1 –	Limites de Continuidade por Unidade Consumidora, para valores de tensão maiores ou iguais a 69kV e menores que 230kV.....	08
Tabela 3.2 –	Limites de Continuidade por Unidade Consumidora, para valores de tensão maiores ou iguais a 1kV e menores que 69kV.....	09
Tabela 3.3 –	Limites de Continuidade por Unidade Consumidora localizada no perímetro urbano atendida em tensão inferior a 1kV ou localizada fora do perímetro urbano com potência disponibilizada igual ou superior a 100kVA.....	09
Tabela 3.4 –	Limites de Continuidade por Unidade Consumidora localizada fora do perímetro urbano com potência disponibilizada inferior a 100kVA.....	09
Tabela 3.5 –	Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais igual ou superiores a 230kV.....	10
Tabela 3.6 –	Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais superiores a 1kV e inferiores a 230kV.....	10
Tabela 3.7 –	Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais iguais ou inferiores a 1kV.....	11
Tabela 3.8 –	Classificação da Tensão de Atendimento para valores não padronizados inferiores a 1kV.....	11
Tabela 3.9 –	Limites globais de tensões harmônicas expressos em porcentagem da tensão fundamental.....	19
Tabela 3.10 –	Denominação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	20
Tabela 4.1 –	Recomendações para o uso de TP's.....	29
Tabela 5.1 –	Localização dos pólos de um filtro passa-baixa Butterworth.....	44
Tabela 5.2 –	Sensibilidade dos parâmetros do circuito em relação ao valor de seus componentes.....	52
Tabela 5.3 –	Dados coletados em laboratório durante o ensaio do filtro passa-baixas Butterworth de sexta ordem.....	54
Tabela 5.4 –	Dados coletados em laboratório durante o ensaio do filtro a capacitor chaveado.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS:

1 – INTRODUÇÃO

QEE– Qualidade da Energia Elétrica.....	01
---	----

3 – O QUE DIZ A LEGISLAÇÃO

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.....	06
FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.....	06
Ca(i) – Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração.....	06
t(i) – Duração de cada evento (i), no período de apuração.....	06
i – Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras.....	06
k – Número máximo de eventos no período considerado.....	06
Cc – Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.....	06
DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora.....	07
FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora.....	07
DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora.	07
t(i) – Tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora, no perí- odo de apuração.....	07
i – Índice de interrupções da unidade consumidora considerada, variando de 1 a n.....	07
n – Número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração.....	07
DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária.....	12
nlp – Número de leituras situadas nas faixas precárias.....	12
1008 – Número de leituras válidas a cada 10 minutos no período de observação (7 dias).....	12
DRC – Duração Relativa da Transgressão Crítica.....	12
nlc – Número de leituras situadas nas faixas críticas.....	12
1008 – Número de leituras válidas a cada 10 minutos no período de observação (7 dias).....	12
ICC – Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica.....	12
CC – Total de unidades cons. com leituras situadas na faixa crítica.....	12

CA	– Total mensal de unidades consumidoras.....	12
DIPC	– Duração da Interrupção do Ponto de Controle.....	16
FIPC	– Frequência da Interrupção do Ponto de Controle.....	16
DMIPC	– Duração Máxima da Interrupção do Ponto de Controle.....	16
K	– Fator de desequilíbrio de tensão.....	18
V-	– Módulo da tensão de seqüência negativa.....	18
V+	– Módulo da tensão de seqüência positiva.....	18
a	– Operador rotacional, cujo módulo é um e o ângulo é 120°	18
Va,		
Vb e Vc	– Tensões de fase.....	18
DTHT	– Distorção de Tensão Harmônica Total.....	19
Vh	– Tensão harmônica de ordem h em volts.....	19
V1	– Tensão harmônica nominal em volts.....	19

4 – EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

TJ	– Intervalo de janela ou janela de medição.....	25
TCD	– Intervalo de curtíssima duração.....	25
TC	– Intervalo de curta duração.....	25
TD	– Intervalo diário.....	25
TS	– Intervalo semanal.....	25

5 – FILTRO ANTI-ALIASING

k	– Ganho DC.....	45
w₀	– Frequência de canto.....	45
Q	– Fator de qualidade.....	45



1 – INTRODUÇÃO:

Há algumas décadas atrás, o estudo da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) possuía pouca importância, uma vez que os equipamentos até então utilizados eram menos sensíveis aos fenômenos relacionados à qualidade, e o número de dispositivos eletrônicos não era tão expressivo.

Entretanto o cenário hoje é bem diferente. O uso de aparelhos microprocessados vem se difundindo bastante a cada dia – desde simples eletrodomésticos até processos industriais automatizados – o que tem aumentado significativamente a sua vulnerabilidade frente a fenômenos transitórios intrínsecos aos sistemas elétricos. Disso resulta um crescimento considerável do número de interrupções, provocando prejuízos cada vez maiores.

Tal fato vem adquirindo importância estratégica, tanto para os consumidores, como para as empresas de energia elétrica, forçando, em todo o mundo, a adoção de procedimentos normativos que possibilitem o gerenciamento do sistema elétrico dentro desse novo contexto de operação.

Diversos esforços têm sido voltados à elaboração de uma nova legislação brasileira para regulamentar o setor no âmbito da QEE, requisitando diversos tipos de ações, metodologias e resultados.

Uma dessas ações está voltada à proposição de um protocolo de medição, o qual definirá as características e os requisitos técnicos necessários a futuros sistemas de monitoração da qualidade da energia.

Sobre o tema já existem alguns trabalhos desenvolvidos, dentre os quais se destacam os realizados pela Universidade Federal de Uberlândia [9] [10] e as especificações técnicas contidas no processo licitatório realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o ano de 2003, sobre a aquisição de equipamentos de monitoração [11].

Neste ínterim, surge a idéia do desenvolvimento desse estudo, que, em linhas gerais, visa fazer uma análise da legislação e dos trabalhos disponíveis atualmente e propor algumas diretrizes para o protocolo a ser implantado pela ANEEL, incluindo algumas sugestões para um futuro protótipo de sistema de monitoração da QEE.

A importância desse projeto é evidente, visto que o setor carece de documentação a respeito e as informações disponíveis ainda se encontram meio esparsas. Ademais, é flagrante a deficiência da tecnologia nacional no campo de medidores de qualidade da energia, sendo muito oportuna qualquer pesquisa que venha produzir algum equipamento para esse fim.



2 – QUALIDADE DA ENERGIA:

2.1 – DEFINIÇÃO:

O termo Qualidade da Energia Elétrica pode ser aplicado a qualquer distúrbio que possa ocorrer na magnitude, frequência e forma de onda da tensão e/ou corrente elétrica. Esta designação também é empregada a interrupções de natureza transitória ou permanente que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica.

Tal conceito apresenta conotações particulares, dependendo do referencial adotado. Por exemplo: os fabricantes de equipamentos eletrônicos associam a qualidade da energia às características elétricas que garantam o funcionamento adequado dos seus equipamentos. Já os grandes consumidores preferem ligar o termo qualidade à confiabilidade do sistema elétrico.

No presente trabalho, um sistema elétrico de qualidade é definido como aquele que garanta, a custos satisfatórios, o funcionamento adequado, seguro e confiável de processos e equipamentos das unidades consumidoras e do sistema elétrico supridor, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas [1].

2.2 – HISTÓRICO:

No Brasil a preocupação com a qualidade da energia elétrica teve início no final da década de 70, quando o então órgão regulador – o Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAEE) – emitiu as Portarias 046 e 047 de abril de 1978 e a Portaria 031 de Abril de 1980, expressando a necessidade de se assegurar aos consumidores “um serviço adequado de fornecimento de energia elétrica” [2].

A intenção era estabelecer métodos uniformes para apuração dos índices de continuidade e definir limites de variação de tensão de regime permanente a serem considerados pelas empresas de energia elétrica.

Na época o enfoque dado à QEE ficava restrito apenas à continuidade do fornecimento e às variações de tensão em regime permanente.

Com o surgimento de grandes cargas industriais com chaveamento eletrônico, principalmente retificação, a distorção harmônica gerada passou a representar um problema que as empresas de energia tiveram que tratar.

Adicionalmente, a operação de fornos a arco, que provocam flutuações de tensão responsáveis pelo efeito de cintilação, cargas monofásicas que introduzem desequilíbrios no sistema, tipo ferrovia, e outras que de alguma forma poderiam ser responsáveis por perturbações no sistema elétrico, passaram a ser estudadas e tratadas como “cargas especiais”.



O Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS) e o Grupo Coordenador para a Operação Interligada (GCOI) iniciaram trabalhos para propor métodos de medição, metodologias de estudo e limites que deveriam ser adotados no gerenciamento e controle destas perturbações.

No início da década de 90, com a modernização do parque industrial brasileiro, motivada pela abertura da economia, aumentou-se o número de processos sensíveis a variações momentâneas de tensão, fazendo com que fossem agravados os problemas resultantes das interrupções de cargas.

Tal fato gerou prejuízos vultosos sofridos da parte dos consumidores, desencadeando reclamações e pressões sobre as empresas de energia elétrica.

Quase que de forma inesperada, as empresas de energia elétrica se depararam com reclamações de interrupções de cargas, devidos a fenômenos no sistema elétrico que sempre foram considerados normais ao cotidiano operacional.

Neste quadro, consolidava-se a necessidade premente de se atacar a questão da qualidade da energia de forma estruturada, tendo sido emitido pela Secretaria do Estado de São Paulo/Comissão de Serviços Públicos de Energia CSPE o documento “Projeto de Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica” [2].

A concepção, implantação e operacionalização de um Sistema de Gestão e Controle da Qualidade da Energia Elétrica (SGC/QEE), abrangente e adequado às particularidades diversas do sistema elétrico brasileiro, representa uma tarefa complexa, na qual estarão envolvidos: todo conjunto de resoluções da ANEEL, os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e todas as recomendações que estabelecem as diretrizes e requisitos técnicos para os equipamentos (hardware), para os protocolos de medição e comunicação de dados e para as sistemáticas de manipulação de dados e apuração de indicadores [2].

2.3 – ITENS QUE CARACTERIZAM UMA REDE COM PROBLEMAS DE QUALIDADE:

Vários distúrbios contribuem para a degradação da qualidade da energia. Eles são muitas vezes inter-relacionados e podem ocorrer de maneira simultânea. A causa de um evento pode ser a própria ocorrência de outro(s), o que dificulta a identificação da causa primeira que o deflagrou.

Dentre os principais fatores que concorrem para a perda de qualidade de um sistema elétrico, vale citar:

- Variações sustentadas de tensão:
 - Sobretensões sustentadas;
 - Subtensões sustentadas;
- Variações de curta duração:
 - Elevações momentâneas de tensão;
 - Afundamentos momentâneos de tensão;
- Interrupções;



- Desequilíbrios;
- Flutuação de tensão;
- Transitórios;
- Distorções na forma de onda:
 - Harmônicas;

A figura 2.1 ilustra alguns exemplos de distúrbios que contribuem para a perda de qualidade da energia, descritos no presente capítulo.

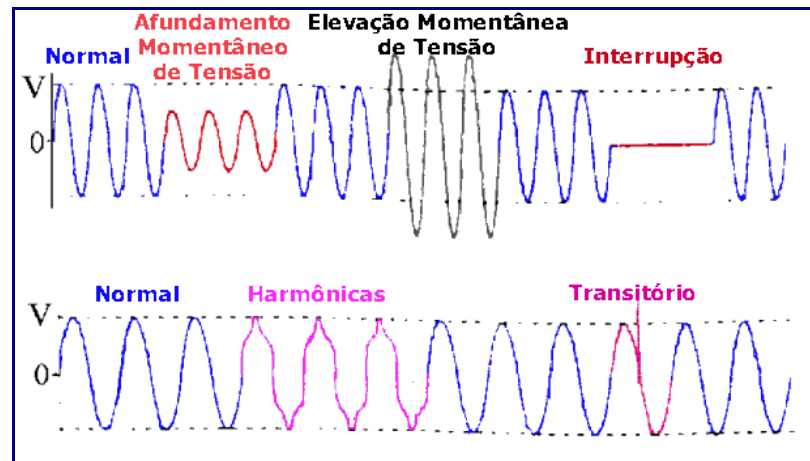


Figura 2.1 – Exemplos de distúrbios causadores de depreciação da qualidade da energia.



3 – O QUE DIZ A LEGISLAÇÃO:

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS:

Não existe ainda um consenso internacional sobre os indicadores, parâmetros, normas e limites que caracterizem adequadamente os níveis de qualidade da energia elétrica em um sistema de potência.

No Brasil, existe o Grupo Especial de Qualidade da Energia Elétrica (GTE/QEE), coordenado pelo ONS e aberto a todos os agentes do setor elétrico nacional, com o objetivo de discutir e sugerir indicadores e padrões da Rede Básica, associados à QEE, os quais estão sendo incluídos nos Procedimentos de Rede a serem aprovados pela ANEEL.

Estão sendo também elaborados, sob a supervisão da ANEEL, os Procedimentos de Distribuição. Serão constituídos de documentos normativos na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

No presente momento, a QEE no país está subordinada a duas normas principais:

1. **Resolução 024/2000 da ANEEL:** De 27 de fevereiro de 2000, a qual define os padrões de continuidade do fornecimento de energia elétrica para consumidores abaixo de 230 kV [5];
2. **Resolução 505/2001 da ANEEL:** De 26 de novembro de 2001, que estabelece os padrões relativos à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente para sistemas de energia elétrica [6].

3.2 – NORMAS APLICADAS À QEE NO BRASIL:

3.2.1 – RESOLUÇÃO 24/2000 DA ANEEL:

Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica, nos seus aspectos de duração e frequência, a serem observadas pelas concessionárias e permissionárias de serviço público de energia elétrica às unidades consumidoras. Foram definidos, na mesma resolução, os indicadores de continuidade a serem observados:



INDICADORES DE CONTINUIDADE DE CONJUNTO:

Um conjunto é definido como qualquer agrupamento de unidades consumidoras, global ou parcial, de uma mesma área de concessão de distribuição, estabelecido pela concessionária ou permissionária e aprovado pela ANEEL.

- **DURAÇÃO EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO POR UNIDADE CONSUMIDORA (DEC):** Intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
- **FREQÜÊNCIA EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÃO POR UNIDADE CONSUMIDORA (FEC):** Número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.

Os indicadores DEC e FEC podem ser calculados pelas equações (3.1) e (3.2), respectivamente:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i) \times t(i)}{Cc} \quad (3.1)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i)}{Cc} \quad (3.2)$$

Onde:

- $Ca(i)$ = Número de unidade consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;
- $t(i)$ = Duração de cada evento (i), no período de apuração;
- i = Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;
- k = Número máximo de eventos no período considerado;
- Cc = Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.



INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS:

- **DURAÇÃO DE INTERRUPÇÃO INDIVIDUAL POR UNIDADE CONSUMIDORA (DIC):** Intervalo de tempo que, no período de observação, em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
- **FREQÜÊNCIA DE INTERRUPÇÃO INDIVIDUAL POR UNIDADE CONSUMIDORA (FIC):** Número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora.
- **DURAÇÃO MÁXIMA DE INTERRUPÇÃO CONTÍNUA POR UNIDADE CONSUMIDORA (DMIC):** Tempo máximo de interrupção contínua, da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer.

Os indicadores individuais DIC e FIC são apurados através das equações (3.3) e (3.4), respectivamente:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (3.3) \qquad FIC = n \quad (3.4)$$

Onde:

- $t(i)$ = Tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada, no período de apuração;
- i = Índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n;
- n = Número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração.

As concessionárias deverão apurar os indicadores de continuidade de duas formas distintas:

- Considerando as interrupções com duração maior ou igual a 3 minutos;
- Considerando as interrupções com duração maior ou igual a 1 minuto.

A partir de janeiro de 2005, os indicadores de continuidade a serem apurados e enviados à ANEEL deverão contemplar todas as interrupções com duração maior ou igual a 1 minuto, quando deverão ser estabelecidos novos padrões de continuidade considerando-se os dados disponibilizados nas concessionárias.

Na apuração dos indicadores deverão ser consideradas todas as interrupções que atingirem as unidades consumidoras, admitidas apenas as seguintes exceções:

- Falha nas instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros;
- Interrupção decorrente de obras de interesse exclusivo do consumidor e que afete somente a unidade consumidora do mesmo.



Ficou também determinado o estabelecimento de metas entre a ANEEL e as concessionárias para os indicadores individuais, de conjunto, área de concessão ou global da empresa a partir das seguintes disposições:

- METAS PARA OS INDICADORES DE CONTINUIDADE DOS CONJUNTOS:** Em 30 de junho de 2000 foram estabelecidas metas, trimestrais e anuais de continuidade por conjunto, tendo como referência os valores históricos dos indicadores informados pela respectiva concessionária, as metas estabelecidas nos contratos de concessão e a análise comparativa de desempenho das concessionárias. Tais metas entraram em vigor a partir de janeiro de 2001 e são negociadas a cada revisão ordinária das tarifas.
- METAS PARA OS INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS:** A partir de janeiro de 2003 as metas de DIC, FIC e DMIC deverão obedecer aos valores estabelecidos nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 seguintes, de acordo com as metas anuais definidas entre a ANEEL e as concessionárias para cada conjunto de unidades consumidoras.

Tabela 3.1 – Limites de Continuidade por Unidade Consumidora, para valores de tensão maiores ou iguais a 69kV e menores que 230kV.

Faixa de Variação das Metas Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Valores Limites de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Faixa de Tensão Elétrica de Atendimento: 69 kV ≤ Tensão < 230 kV						
	DIC (horas)			DMIC (horas)	FIC (interrupções)		
	Anual	Trimestral	Mensal		Anual	Trimestral	Mensal
0 - 20	8	4	3	2	8	4	3
> 20 - 40	12	6	4	3	12	6	4
> 40	16	8	6	3	16	8	6

Fonte: Resolução 24/2000 da Aneel [5].



Tabela 3.2 – Limites de Continuidade por Unidade Consumidora, para valores de tensão maiores ou iguais a 1kV e menores que 69kV.

Faixa de Variação das Metas Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Valores Limites de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Faixa de Tensão Elétrica de Atendimento: 1 kV ≤ Tensão < 69 kV						
	DIC (horas)			DMIC (horas)	FIC (interrupções)		
	Anual	Trimestral	Mensal		Anual	Trimestral	Mensal
0 - 5	25	13	8	6	18	9	6
> 5 - 10	30	15	10	6	20	10	7
> 10 - 20	35	18	12	6	25	13	8
> 20 - 30	40	20	13	6	30	15	10
> 30 - 45	45	23	15	8	35	18	12
> 45 - 60	52	26	17	8	45	23	15
> 60	64	26	21	10	56	23	19

Fonte: Resolução 24/2000 da Aneel [5].

Tabela 3.3 – Limites de Continuidade por Unidade Consumidora localizada no perímetro urbano atendida em tensão inferior a 1kV ou localizada fora do perímetro urbano com potência disponibilizada igual ou superior a 100kVA.

Faixa de Variação das Metas Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Valores Limites de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Unidades Consumidoras localizadas no perímetro urbano atendidas em tensão inferior a 1 kV ou localizadas fora do perímetro urbano com potência disponibilizada igual ou superior a 100 kVA						
	DIC (horas)			DMIC (horas)	FIC (interrupções)		
	Anual	Trimestral	Mensal		Anual	Trimestral	Mensal
0 - 5	40	20	13	6	25	13	8
> 5 - 10	50	25	17	6	30	15	10
> 10 - 20	55	28	19	8	35	18	12
> 20 - 30	65	32	22	8	40	20	13
> 30 - 45	75	32	25	10	50	25	17
> 45 - 60	80	32	27	10	56	26	19
> 60	80	32	27	12	64	26	22

Fonte: Resolução 24/2000 da Aneel [5].

Tabela 3.4 – Limites de Continuidade por Unidade Consumidora localizada fora do perímetro urbano com potência disponibilizada inferior a 100kVA.

Faixa de Variação das Metas Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Valores Limites de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Unidades Consumidoras localizadas fora do perímetro urbano com potência disponibilizada inferior a 100 kVA						
	DIC (horas)			DMIC (horas)	FIC (interrupções)		
	Anual	Trimestral	Mensal		Anual	Trimestral	Mensal
0 - 10	80	40	27	12	40	20	13
> 10 - 20	85	43	29	12	50	25	17
> 20 - 30	90	45	30	12	60	30	20
> 30 - 45	100	48	33	14	75	38	25
> 45 - 60	110	48	37	14	90	38	30
> 60 - 80	120	48	40	16	90	38	30
> 80	120	48	40	18	96	38	32

Fonte: Resolução 24/2000 da Aneel [5].



3.2.2 – RESOLUÇÃO 505/2001 DA ANEEL:

Basicamente, esta resolução tem o intuito de estabelecer os níveis de tensão de energia elétrica, bem como definir os limites de variação das tensões a serem observadas pelo ONS, concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia.

Para as unidades consumidoras atendidas em tensão superior a 1kV, a tensão contratada com a concessionária ou ONS, no ponto de entrega ou de conexão, deve situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal do sistema elétrico. Será classificada de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura, conforme as tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais igual ou superiores a 230kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,98 TC \leq TL \leq 1,03 TC$
Precária	$0,95 TC \leq TL < 0,98 TC$ ou $1,03 TC < TL \leq 1,05 TC$
Crítica	$TL < 0,95 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Fonte: Resolução 505/2001 da Aneel [6].

Observa-se que para a tensão ser considerada adequada o seu valor deve situar entre -2% a +3% do valor contratado. Caso exceda esses limites, mas não ultrapasse 5%, ela será classificada como precária. Acima desse patamar, o nível de tensão encontra-se em um estado crítico.

Tabela 3.6 – Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais superiores a 1kV e inferiores a 230kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,03 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL < 0,95 TC$ ou $1,03 TC < TL \leq 1,05 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Fonte: Resolução 505/2001 da Aneel [6].

O sistema de classificação é análogo ao anterior. Contudo, agora as margens de tolerância são menos rígidas, devido ao nível de tensão ser menor.

Caso a unidade consumidora seja suprida com tensões iguais ou inferiores a 1kV, as Tensões de Atendimento serão classificadas de acordo com o que está exibido nas tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7 – Classificação da Tensão de Atendimento para valores nominais iguais



ou inferiores a 1kV.

TENSÕES NOMINAIS PADRONIZADAS				
Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	220 / 127	0,91 TN \leq TL \leq 1,04 TN	0,86 TN \leq TL < 0,91 TN ou 1,07 TN < TL \leq 1,06 TN	TL < 0,86 TN ou TL > 1,06 TN
	380 / 220			
Monofásica	254 / 127			
	440 / 220			

Fonte: Resolução 505/2001 da Aneel [6].

Mais uma vez, observa-se que os limites se tornam menos restritivos, isto porque agora se trata de unidades consumidoras atendidas com tensões inferiores a 1kV.

Tabela 3.8 – Classificação da Tensão de Atendimento para valores não-padronizados inferiores a 1kV.

TENSÕES NÃO-PADRONIZADAS				
Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica 4 Fios	208/120	0,94 TN \leq TL \leq 1,10 TN	0,91 TN \leq TL < 0,94 TN ou 1,10 TN < TL \leq 1,12 TN	TL < 0,91 TN ou TL > 1,12 TN
Monofásica	230/115	0,92 TN \leq TL \leq 1,05 TN	0,90 TN \leq TL < 0,92 TN ou 1,05 TN < TL \leq 1,10 TN	TL < 0,90 TN ou TL > 1,10 TN
	240/120	0,90 TN \leq TL \leq 1,04 TN	0,86 TN \leq TL < 0,90 TN ou 1,04 TN < TL \leq 1,06 TN	TL < 0,86 TN ou TL > 1,06 TN

Fonte: Resolução 505/2001 da Aneel [6].

Esses níveis de tensão não-padronizados encontram-se em desuso ultimamente. Mesmo assim foi estendido a eles o mesmo critério de classificação, porém com uma maior tolerância, visto que constituem uma parcela muito pequena do universo de consumidores.



Também estão definidos conceitos importantes como:

- **DURAÇÃO RELATIVA DA TRANSGRESSÃO DE TENSÃO PRECÁRIA (DRP):** Indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido, expresso em percentual. É calculado através da equação (3.5):

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100 \quad [\%] \quad (3.5)$$

Onde:

nlp = número de leituras situadas nas faixas precárias;
 1008 = número de leituras válidas a cada 10 minutos no período de observação (7 dias).

- **DURAÇÃO RELATIVA DA TRANSGRESSÃO DE TENSÃO CRÍTICA (DRC):** Indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido, expresso em percentual. Pode ser obtido pela equação (3.6):

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

Onde:

nlc = número de leituras situadas nas faixas críticas;
 1008 = número de leituras válidas a cada 10 minutos no período de observação (7 dias).

- **ÍNDICE DE UNIDADES CONSUMIDORAS COM TENSÃO CRÍTICA (ICC):** Indicador coletivo, baseado nas medições amostrais efetuadas em um determinado mês, calculado utilizando a equação (3.7):

$$ICC = \frac{CC}{CA} \times 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

Onde:

CC = total de unidades consumidoras com leituras situadas na faixa crítica;
 CA = total mensal de unidades consumidoras.

Os níveis de tensão são constantemente verificados. A partir desse ano, as concessionárias ficaram obrigadas a enviar mensalmente à ANEEL, as medições efetuadas em um determinado mês, bem



como os indicadores individuais (DRP e DRC). Além disso, o consumidor tem o direito de solicitar a medição da energia que lhe está sendo entregue, devendo receber o resultado em, no máximo, um mês.

Caso seja constatado que o valor do indicador DRP superou o valor máximo permitido (DRPM)¹, a concessionária deverá adotar providências para o retorno da tensão à condição adequada, a partir da data de término das leituras, obedecendo os seguintes prazos:

- 120 dias a partir de janeiro de 2003;
- 90 dias a partir de janeiro de 2004;
- 60 dias a partir de janeiro de 2005.

Se a DRC for superior a zero, deverão ser adotados procedimentos, por parte da concessionárias, para que a tensão possa ser restabelecida aos seus valores normais. Isso deve ser feito, levando em consideração os prazos abaixo:

- 45 dias a partir de janeiro de 2003;
- 30 dias a partir de janeiro de 2004;
- 15 dias a partir de janeiro de 2005.

A partir de 1º de janeiro de 2005, expirados os prazos estabelecidos e detectada a não regularização dos níveis de tensão, será calculado um valor a ser restituído a quem tiver sido submetido ao serviço inadequado, de acordo com a equação (3.8):

$$Valor = \left[\frac{DRP - DRP_M}{100} \times k_1 + \frac{DRC}{100} \times k_2 \right] \times k_3 \quad (3.8)$$

Onde:

- $k_1 = 1$;
- $k_2 = 4$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão;
- $k_2 = 2$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão;
- $k_2 = 1$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão;
- DRP = valor do DRP expresso em %;
- DRP_M = valor do DRPM expresso em %;
- DRC = valor do DRC expresso em %;
- k_3 = coeficiente de majoração.

O coeficiente de majoração k_3 é calculado da seguinte forma:

- Consumidores cativos: média aritmética do valor líquido das faturas mensais de energia referentes aos três meses anteriores à apuração;
- Consumidores autoprodutores, produtores independentes e concessionárias de serviços públicos de geração: média aritmética dos 3 últimos meses do montante de energia

¹ O valor da DRPM até o ano de 2003 ficou estabelecido em 7% , sendo reduzido de um valor absoluto de 1% a cada ano, no período de 2004 a 2007, quando passará a ter o valor fixo de 3%.



disponibilizado no ponto de conexão, multiplicado pelo valor normativo (VN)² relativo à fonte competitiva;

- Concessionária de serviços públicos de distribuição: soma da média aritmética do valor líquido das faturas mensais de energia (relativas aos 3 meses anteriores à apuração), vinculadas aos contratos iniciais e do montante de energia (alusivo aos 3 últimos meses precedentes à apuração), multiplicado por VN, correspondente à fonte competitiva, vinculado aos contratos de energia adquirida livremente.

O valor da restituição ao consumidor cativo deverá ser creditado na fatura de energia elétrica, ou na de uso do sistema de distribuição, do mês subsequente à constatação do serviço inadequado. Para os demais casos, o meio a ser utilizado para o crédito do valor deverá ser estabelecido entre as partes.

A restituição devida ao consumidor não isenta a concessionária de responder por outras perdas e danos causados pelo serviço inadequado de energia elétrica.

Ainda na mesma resolução são definidos alguns requisitos para os equipamentos destinados à monitoração dos níveis de tensão. Segundo a ANEEL, eles devem possuir as seguintes características mínimas:

- Taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo de 60 Hz³;
- Conversor A/D com resolução de 12 bits;
- Precisão de até 0,5% da leitura⁴.

O equipamento de medição deverá permitir o cálculo dos valores eficazes de tensão, utilizando intervalos de 10 minutos, com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos de 60 Hz e apresentar as seguintes informações:

² Valor que limita o repasse para as tarifas de fornecimento dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica, por parte das concessionárias e permissionárias.

³ A partir de 2005, os equipamentos deverão trabalhar com taxas de amostragem iguais ou superiores a 64 amostras por ciclo de 60 Hz.

⁴ Como será visto no próximo capítulo, a ANEEL, em outro documento, estipula a precisão de leitura do medidor em 1% .



- Valores calculados dos indicadores individuais;
- Tabela de medição;
- Histograma de tensão.

Também deverá expurgar os registros de leituras de tensão quando houver interrupção de energia elétrica.

3.2.3 – PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS [7]:

Tem como objetivo definir os padrões de desempenho da Rede Básica, com os seguintes propósitos:

- Balizar as ações do ONS, visando à proposição das ampliações e reforços da Rede Básica, bem como subsidiar a coordenação do acesso ao sistema de transmissão;
- Subsidiar os estudos de planejamento e programação da operação, bem como a própria operação em tempo real do sistema de transmissão;
- Subsidiar os usuários conectados, ou que requeiram conexão, à Rede Básica com as informações necessárias sobre os padrões de desempenho a serem atendidos pela Rede Básica.

São apresentados diversos indicadores, cujos valores serão acompanhados pelo ONS de forma a:

- Garantir o desempenho da Rede Básica de acordo com os padrões globais estabelecidos para os indicadores de flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica;
- Garantir o atendimento dos padrões estabelecidos para os indicadores de variação de frequência e tensão em regime permanente;
- Disponibilizar e avaliar, visando correções, os valores dos indicadores associados a continuidade e as variações de tensão de curta duração.

1. CONTINUIDADE DA REDE BÁSICA: A continuidade do serviço da Rede Básica é representada por indicadores monitorados nos Pontos de Controle.

Entende-se por Ponto de Controle a instalação ou conjunto de instalações da Rede Básica que fazem fronteira com os ativos de conexão dos Agentes de Geração, de Distribuição, Consumidores Livres e demais instalações de transmissão.

Para a avaliação da continuidade do serviço serão utilizados os seguintes indicadores:

- **DIPC** – Duração da Interrupção do Ponto de Controle. Somatório das durações das interrupções do Ponto de Controle com du-



ração maior ou igual a 1 minuto (dado em minutos por período de apuração);

- **FIPC** – Frequência da Interrupção do Ponto de Controle. Número de vezes em que ocorreu interrupção do Ponto de Controle com duração maior ou igual a 1 minuto (dado em ocorrências por período de apuração);
- **DMIPC** – Duração Máxima da Interrupção do Ponto de Controle. Maior duração de interrupção do Ponto de Controle dentre aquelas utilizadas no cálculo do indicador DIPC (contabilizado em minutos por período de apuração).

Define-se Interrupção do Ponto de Controle como a condição na qual o mesmo permanece com tensão nula por um período maior ou igual a 1 minuto, devido a problemas internos ou externos à Rede Básica, levando em consideração quaisquer eventos, locais ou remotos, inclusive os programados.

A interrupção do Ponto de Controle não implicará necessariamente em interrupção de fornecimento a consumidores.

- 2. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA:** Em condições normais de operação, em regime permanente, a frequência do sistema interligado deve ficar situada entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Na ocorrência de distúrbios no sistema, havendo disponibilidade de geração para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência deve retornar para à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz dentro de 30 segundos após o instante em que a frequência sair desta faixa.

Na ocorrência de distúrbios no sistema, havendo necessidade de corte de geração ou corte de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 segundos.

No caso de novos acessos que necessitem de um desempenho superior ao estabelecido acima, o agente deverá consultar o ONS, de maneira a identificar os locais e sob que condições tal desempenho poderá ser alcançado.

- 3. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE:** No que se refere aos valores de tensão em regime permanente o padrão de desempenho da Rede Básica, nos pontos de conexão, deve atender os requisitos que constam na resolução da ANEEL nº 505/2001.



- 4. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO:** É a variação aleatória, repetitiva ou esporádica, do valor eficaz da tensão. De um modo geral, pode-se relacionar as flutuações aleatórias e repetitivas com a operação de cargas não-lineares com consumo de potência variável no tempo, enquanto que as flutuações esporádicas relacionam-se com manobras de rede ou de carga.

As flutuações de tensão nos barramentos da Rede Básica, provocadas pela operação das cargas não-lineares instaladas nos Consumidores Livres ou alimentadas pelos Agentes de Distribuição, podem provocar uma série de distúrbios ao se propagarem através da rede.

Entretanto, sem prejuízo de futuras considerações dos demais efeitos associados a estas flutuações, este item tratará exclusivamente daqueles relacionados à cintilação luminosa (“flicker”).

A Severidade de Cintilação é uma representação quantitativa do incômodo visual percebido pelas pessoas expostas ao fenômeno de cintilação. Os níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, são quantificados conforme descrição e recomendação da Comissão Internacional de Eletrotécnica na Publicação IEC 61000-4-15 “Flickermeter – Functional and design specifications”.

- 5. DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO:** O indicador para avaliar o desequilíbrio de tensão é o Fator de Desequilíbrio de Tensão (K), que exprime a relação entre as componentes de seqüência negativa (V₂) e seqüência positiva (V₁) da tensão, expresso em termos percentuais da componente de seqüência positiva. Pode ser expresso pela equação (3.9):

$$K = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

Onde:

V₋ = Módulo da tensão de seqüência negativa;

V₊ = Módulo da tensão de seqüência positiva.

Sendo:

$$V_- = \frac{1}{3} (\bar{V}_a + a^2 \bar{V}_b + a \bar{V}_c) \quad (3.10)$$

$$V_+ = \frac{1}{3} (\bar{V}_a + a \bar{V}_b + a^2 \bar{V}_c) \quad (3.11)$$

$a \rightarrow$ Operador rotacional, cujo módulo é um e o ângulo é 120°;



V_a, V_b e $V_c \rightarrow$ Tensões de fase.

O desequilíbrio de tensão ocorre quando as fases do sistema elétrico apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular alterada de 120° elétricos, ou ainda, as duas condições simultaneamente.

O limite global nos barramentos da Rede Básica é de: $K \leq 2\%$.

O valor do indicador a ser comparado com o valor padrão será assim obtido:

- Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia, ao longo de 7 dias consecutivos;
- O valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Caso as tensões de seqüência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa das tensões de seqüência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoração.

Os Agentes devem agir junto aos seus usuários para evitar que cargas desbalanceadas ou equipamentos operando de forma desequilibrada comprometam o Limite Global.

6. DISTORÇÃO HARMÔNICA: O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicas, em regime permanente, nos barramentos da Rede Básica, corresponde à distorção de tensão harmônica.

Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT) pode ser definida como a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. A equação (3.12) ilustra como calcular esse indicador:

$$DHTH = \sqrt{\sum V_h^2} \quad [\%] \quad (3.12)$$

Onde:

$$V_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \text{ é a tensão harmônica de ordem h em}$$

porcentagem da fundamental;

$$V_h = \text{tensão harmônica de ordem h em volts;}$$

$$V_1 = \text{tensão fundamental nominal em volts.}$$



Os padrões globais de tensões harmônicas de 2ª a 50ª ordem são apresentados na Tabela 3.9 bem como o padrão para a DTHT.

O valor de cada indicador a ser comparado com o valor padrão será assim obtido:

- Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas, ao longo de 7 dias consecutivos;
- O valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Tabela 3.9 – Limites globais de tensões harmônicas expressos em porcentagem da tensão fundamental.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DTHT = 6%				DHTH = 3%			

Fonte: Procedimentos de Rede do ONS [7].

7. VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO: Entende-se por Variação de Tensão de Curta Duração um desvio significativo da amplitude da tensão por curto intervalo de tempo.

A amplitude da Variação de Tensão de Curta Duração é definida pelo valor extremo do valor eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.

A duração da Variação de Tensão de Curta Duração é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que a mesma variável volta a cruzar este limite.

A partir da duração e amplitude, as Variações de Tensão de Curta Duração são classificadas como descrito na Tabela 3.10.

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



3.2.4 – PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO [8]:

Têm como objetivo disciplinar todos os aspectos técnicos relativos ao planejamento de expansão e à operação das redes de distribuição, bem como à conexão de usuários e também aos requisitos técnicos da interface com a Rede Básica.

A sua origem veio da necessidade de regulamentar os procedimentos e os requisitos técnicos associados ao planejamento e à operação de sistemas elétricos de potência com tensões inferiores a 230 kV, incluindo aqueles referentes à conexão e à operação de cargas e de usinas distribuídas (conectadas diretamente aos sistemas de distribuição).

Os Procedimentos de Distribuição tornam-se imperativos para a consolidação das regras de operação e evolução do sistema elétrico, sendo complementares aos Procedimentos de Rede.

Os propósitos gerais dos Procedimentos da Distribuição são:

- Facilitar o desenvolvimento e a operação de sistemas seguros, confiáveis e eficientes;
- Definir os procedimentos e padrões técnicos que permitam alcançar os objetivos supracitados;
- Estabelecer condutas que sejam transparentes e facilmente interpretados sob os quais a responsabilidade de todas as partes esteja estabelecida e também as correspondentes eventuais penalidades, em caso de não cumprimento das exigências;
- Especificar requisitos para os acordos necessários e intercâmbio de informações.

A elaboração dos Procedimentos de Distribuição, diferentemente dos Procedimentos de Rede do ONS, requer um arranjo próprio e coordenação da ANEEL, uma vez que não existe entidade subordinada à mesma com a atribuição de elaborá-los.

Considerando que a documentação originalmente elaborada pelo Programa de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RESEB) para a regulamentação das distribuidoras é bastante simplificada e que não existem documentos consolidados para procedimentos relativos a planejamento e operação das distribuidoras, a exemplo dos documentos existentes no âmbito do GCPS e GCOI, é necessário que os Procedimentos de Distribuição fossem elaborados em duas etapas:

1. (Já concluída) Elaboração de uma versão preliminar, partindo-se do anexo H do documento final elaborado pela Coopers&Lybrand, da documentação existente na Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) e de outros docu-



mentos pertinentes. Os documentos desta etapa foram elaborados pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) sob a supervisão da ANEEL;

2. (Ainda em andamento) Apreciação e debate do documento produzido na primeira etapa pelos agentes do setor elétrico envolvidos. Deverá ser posteriormente submetido à consulta ou a audiência pública para sua consolidação.

A primeira etapa foi subdividida em oito módulos, sendo um exclusivamente dedicado à QEE. São eles:

1. Introdução;
2. Planejamento da Expansão da Distribuição;
3. Condições para Conexão;
4. Procedimentos Operativos;
5. Medição;
6. Informações Requeridas e Obrigações;
7. Condições Gerais;
8. Qualidade de Energia Elétrica.

O oitavo módulo objetiva estabelecer os padrões, os indicadores, os protocolos e a metodologia de cálculo e medição que serão utilizados na avaliação do desempenho da rede de distribuição visando uma quantificação da QEE. Visa também ao estabelecimento de processos e procedimentos sobre a gestão da Qualidade de Energia na rede de distribuição.

É importante observar que este módulo deverá tratar de diversos fenômenos relativos a QEE tanto aqueles em que já existem regulamentações definidas no âmbito da ANEEL (interrupções e tensão de fornecimento), como fenômenos associados à forma da onda de tensão (flutuação de tensão, distorção harmônica e variações momentâneas de tensão) que necessitam do estabelecimento de padrões, indicadores e protocolos.



4 – EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO:

A monitoração do sistema elétrico representa um importante procedimento para a avaliação da QEE, tornando-se imprescindível diante do novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro. É essencial para a obtenção dos elementos necessários ao diagnóstico dos problemas na área, através do registro dos fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no sistema, subsidiando pareceres técnicos e avaliando a vulnerabilidade das cargas sensíveis. Além disso, é pela análise dos resultados das medições que se torna possível determinar as alternativas viáveis para a melhoria da qualidade da energia elétrica da rede em estudo.

Para que a qualidade da energia elétrica possa ser observada, verificando se os padrões de desempenho da rede estão sendo respeitados, é necessário um sistema de medição eficiente e capaz de gerar de forma confiável os dados a serem coletados.

Devido ao caráter oficial em que está envolvido o assunto nos últimos tempos, havendo, inclusive, leis e contratos para regulamentá-lo, é extremamente importante a definição das especificações técnicas necessárias aos equipamentos.

Deste modo, inúmeros esforços estão sendo tomados para que sejam reunidas todas as informações necessárias, estipulando os requisitos mínimos que um sistema de monitoração deve possuir para que possa ser elaborado um protocolo a ser aprovado pela ANEEL.

Além de definir as características necessárias aos equipamentos, é preciso que eles sejam testados, avaliando a sua possível adequação ao futuro protocolo.

Sob esse aspecto, é flagrante a deficiência da tecnologia nacional no campo de medidores de qualidade da energia. Dentre os exemplares hoje disponíveis, com possibilidade de adequação às normas da ANEEL, não há nenhum de procedência brasileira. Portanto, a produção de tais equipamentos constitui uma boa oportunidade de negócio para a indústria nacional, tanto na questão dos avanços tecnológicos que serão absorvidos, como no retorno financeiro.

4.1 – CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS – PROTOCOLO:

Mesmo ainda não tendo sido oficializado pela ANEEL o protocolo a ser aplicado à medição da QEE, já existe um grande número de requisitos técnicos e de características necessárias aos equipamentos destinados a esse fim.

Dentre vários trabalhos realizados sobre o assunto, cabe destacar os da Universidade Federal de Uberlândia [9] [10] e as especificações técnicas contidas no processo licitatório realizado pela ANEEL para o ano de 2003, sobre a aquisição de equipamentos de monitoração [11].

Nos sub-tópicos seguintes serão apresentados alguns detalhes importantes, que, certamente, serão exigidos dos aparelhos destinados à monitoração da qualidade da energia.



4.1.1 – SINAIS A SEREM MEDIDOS:

A principal grandeza a ser monitorada, sem dúvida alguma, é a tensão. O aparelho deverá ser concebido na versão trifásica, sendo também capaz de ser conectado a redes monofásicas e bifásicas. Em se tratando de sistemas trifásicos, serão medidas as tensões de fase para sistemas estrela aterrada e de linha para os demais, para que as componentes de seqüência zero possam ser medidas.

Quanto a componente harmônica máxima a ser considerada, recomenda-se a adoção da 50ª ordem (3000 Hz). Esta opção resultará no emprego de instrumentação de melhor qualidade para a quantificação das ordens harmônicas freqüentemente envolvidas nos processos.

Para a caracterização da distorção harmônica, justifica-se também a monitoração das correntes, com o intuito de verificar a influência de cargas não-lineares em pontos específicos do sistema elétrico.

Em se tratando de desequilíbrios de tensão, os sinais deverão corresponder às tensões trifásicas. De forma a eliminar possíveis efeitos da seqüência zero, os registros devem ser conduzidos para as grandezas de fase.

4.1.2 – TÉCNICAS DE MEDIÇÃO:

Os sinais a serem monitorados devem ser tratados tanto no domínio do tempo (cálculos de valores eficazes, desequilíbrios etc.), como no domínio da freqüência (análise harmônica). Para tanto, deverão empregar sistemas de medição microprocessados, com capacidade de armazenamento compatível aos requisitos impostos pelos bancos de dados definidos pelos protocolos de medição.



4.1.3 – INTERVALOS DE MEDIÇÃO:

Os intervalos de medição envolvidos nos registros de harmônicos e desequilíbrios, juntamente com seus respectivos tratamentos estatísticos, envolvem períodos de tempo muito distintos, variando desde menos de um segundo até mais de uma semana.

Visto que as orientações do protocolo de medição envolvem principalmente fenômenos com características quase-estacionárias, é possível o emprego de técnicas de amostragem com períodos de observação⁵ e períodos efetivos de medição⁶ distintos.

Desta forma, os seguintes intervalos de medição são sugeridos:

- Intervalo de janela ou janela de medição (T_J): Os trabalhos de medição devem ser conduzidos através instrumentos que empregam, em sua concepção operacional, larguras de janela de medição que permitam amostragens precisas para intervalos de tempo de algumas frações de segundos (100 a 500 ms);
- Intervalo de curtíssima duração (T_{CD}): Deve ser entendido como o tempo de observação. Corresponde à média quadrática das amostras adquiridas nos intervalos T_J , durante 5 segundos (pelo menos 5 valores);
- Intervalo de curta duração (T_C): 10 minutos (média quadrática dos valores resultantes das 200 amostras obtidas nos intervalos T_{CD}). O resultado final, ao término deste intervalo, expressa um banco de dados indicativo dos níveis de distorção ou desequilíbrios. Este conjunto de resultados pode ou não ser tratado com vistas a obtenção de um único valor indicativo;
- Intervalo diário (T_D): 1 dia, compreendendo um período entre 00:00 horas às 24:00 horas (valor da distorção harmônica ou desequilíbrio obtido para 95% das 144 amostras armazenadas ao longo do intervalo diário – p95%). É considerado essencial e utilizado pela maioria das normas e recomendações sobre o assunto;
- Intervalo semanal (T_S): Tem o objetivo de representar o comportamento do sistema elétrico ao longo de 7 dias contínuos de monitoração. É composto pelo maior valor p95% observado em cada dia.

Os intervalos descritos, bem como as suas durações, podem ser observados através da figura 4.1 [9]:

⁵ É o tempo total de medição, correspondente ao período efetivo somado aos intervalos sem registros.

⁶ Corresponde à duração real do registro, dentro das quais as grandezas são medidas. Desta forma, os intervalos sem registro entre as janelas de medição, se existirem, não são considerados para fins da sua contabilização.

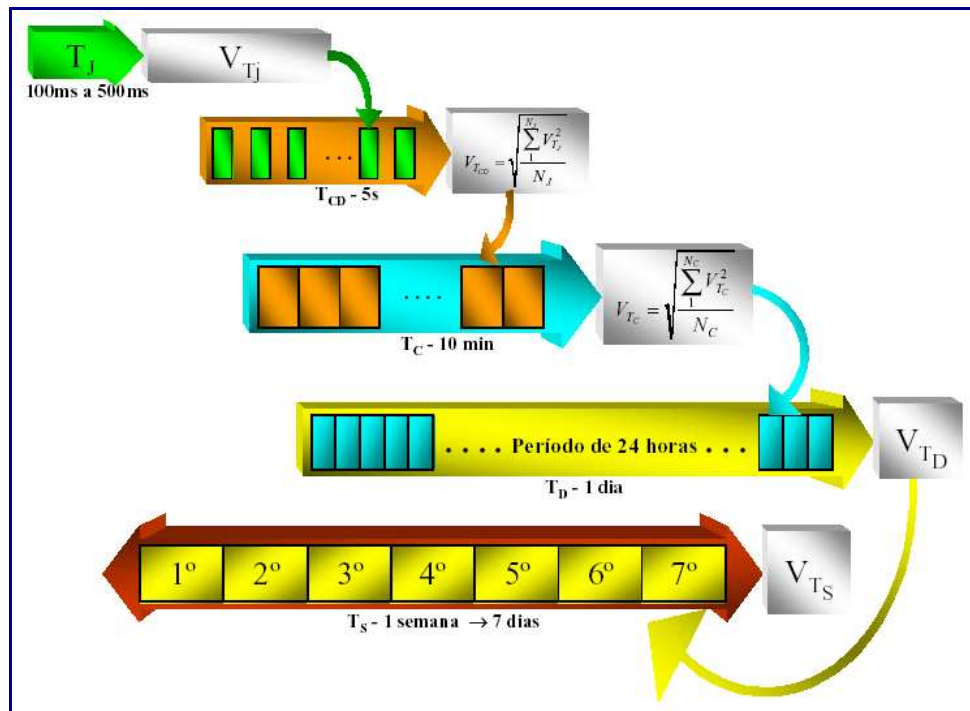


Figura 4.1 – Intervalos de medição sugeridos para o protocolo.

Cabe ressaltar que as características sintetizadas na figura 4.1 são meramente ilustrativas, visto que os detalhes do futuro protocolo ainda serão amplamente discutidos pelos grupos de trabalho da ANEEL e do ONS.

O instrumento deve ser capaz de atender aos requisitos de amostragem apresentados, todavia, a integralização e o tratamento estatístico poderá ser realizado por software externo ao mesmo. Basta que o equipamento forneça as informações necessárias para a caracterização de um banco de dados apropriado ao tratamento determinado pelo protocolo de medição estabelecido.

4.1.4 – ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS:

Os aparelhos de monitoração precisam fornecer, como indicado no protocolo de medição, resultados semanais e diários, bem como valores integralizados a intervalos de 10 minutos, não sendo necessário o armazenamento dos valores adquiridos para cada período de observação (intervalo de 5 segundos). Os dados medidos e calculados terão de ser armazenados em memória não volátil, com capacidade suficiente para o registro de, no mínimo, 7 dias consecutivos, sem descargas intermediárias.



4.1.5 – FORMAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS:

A estratégia utilizada para os protocolos de medição emprega resultados obtidos em pequenas janelas de amostragem, formando bancos de dados associados a diferentes intervalos de tempo. Com o objetivo de reduzir o volume de dados armazenados, a cada intervalo de curtíssima duração, substitui-se todo o conjunto de informações por valores médios quadráticos equivalentes.

Desta forma, ao final de 10 minutos, obtém-se um único valor representativo da distorção ou do desequilíbrio presente no barramento. Seguindo este mesmo procedimento, ao final de 24 horas, chega-se a um conjunto de 144 níveis indicativos das grandezas monitoradas. Assim, após uma semana de trabalhos, o banco de dados conterà um total de 1008 amostras a respeito do ponto monitorado.

A maioria das normas estabelece procedimentos de transformação das 144 amostras diárias num único indicador. Isto pode ser feito, por exemplo, utilizando-se o maior valor p95% observado em cada dia.

Os arquivos contendo os dados registrados para intervalos de curta duração (10 minutos) devem estar em formato ASCII, contendo a data e hora do registro, bem como os valores medidos, sendo o ponto e vírgula (;) o separador utilizado, cabendo ressaltar que cada linha deve conter somente um registro.

Relatórios contendo os resultados probabilísticos diários durante o período de monitoração também deverão ser disponibilizados, de forma a permitir a comparação do parâmetro sob análise com os índices de conformidade.

4.1.6 – PORTABILIDADE:

A instrumentação deve ser portátil e de fácil manuseio, permitindo assim sua instalação em diversos locais, desde uma subestação abrigada, com toda a infra-estrutura, até um local de difícil acesso e condições ambientais adversas, como o secundário de um transformador instalado ao tempo.

4.1.7 – SEGURANÇA:

As informações armazenadas, bem como os arquivos de programação do aparelho, devem ser invioláveis, impedindo que pessoas não autorizadas possam ter acesso, editando ou modificando-os.

4.1.8 – COMUNICAÇÃO:

O medidor precisa dispor de meios físicos de conexão com computadores, possuindo, pelo menos, uma porta serial compatível com RS-232 ou RS-485. Tal exigência se faz necessária para que os



dados registrados possam ser lidos e armazenados, sem que seja prejudicada a integridade dos mesmos. É interessante também que o equipamento possa ser conectado a modems, objetivando o seu acesso em pontos remotos.

4.1.9 – SOFTWARE DEDICADO:

O software de comunicação e leitura dos dados armazenados nos equipamentos de monitoração terá de ser fornecido (licença adicional) para a utilização pelo órgão fiscalizador. Deverá conter recursos de análise estatística, emitir relatórios e disponibilizar os dados em formato ASCII.

4.1.10 – CIRCUITOS DE ENTRADA:

A instrumentação deve ser capaz de receber sinais de tensão com valores eficazes compreendidos entre 30 e 600 V fase-fase. Para medição de corrente, podem ser utilizados dispositivos shunt e clamp's, desde que estes proporcionem precisão equivalente à do equipamento.

4.1.11 – SENSORES:

A monitoração de tensões acima de 600V e de correntes superiores a 5A⁷, deve ser feita com o auxílio de sensores apropriados, os quais reduzem os níveis de tais grandezas para valores suportados pelos instrumentos de medição. O sensor utilizado para restringir a tensão é chamado de transformador de potencial (TP); para a corrente, emprega-se o transformador de corrente (TC).

⁷ O valor de 5A foi escolhido pelo fato de que a maioria dos medidores comerciais suportarem correntes até esse limite.



Para que as avaliações dos níveis harmônicos sejam realizadas com coerência, apresentando resultados que reflitam a realidade operativa da rede, torna-se imperativa a escolha correta dos tipos de sensores, bem como da forma em que serão conectados. Isso implica na necessidade de se estabelecer algumas diretrizes, para a escolha da configuração adequada do sistema de sensoreamento composto pelos TP e TC.

Recomenda-se que os TP sejam conectados em **Y – Y** aterrada para que as componentes de seqüência zero não sejam suprimidas. Em sistemas em que não haja qualquer tipo de conexão ao terra, deve-se optar pela utilização dos arranjos de TP em **V** (Δ aberto) [9].

Os transformadores de potencial não apresentam uma resposta em frequência satisfatória para todos os níveis de tensão. Isto faz com que a sua aplicabilidade fique restrita a condições específicas. Os TP podem ser divididos em três tipos principais: transformadores de potencial indutivo (TPI), transformadores de potencial capacitivo (TPC) e divisores capacitivos. Cada um possui peculiaridades diferentes e é melhor indicado para um tipo de situação. A tabela 4.1 apresenta sugestões oferecidas quanto aos tipos de TP, bem como o desempenho frente às medições de harmônicos.

Tabela 4.1 – Recomendações para o uso de TP [9]

Tensão Nominal (V_n)	Tipo de TP Recomendado	Justificativa
$V_n \leq 15 \text{ kV}$	TPI	Até 1 kV são plenamente adequados. Até tensões em torno de 15 kV, os resultados se mostram ora satisfatórios, ora não. Isto dependerá fortemente do tipo de TPI utilizado. De fato, em torno deste nível de tensão, as medições de harmônicas têm sido tradicionalmente feitas a partir das informações de tensão extraídas destes sensores, sem ter causado, até então, maiores prejuízos. A partir deste nível de tensão, fica agravada a qualidade dos resultados dos sinais derivados dos TPI.
$15 \text{ kV} < V_n \leq 138 \text{ kV}$	TPI ou Divisor Capacitivo	A partir de 15 kV, fica agravada a qualidade dos resultados dos sinais derivados dos TPI. Por esta razão, a priori, não se pode aceitar tal sensor sem o conhecimento de sua resposta em frequência. Caso, em função da resposta em frequência, o TPI seja considerado impróprio, a solução consiste no emprego de divisores capacitivos.
$V_n > 138 \text{ kV}$	TPC	Os TPC só garantem sua precisão em torno da própria frequência fundamental. Para as outras ordens harmônicas, sua resposta apresenta expressivas imprecisões e seus resultados não oferecem qualquer confiabilidade. Assim, a solução seria a utilização apenas do divisor capacitivo que constitui parte inerente deste tipo de sensor.

Verifica-se, através da tabela 4.1, que os transformadores de potencial não se mostram adequados para a medição de harmônicas em redes de alta tensão. Em níveis de tensão elevados surgem fenômenos que degradam a resposta em frequência de tais sensores, impossibilitando o seu uso.

Em relação aos sensores de corrente, quais sejam os TC, todos os estudos são unânimes em afirmar que as suas respostas em frequência permanecem com precisão praticamente inalterada. Com isso, os mesmos podem ser considerados adequados para a medição de harmônicos.

Para efeito ilustrativo, são mostradas nas figuras 4.2 a 4.4 as respostas em frequência de alguns tipos de sensores:

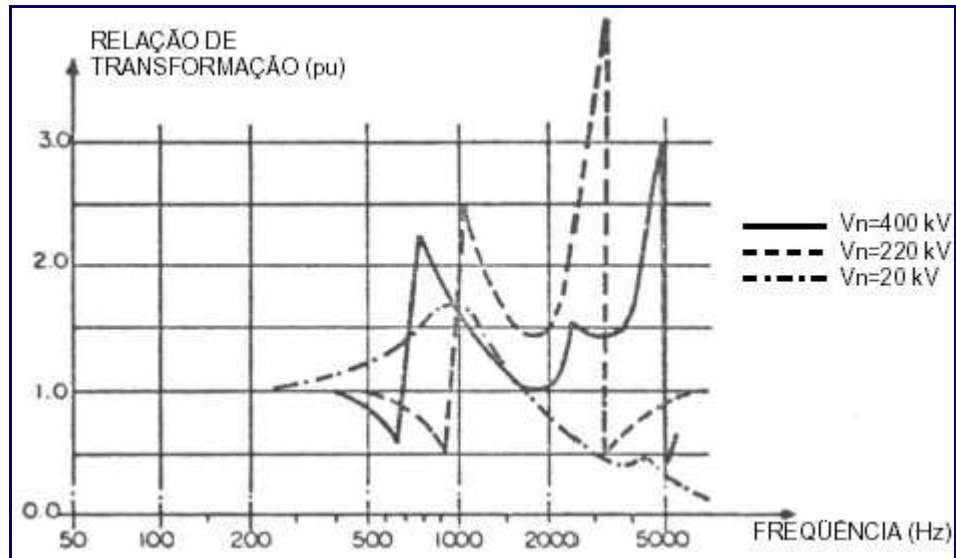


Figura 4.2 – Respostas em frequência de TPI's para diversas classes de tensão.

Fonte: Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica [9].

Através da figura 4.2, observa-se que quanto maior o nível de tensão aplicada no sensor, pior é a sua resposta em frequência, devido à saturação do mesmo.

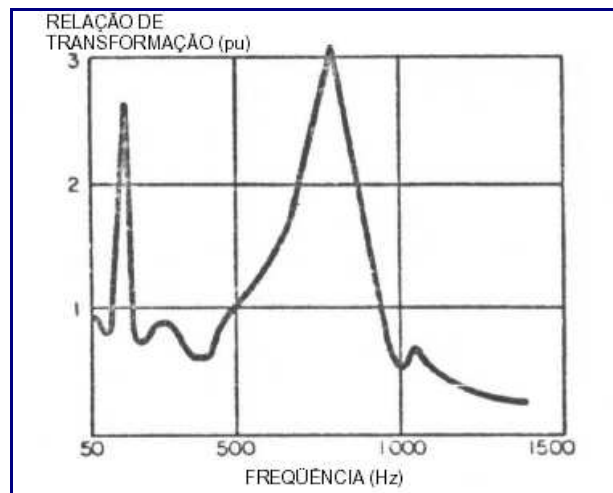


Figura 4.3 – Resposta em frequência de um TPC (frequência fundamental = 50Hz).

Fonte: Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica [9].



Da figura 4.3, pode ser visto que o TPC em análise apresenta um comportamento inadequado, mesmo para frequências nas imediações da fundamental. Este fato é indicativo que estes sensores não são apropriados para medições de sinais em outras frequências que não a fundamental. Mesmo não estando explícito na figura 4.3, os TPC's também são suscetíveis ao fenômeno da saturação, o que piora ainda mais o seu desempenho.

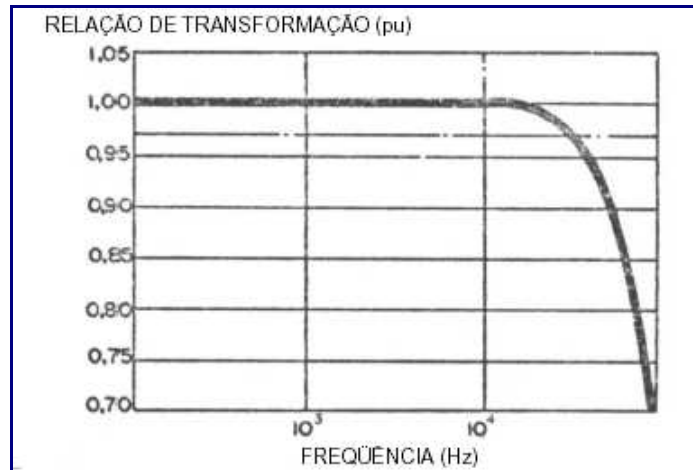


Figura 4.4 – Resposta em frequência de um transformador de corrente.

Fonte: Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica [9].

Como foi apresentado anteriormente, os resultados em frequência dos TC's são bastante apropriados para a medição de harmônicas. Eles mantêm um desempenho satisfatório mesmo para frequências acima das exigidas no protocolo. Tal fato está claramente ilustrado na figura 4.4.

4.1.12 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO:

Caso a fonte de alimentação do instrumento não seja do tipo universal (100 a 240 V), o mesmo deve aceitar pelo menos dois níveis de tensão nominal de entrada (127/220V). Além disso, objetivando adequar o equipamento às eventuais variações da rede elétrica, o mesmo deverá manter as características de precisão e confiabilidade de medição para variações na tensão de alimentação de até $\pm 10\%$. Deve-se ressaltar que, a instrumentação utilizada, através de fontes internas, deverá suportar interrupções de energia de, pelo menos, 20 ms [9].



4.1.13 – PRECISÃO:

O conjunto representado pelos sensores (TP ou TC) e pelo medidor propriamente dito, deve possuir uma precisão de até 1% da leitura [11]. Para que possa ser medida até a 50ª harmônica, o equipamento deve trabalhar com uma taxa de amostragem mínima de 100 pontos/ciclo ou 6 kHz. Além disso, a fim de garantir uma resolução adequada, devem ser utilizados conversores A/D de, pelo menos, 12 bits.

4.1.14 – DEMAIS CARACTERÍSTICAS:

Adicionalmente às especificações técnicas já detalhadas, os aparelhos destinados à monitoração da QEE precisam estar em conformidade com as normas específicas, aplicáveis a instrumentos utilizados no setor elétrico brasileiro. Dentre outros aspectos, considera-se relevante observar itens como: isolamento, compatibilidade eletromagnética, condições climáticas, robustez mecânica, etc..

4.2 – AVALIAÇÃO DE MEDIDORES COMERCIALMENTE DISPONÍ-VEIS:

Após a aprovação do protocolo por parte da ANEEL, deverão existir no mercado aparelhos capazes de satisfazer todos os seus itens. Por este motivo, é muito oportuna a iniciativa de avaliar os medidores já existentes, verificando se os mesmos atendem as características apresentadas no item 4.1.

Foram realizados testes em dois medidores de marcas conceituadas, os quais serão aqui denominados apenas de Medidor A e Medidor B.

As avaliações constaram de duas etapas: análise dos manuais fornecidos pelos fabricantes e ensaios com medições de grandezas elétricas.

Procurou-se extrair dos manuais informações como: grandezas monitoradas, capacidade de memória, níveis de tensão e corrente suportados pelo aparelho, classe de precisão, software de comunicação, segurança dos dados etc.

Já os ensaios práticos tiveram o objetivo de verificar as especificações conseguidas na primeira etapa e obter àquelas que ficaram faltando. O diagrama da montagem está exibido na figura 4.5:

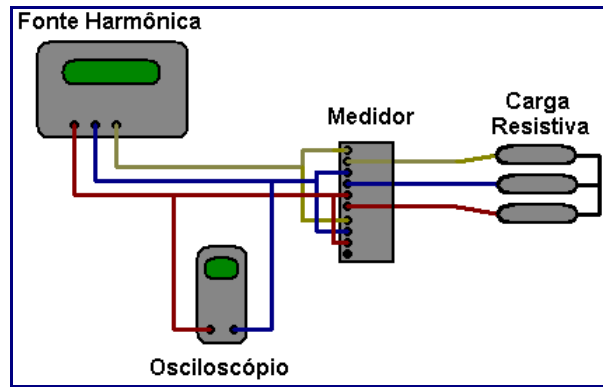


Figura 4.5 – Montagem realizada para os ensaios dos medidores.

Como pode ser visto, utilizou-se uma fonte harmônica para simular um sistema elétrico real, impondo-lhe várias condições e fenômenos diferentes. A fonte alimentava uma carga equilibrada, conectada em **Y**. Entre a fonte e a carga, foi instalado o medidor e um osciloscópio.

A função do osciloscópio era de verificar a forma de onda da tensão, fornecendo mais subsídios para avaliar a precisão do aparelho em teste.

Os resultados obtidos nas duas etapas, para cada instrumento, encontram-se nos sub-itens 4.2.1 e 4.2.2:

4.2.1 – MEDIDOR A:

- a) **GRANDEZAS MONITORADAS:** É capaz de medir tensões e correntes trifásicas, fornecendo o seu valor eficaz em instantes de tempo programados e realizar o cálculo da distorção harmônica total (DHT), exibindo, também, o valor individual de cada harmônica até a 50ª. Onde, não se mostrou muito preciso para sinais de tensão inferiores a 10V e correntes abaixo de 200mA. Além disso, demonstrou-se completamente inadequado para a análise harmônica, apresentando erros superiores a 5% em algumas medidas. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados de dois testes efetuados [12]:

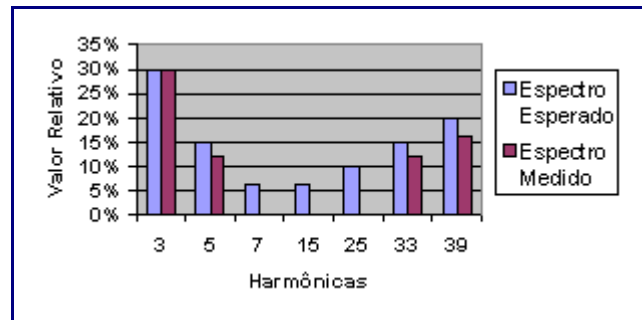


Figura 4.6 – Análise harmônica efetuada pelo Medidor A.

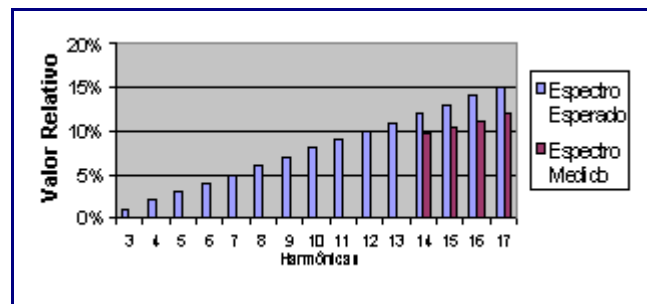


Figura 4.7 – Análise harmônica realizada pelo Medidor A.

As figuras não deixam margem de dúvidas, descartando totalmente o medidor para o cálculo de distorções harmônicas. Algumas componentes nem sequer foram percebidas pelo aparelho.

- b) **CIRCUITOS DE ENTRADA:** Seu circuito de entrada suporta tensões até 600V e correntes de 7,5A.
- c) **CAPACIDADE DE MEMÓRIA:** A quantidade de memória disponível é suficiente para uma semana, desde que os dados sejam armazenados a intervalos mínimos de 10 minutos. Na falta de energia, o aparelho possui bateria interna com autonomia de 12 horas.
- d) **COMUNICAÇÃO:** Dispõe de duas portas seriais compatíveis com RS-485. Pode ser conectado diretamente a um computador pessoal ou a uma rede com outros aparelhos de medição. Um grave problema observado foi o fato do aparelho não conseguir realizar medições enquanto se comunica com o PC.
- e) **SOFTWARE:** É extremamente primitivo, não disponibilizando os dados em formato ASCII, não imprimindo relatórios e, tão pouco, possuindo recursos de análise estatística. A interface com o usuário também não é amigável, nem intuitiva.



- f) **SEGURANÇA:** O nível de segurança é muito baixo. Qualquer pessoa que tiver acesso à rede e ao software pode alterar e acessar os dados.

O Medidor A, como pôde ser verificado pelos testes realizados, não possui requisitos técnicos para se adequar ao futuro protocolo. Inúmeras alterações de projeto seriam necessárias para torná-lo compatível com todas as características exigidas. Dentre as possíveis mudanças, pode-se citar: refinamento do cálculo de distorção harmônica, aumento de sua sensibilidade e correção da incompatibilidade entre a transmissão e aquisição de dados

4.2.2 – MEDIDOR B:

- a) **GRANDEZAS MONITORADAS:** Inúmeras grandezas são medidas pelo aparelho, inclusive todas relacionadas com a qualidade da energia. Ele se mostra muito preciso, apresentando resultados fieis, tanto para os valores eficazes das tensões e correntes, como para o cálculo da distorção harmônica. As figuras 4.8 e 4.9 ilustram alguns resultados obtidos [12]:

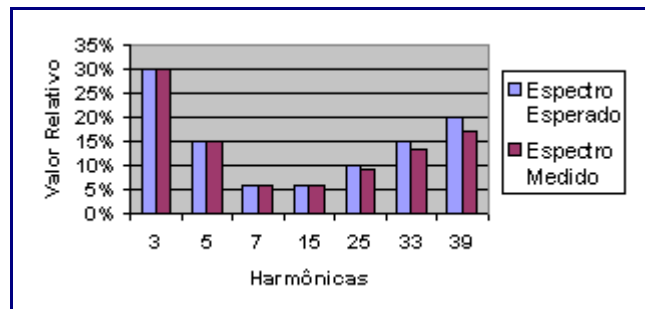


Figura 4.8 – Análise harmônica efetuada pelo Medidor B.

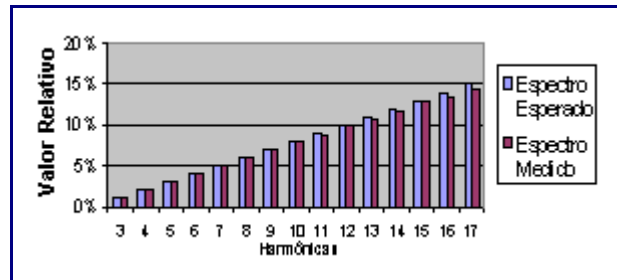


Figura 4.9 – Outra análise harmônica realizada com o Medidor B.

Ambas figuras demonstram a boa precisão do aparelho, tornando-o perfeitamente recomendado para esse tipo de medição.

- b) **CIRCUITOS DE ENTRADA:** Seu circuito de entrada é capaz de tolerar tensões até 600V e correntes de 5A.
- c) **CAPACIDADE DE MEMÓRIA:** Possui 4 Megabytes de memória, podendo ser expandida de acordo com a necessidade. É dotado de uma bateria com autonomia de vários anos.
- d) **COMUNICAÇÃO:** Dispõe de inúmeros meios físicos de comunicação: duas portas seriais (uma RS-232 e outra RS-485), uma porta ethernet e um modem. Também pode ser conectado diretamente a um computador pessoal ou instalado em uma rede com outros aparelhos de medição. Além disso, pode se comunicar via linha telefônica, através de seu modem interno.
- e) **SOFTWARE:** É muito completo e versátil, porém de difícil manuseio. Para a sua perfeita operação, é necessário que os usuários recebam um treinamento prévio. Não disponibiliza os dados em formato ASCII de maneira direta, nem possui recursos de análise estatística. Porém, devido à sua capacidade de adaptação, é possível implementar novas funções, sanando as deficiências encontradas.
- f) **SEGURANÇA:** Oferece um ótimo nível de segurança, garantido por vários níveis de senhas.

O Medidor B, mostrou-se bastante adequado às exigências que estarão constantes no protocolo. Dentre suas grandes vantagens, encontra-se a precisão e a grande versatilidade. Um fator que pesa negativamente sobre tal aparelho é a sua complexidade de operação, havendo a necessidade de ser realizado um treinamento prévio com os usuários.



4.3 – MEDIDORES ATUALMENTE EM ESTUDO:

A grande maioria dos instrumentos atualmente disponíveis no mercado para a monitoração da QEE são caros e possuem recursos limitados, principalmente no que diz respeito ao tempo de armazenamento e à possibilidade de análises estatísticas.

Desta forma, devido às dificuldades existentes quanto à disponibilidade de instrumentação adequada para realizar avaliações integradas dos itens de qualidade, muitos esforços estão sendo voltados à pesquisa de equipamentos, com tecnologia nacional, que sejam mais apropriados à realidade do sistema elétrico brasileiro.

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU), através do projeto SIDAQEE (Sistema Integrado para Diagnóstico e Análise da Qualidade da Energia Elétrica), tem trabalhado no desenvolvimento de um aparelho de aquisição contínua de longa duração, com aplicativos de análise de vários itens de qualidade, como: harmônicas, desequilíbrios, variações de tensão, flicker, transitórios, potências etc.

Como resultado de uma primeira etapa, já se dispõe de um medidor experimental, o qual será descrito resumidamente no sub-item 4.3.1.

Tomando como base os trabalhos realizados pelo grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica da UFU, principalmente no que diz respeito ao projeto SIDAQEE, e trabalhando em forma de parceria, propõe-se a construção de um protótipo de medidor da qualidade da energia que não só contemple todos os itens do protocolo a ser estabelecido pela ANEEL, como também seja viável do ponto de vista comercial.

Tal empenho vem num momento muito oportuno, pois de nada adiantará definir as diretrizes a serem seguidas para a manutenção da QEE se não houver meios eficientes de quantificá-la e monitorá-la.

4.3.1 – PROJETO SIDAQEE [13]:

O equipamento que já foi concebido é capaz de trabalhar com quatro sinais elétricos de tensões e mais quatro de correntes, fazendo a aquisição de forma ininterrupta, ciclo a ciclo. Com isso é possível a análise de diversos itens de qualidade, tanto de forma determinística, como também de forma probabilística.

Para reduzir o enorme volume de dados, é realizado um processamento, obtendo o valor RMS de cada ciclo e armazenando os sinais completos na forma de janelas. Isso restringe a capacidade de monitoração a eventos de natureza quase-estacionária.

As janelas são compostas por períodos contínuos de sinal com duração de 100ms (o que equivale a 6 ciclos de sinais de 60Hz) a cada 500ms, ou seja, 80% dos pontos amostrados são desconsiderados para fins de análise.

A estrutura geral do hardware pode ser visualizada na figura 4.10.

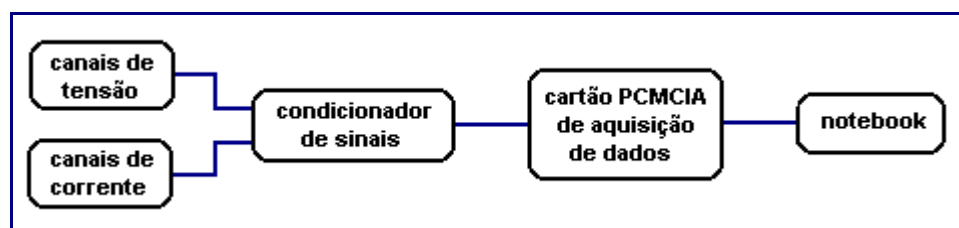


Figura 4.10 – Diagrama de blocos do projeto SIDAQEE.

Na figura 4.10, sinais de tensão e corrente derivados do sistema elétrico, através de seus correspondentes sensores, são conectados ao sistema condicionador de sinais. Este dispositivo atua com o propósito de promover a isolamento necessária e enquadrar os níveis dos sinais com a etapa de digitalização. Nesta etapa também estão presentes os circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle do sistema de enquadramento e de amostragem/retenção (“sample and hold”).

A placa de aquisição, ao receber os sinais já condicionados, realiza as transformações necessárias, ou seja, a digitalização dos mesmos, para que possam ser processados posteriormente.

Após a obtenção dos dados digitais, o “notebook” processa o cálculo dos valores RMS ciclo a ciclo, bem como realiza a estratégia para a o enquadramento dos sinais na forma de janelas.

Uma vez realizado todo este processo, para cada segundo de monitoração, tem-se à disposição as formas de onda, em duas janelas de 100ms e os valores RMS de cada um dos ciclos. Esta base de dados pode então ser utilizada por programas aplicativos que farão análise dos diversos itens de qualidade.

O alto custo da placa de aquisição (cerca de US\$ 9.000,00) torna o protótipo economicamente inviável, tornando imperativo o estudo de formas alternativas de digitalização dos dados adquiridos.

Outro detalhe técnico passível de melhorias seria a inserção de um filtro *anti-aliasing* no circuito condicionador de sinais. A ausência de tal filtro compromete o desempenho da etapa digitalizada, tornando-a vulnerável a interferências destrutivas causadas pelo fenômeno de *aliasing*⁸.

4.3.2 – SUGESTÕES PARA UM FUTURO PROTÓTIPO:

Com o intuito de satisfazer às especificações do futuro protocolo e, ao mesmo tempo, amenizar a carência de tecnologia na área de qualidade da energia, propõe-se a elaboração de um sistema de monitoração que não só atenda às exigências impostas nas normas, como também seja comercialmente viável.

As bases do novo protótipo serão extraídas de todos os trabalhos realizados até o momento e das normas já implantadas na área de QEE. Contudo, de toda a bibliografia que se dispõe, serão usados

⁸ Para que um sinal possa ser corretamente digitalizado, ele deve ser amostrado a uma taxa de, pelo menos, duas vezes a frequência da maior componente espectral presente (Teorema de Nyquist). Caso este critério não seja obedecido, aparecerão réplicas (“alias”) de ondas de alta frequência no espectro de baixa frequência, comprometendo todo o processo.



como ponto de partida os trabalhos realizados pela Universidade Federal de Uberlândia e as avaliações efetuadas em equipamentos já existentes, incluindo o projeto SIDAQEE.

As principais características que deverão ser contempladas neste projeto foram dispostas ao longo do presente capítulo. Entretanto, o sistema deverá ser bastante flexível, possibilitando a inserção de novas funções e a alteração das já existentes. Esse detalhe é bastante importante, pois impedirá que o mesmo se torne inadequado ou obsoleto com o passar do tempo.

O sistema de monitoração será composto de vários módulos, implementados em hardware e também em software.

A etapa de hardware terá inúmeras funções, que irão desde a isolamento e adequação dos níveis dos sinais adquiridos da rede elétrica, sua digitalização e, por fim, o processamento e armazenamento dos mesmos. Outras funções serão acrescentadas, à medida que os estudos forem avançando.

À outra caberá análises mais sofisticadas (determinísticas e probabilísticas), a emissão de relatórios e a geração de bancos de dados das medições. Deverá ser o mais completo possível, não deixando de lado a simplicidade de manuseio e a intuitividade das operações.



O presente trabalho ainda contempla a especificação de um dos blocos que serão implementados no protótipo a nível de hardware. Trata-se do filtro *anti-aliasing*, comentado no sub-item 4.3.1. Todos os detalhes encontram-se expostos no capítulo subsequente (capítulo 5).



5 – FILTRO ANTI-ALIASING:

No sistema de monitoração a ser proposto, pretende-se amostrar os sinais adquiridos da rede elétrica a uma taxa de 256 (2^8) e 128 (2^7) pontos por ciclo de 60Hz. A norma estabelece um patamar mínimo de 100 amostras, contudo, optou-se por valores mais elevados com o intuito de melhorar a qualidade das oscilografias e da análise harmônica.

Para que não ocorra o fenômeno de *aliasing* é necessário que a taxa de amostragem seja, pelo menos, duas vezes superior à frequência da maior componente espectral do sinal.

Como as taxas já estão pré-definidas, é necessário limitar largura de banda do sinal, utilizando-se filtros passa-baixa⁹. Para 256 amostras por ciclo, a largura de banda não pode ultrapassar 7680Hz; no caso de 128 amostras, esse valor cai para no máximo 3840Hz.

O procedimento utilizado para o cálculo desses valores está mostrado logo abaixo:

- 1) A frequência da maior componente espectral do sinal deve ser menor ou igual à metade da taxa de amostragem;
- 2) 256 amostras por ciclo equivalem a uma taxa de: $256 \times 60\text{Hz} = 15360\text{Hz}$. A metade desse valor é igual a 7680Hz.
- 3) 128 amostras por ciclo correspondem a uma taxa de: $128 \times 60\text{Hz} = 7680\text{Hz}$. A metade dessa quantia resulta em 3840Hz.

Existem diversas implementações possíveis para filtros passa-baixa, cada uma com peculiaridades próprias. Escolheu-se, no entanto, a topologia Butterworth, por esta apresentar uma resposta mais plana na sua faixa de passagem.

Foram ainda estudadas duas formas distintas para a realização dos filtros: utilizando-se circuitos RC ativos e capacitores chaveados. A análise de ambas teve o intuito de levantar suas vantagens e limitações, estabelecendo qual seria mais apropriada ao projeto.

Todos os procedimentos empregados no desenho dos filtros encontram-se dispostos no decorrer deste capítulo.

⁹ Os filtros *anti-aliasing* nada mais são que filtros passa-baixa, visto que a sua função é atenuar as componentes de alta frequência. Doravante será dada preferência ao uso desta última terminologia.



5.1 – FILTRO PASSA-BAIXA IDEAL:

Um filtro passa-baixa ideal é aquele que apresenta um ganho ou uma atenuação constante para frequências abaixo de um certo valor ω_c (frequência de corte) e uma atenuação infinita para frequências acima desse patamar. Sua faixa de transição é abrupta, sendo denominado, por isso, de “*brick wall*”. A resposta deste filtro está mostrada na figura 5.1:

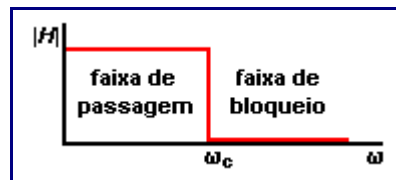
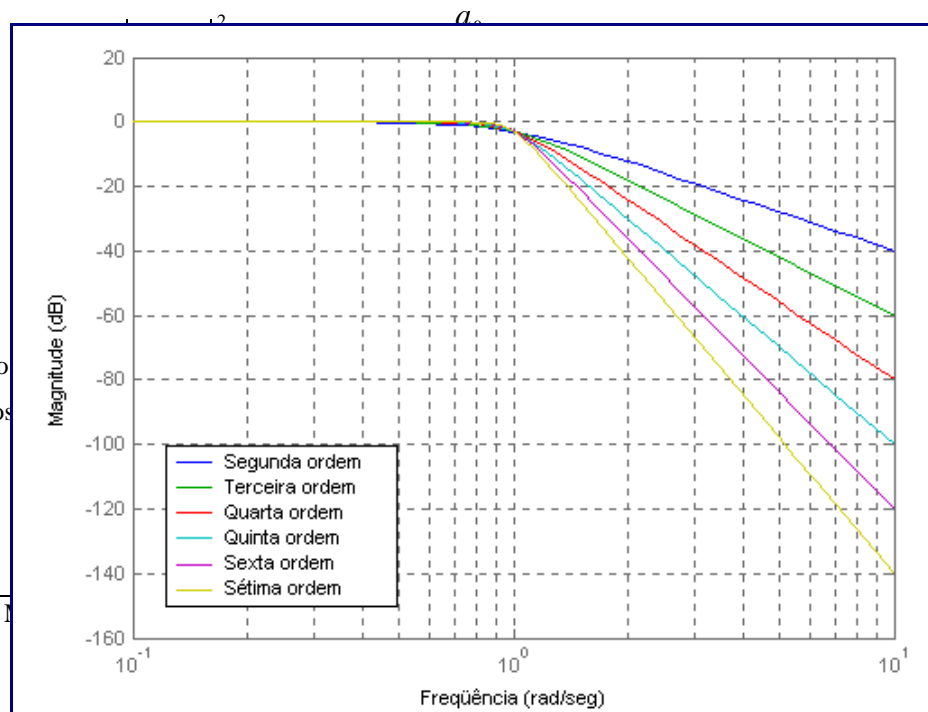


Figura 5.1 – Resposta de um filtro passa-baixa ideal.

Infelizmente, não é possível obter circuitos com tal função de transferência, pois implicaria em um sistema não-causal, ou seja, ele deveria apresentar uma resposta em sua saída antes mesmo de receber um sinal correspondente em sua entrada. Como isso não é possível, os filtros ideais não são passíveis de implementação. Desta forma, a solução consiste em empregar filtros cuja resposta se aproxime do comportamento ideal.

5.2 – APROXIMAÇÃO DE BUTTERWORTH:

A função de transferência de um filtro passa-baixa pode ser representada por um quociente de polinômios, tendo como numerador uma constante. Duas representações muito usuais são mostradas nas equações (5.1) e (5.2):



uma questão
rem circuitos

Alaor Faria D

olve
reque-

ina 41



Figura 5.2 – Gráfico de Bode da amplitude de filtros passa-baixa Butterworth de diversas ordens.

Os filtros passa-baixa não modificam apenas a amplitude do sinal; eles também provocam um atraso na fase de 90° por cada pólo presente no circuito, como pode ser visto na figura 5.3:

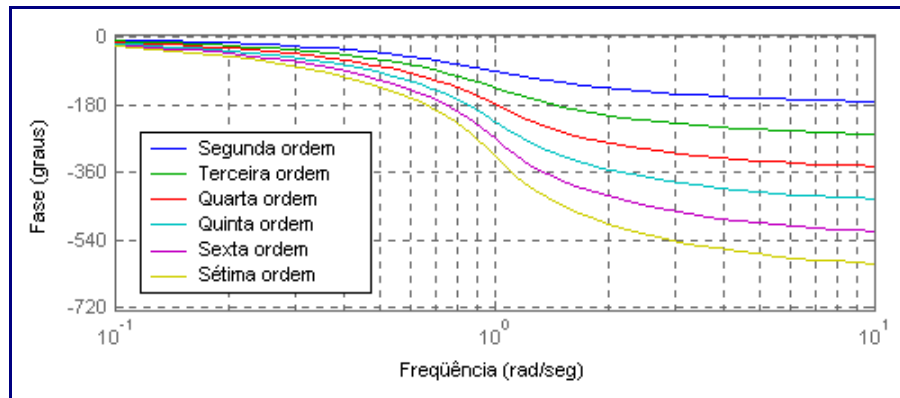


Figura 5.3 – Gráfico comparativo da fase da resposta em frequência de filtros passa-baixa Butterworth de diversas ordens.



Os pólos da função de transferência modelam as características do filtro passa-baixa. No caso da topologia Butterworth, eles são escolhidos de forma que a resposta seja totalmente plana na faixa de passagem.

A tabela 5.1 exibe a localização dos pólos de um filtro Butterworth de segunda até décima ordem com frequência de corte normalizada em 1 rad/s [14]:

Tabela 5.1 – Localização dos pólos de um filtro passa-baixa Butterworth.

Ordem o Filtro								
Segunda	Terceira	Quarta	Quinta	Sexta	Sétima	Oitava	Nona	Décima
-0,7071068	-0,5000000	-0,3826834	-0,8090170	-0,2588190	-0,9009689	-0,1950903	-0,9396926	-0,1564345
+j0,7071068	+j0,8660254	+j0,9238795	+j0,5877852	+j0,9659258	+j0,4338837	+j0,9807853	+j0,3420201	+j0,9876883
-0,7071068	-0,5000000	-0,3826834	-0,8090170	-0,2588190	-0,9009689	-0,1950903	-0,9396926	-0,1564345
-j0,7071068	-j0,8660254	-j0,9238795	-j0,5877852	-j0,9659258	-j0,4338837	-j0,9807853	-j0,3420201	-j0,9876883
	-1,0000000	-0,9238795	-0,3090170	-0,7071068	-0,2225209	-0,5555702	-0,1736482	-0,4539905
		+j0,3826834	+j0,9510565	+j0,7071068	+j0,9749279	+j0,8314696	+j0,9848078	+j0,8910065
		-0,9238795	-0,3090170	-0,7071068	-0,2225209	-0,5555702	-0,1736482	-0,4539905
		-j0,3826834	-j0,9510565	-j0,7071068	-j0,9749279	-j0,8314696	-j0,9848078	-j0,8910065
			-1,0000000	-0,9659258	-0,6234898	-0,8314696	-0,5000000	-0,7071068
				+j0,2588190	+j0,7818315	+j0,5555702	+j0,8660254	+j0,7071068
				-0,9659258	-0,6234898	-0,8314696	-0,5000000	-0,7071068
				-j0,2588190	-j0,7818315	-j0,5555702	-j0,8660254	-j0,7071068
					-1,0000000	-0,9807853	-0,7660444	-0,8910065
						+j0,1950903	+j0,6427876	+j0,4539905
						-0,9807853	-0,7660444	-0,8910065
						-j0,1950903	-j0,6427876	-j0,4539905
							-1,0000000	-0,9876883
								+j0,1564345
								-0,9876883
								-j0,1564345

A análise da tabela mostra que todos os pólos possuem parte real negativa (condição necessária para a estabilidade do circuito) e os que apresentam parte imaginária diferente de zero vêm dispostos em pares complexos conjugados.

A equação (5.3) ilustra uma função de transferência de um filtro Butterworth de terceira ordem, elaborado a partir da tabela 5.1:

$$H_3(s) = \frac{1}{(s+1)(s+0,5-j0,866)(s+0,5+j0,866)} \quad (5.3)$$

Uma forma mais usual de representar essa função consiste em agrupar os pólos complexos conjugados, como mostrado na equação (5.4):

$$H_3(s) = \frac{1}{(s+1)(s^2+s+1)} \quad (5.4)$$

Os valores da tabela 5.1 também podem ser utilizados para qualquer outra frequência de corte, bastando para isso realizar um procedimento chamado “ajuste de frequência”. Essa técnica consiste



em substituir todas as variáveis “ s ” do polinômio por $\frac{s}{\omega_c}$. O filtro de terceira ordem mostrado na equação (5.4) seria expresso da seguinte forma:

$$H_3(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c} + 1\right) \left(\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + \frac{s}{\omega_c} + 1\right)} \quad (5.5)$$

Filtros de ordens elevadas são constituídos por filtros de primeira e segunda ordens dispostos em cascata. Um filtro de sexta ordem, por exemplo, é composto por três filtros de segunda ordem.

A resposta em frequência de um filtro de segunda ordem é descrita por três parâmetros: ganho (k), frequência de canto (ω_0) e fator de qualidade (Q). Os elementos de circuito são escolhidos de forma a atingir os três parâmetros determinados.

A equação (5.5) expressa a função de transferência de um filtro passa-baixa de segunda ordem:

$$H_2(s) = \frac{k \cdot \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (5.5)$$

Quando $k = 1$, a resposta em frequência aproxima-se de um filtro passa-baixa ideal com frequência de corte $\omega_c = \omega_0$. Quando $k \neq 1$, o filtro se assemelha a um filtro ideal em conjunto com um amplificador de ganho igual a k . O fator de qualidade (Q) controla o formato da resposta em frequência durante a faixa de transição.

5.3 – TOPOLOGIA SALLEN-KEY:

Vários circuitos diferentes podem ser utilizados para implementar filtros de segunda ordem. Uma topologia bastante empregada é chamada de Sallen-Key, a qual utiliza um amplificador operacional com realimentação positiva. O seu diagrama está mostrado através da figura 5.4:

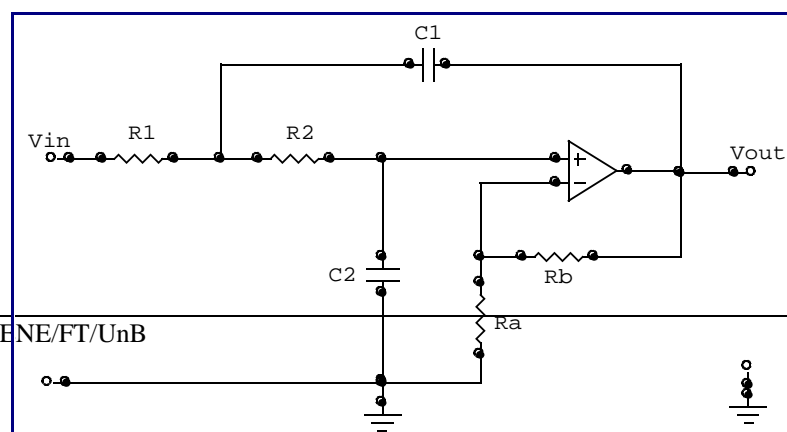




Figura 5.4 – Diagrama de um filtro passa-baixa Sallen-Key.

No circuito da figura 5.4 os resistores R_a e R_b são responsáveis pelo ajuste do ganho do filtro, enquanto os demais componentes ajustam a frequência de corte e o fator de qualidade.

A função de transferência correspondente é expressa pela equação (5.6), onde o ganho k é dado pela equação (5.7):

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_2 \cdot C_1} + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} - \frac{k}{R_2 \cdot C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (5.6)$$

$$k = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad (5.7)$$

Comparando-se as equações (5.5) e (5.6), obtêm-se as seguintes expressões:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (5.8) \quad Q = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}}{\frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_2 \cdot C_1} + \frac{1-k}{R_2 \cdot C_2}} \quad (5.9)$$

É comum utilizar este filtro com ganho unitário ($k = 1$). Para tanto, basta substituir o resistor R_b por um curto-circuito (resistência igual a zero) e retirar R_a do circuito (resistência infinita).



5.3 – FILTROS COM CAPACITORES CHAVEADOS:

A obtenção de capacitores e resistores de precisão com os valores adequados às constantes de tempo do filtro complica o seu projeto. Muitas vezes é necessária a associação de componentes para se atingir o valor necessário, fazendo com que o comportamento do circuito divirja do esperado. Além disso, a presença de resistores dificulta possíveis processos de integração. Como solução, emprega-se o princípio dos capacitores chaveados, os quais substituem os resistores presentes no circuito.

Tal técnica baseia-se na hipótese de que um capacitor chaveado entre dois nós de um circuito, operando a uma taxa suficientemente alta, é equivalente à conexão de um resistor entre esses dois nós.

A figura 5.5 exibe um circuito simples e a sua implementação utilizando-se um capacitor chaveado:

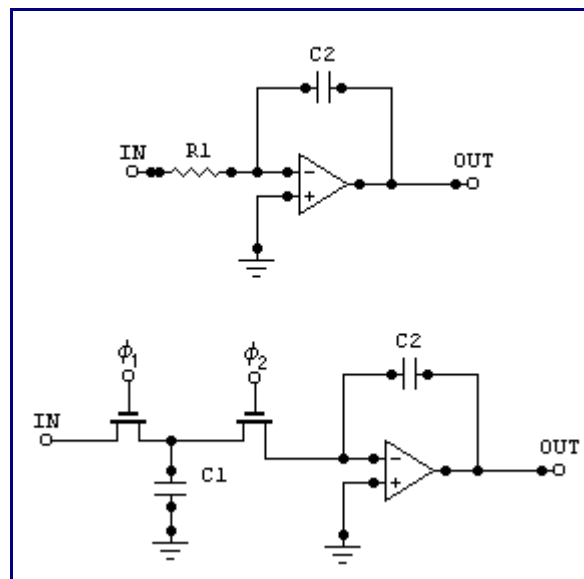


Figura 5.5 – Exemplo de um circuito simples e o seu correspondente a capacitor chaveado.

Pela figura, pode-se notar que cada resistor é substituído por um capacitor aterrado, conectado a duas chaves MOS.

As chaves MOS são acionadas por um relógio de duas fases não superpostas. Caso a frequência de chaveamento seja muito maior do que a frequência do sinal de entrada, as variações deste podem ser consideradas desprezíveis. Deste modo, durante a fase ϕ_1 , o capacitor C_1 carrega-se até o valor da tensão de entrada, de acordo com a equação (5.10).

$$q_{C_1} = C_1 \cdot v_{in} \quad (5.10)$$



Depois, durante a fase ϕ_2 , o capacitor C_1 é conectado ao terra virtual da entrada do amplificador operacional, sendo então forçado a se descarregar através do capacitor C_2 .

Pela descrição feita, verifica-se que no decorrer de cada período do relógio (T_c) uma quantidade de carga $q_{C_1} = C_1 \cdot v_{in}$ é extraída da fonte de entrada e fornecida ao capacitor C_2 . Portanto, a corrente média que circula entre o nó de entrada e o nó do terra virtual é dada por:

$$i_{méd} = \frac{C_1 \cdot v_{in}}{T_c} \quad (5.11)$$

Se T_c for suficientemente curto, o processo poderá ser considerado como quase contínuo, e o arranjo simulará o efeito de um resistor, cuja resistência equivalente é dada pela equação (5.12).

$$R_{eq} \equiv \frac{v_{in}}{i_{méd}} = \frac{T_c}{C_1} \quad (5.12)$$

Mantendo-se o valor de C_1 fixo, é possível alterar o valor do resistor apenas variando-se o período de chaveamento. Isto torna os filtros com capacitores chaveados bastante versáteis do ponto de vista da sua frequência de corte.

5.4 – PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO ANTI-ALIASING:

Realizou-se o projeto de um filtro ativo RC passa-baixa Butterworth de sexta ordem, utilizando-se a topologia Sallen-Key.

Seus pólos foram obtidos a partir da tabela 5.1, resultando na função de transferência mostrada na equação (5.13):

$$H_6 = \frac{1}{(s^2 + 1,932.s + 1).(s^2 + 1,414.s + 1).(s^2 + 0,5176.s + 1)} \quad (5.13)$$

Serão utilizados três filtros Sallen-Key dispostos em cascata para a implementação do circuito de sexta ordem. Suas funções de transferência encontram-se descritas pelas equações (5.14), (5.15) e (5.16):



$$H_{2,1} = \frac{1}{(s^2 + 1,932.s + 1)} \quad (5.14)$$

$$H_{2,2} = \frac{1}{(s^2 + 1,414.s + 1)} \quad (5.15)$$

$$H_{2,3} = \frac{1}{(s^2 + 0,5176.s + 1)} \quad (5.16)$$

O fator de qualidade (Q) de cada um dos filtros de segunda ordem pode ser obtido através da comparação com a equação (5.5). Seus valores, bem como o gráfico da resposta em frequência individual, encontram-se expostos na figura 5.6.

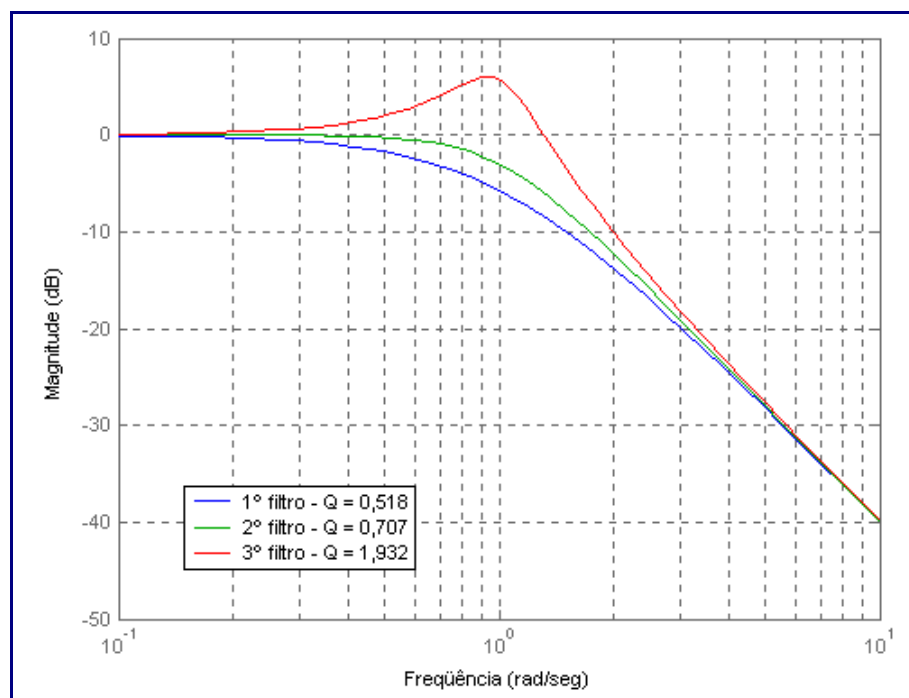


Figura 5.6 – Resposta em frequência de cada filtro Sallen-Key individual, juntamente com o fator de qualidade correspondente.

Observando a figura 5.6, nota-se que o fator de qualidade aumenta gradativamente. Tal característica é perfeitamente desejável, pois permite que o sinal seja previamente filtrado por etapas sobre-amortecidas, compensando os efeitos causados pelo “overshoot” dos demais blocos. Com isso, melhora-se a resposta dinâmica e a relação sinal ruído do conjunto.

Como foi exposto no início do capítulo, o filtro anti-aliasing do protótipo deverá possuir duas frequências de corte distintas: 7680Hz e 3840Hz. Deste modo, a função de transferência dos filtros deve ser ajustada, através do procedimento descrito na equação (5.5). O resultado do ajuste de frequência



está mostrado nas equações (5.17), (5.18) e (5.19), para $\omega_c = 7860\text{Hz}$ (48255 rad/s) e nas equações (5.20), (5.21) e (5.22), para $\omega_c = 3840\text{Hz}$ (24127 rad/s):

$$H_{2,1} = \frac{48255^2}{(s^2 + \frac{48255}{0,518}s + 48255^2)} \quad (5.17)$$

$$H_{2,1} = \frac{24127^2}{(s^2 + \frac{24127}{0,518}s + 24127^2)} \quad (5.20)$$

$$H_{2,2} = \frac{48255^2}{(s^2 + \frac{48255}{0,707}s + 48255^2)} \quad (5.18)$$

$$H_{2,2} = \frac{24127^2}{(s^2 + \frac{24127}{0,707}s + 24127^2)} \quad (5.21)$$

$$H_{2,3} = \frac{48255^2}{(s^2 + \frac{48255}{1,932}s + 48255^2)} \quad (5.19)$$

$$H_{2,3} = \frac{24127^2}{(s^2 + \frac{24127}{1,932}s + 24127^2)} \quad (5.22)$$

O gráficos de Bode para cada frequência de corte encontram-se expostos nas figuras 5.7 e 5.8:

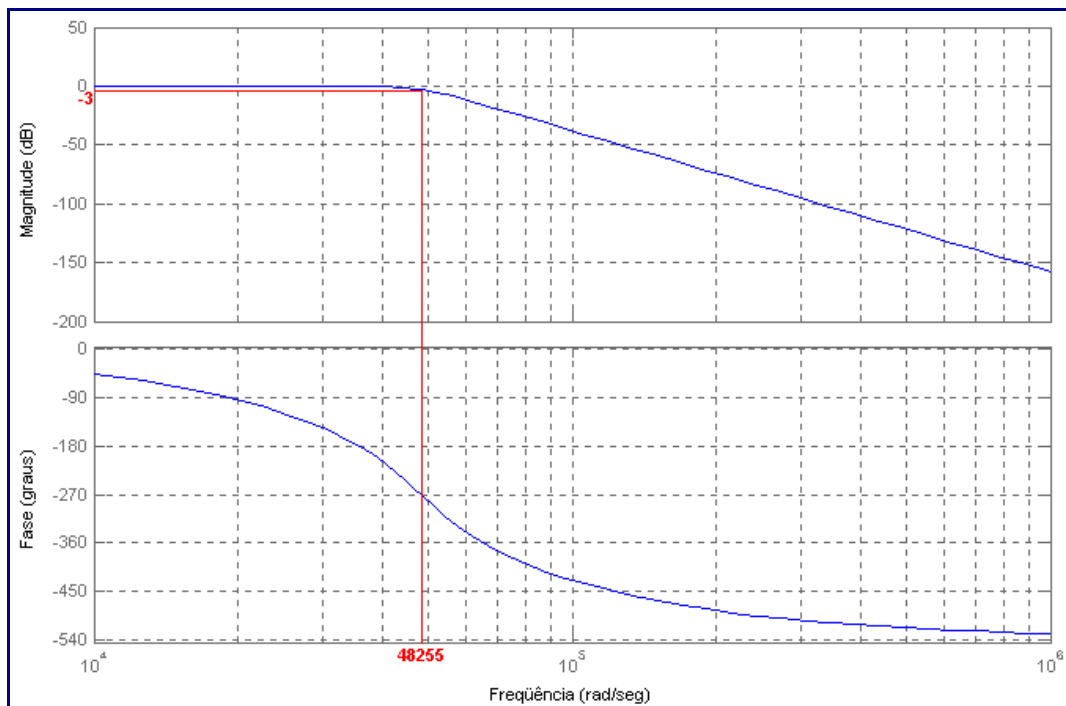


Figura 5.7 – Gráfico de Bode do filtro de sexta ordem com $\omega_c = 7680\text{Hz}$ ou 48255 rad/s.

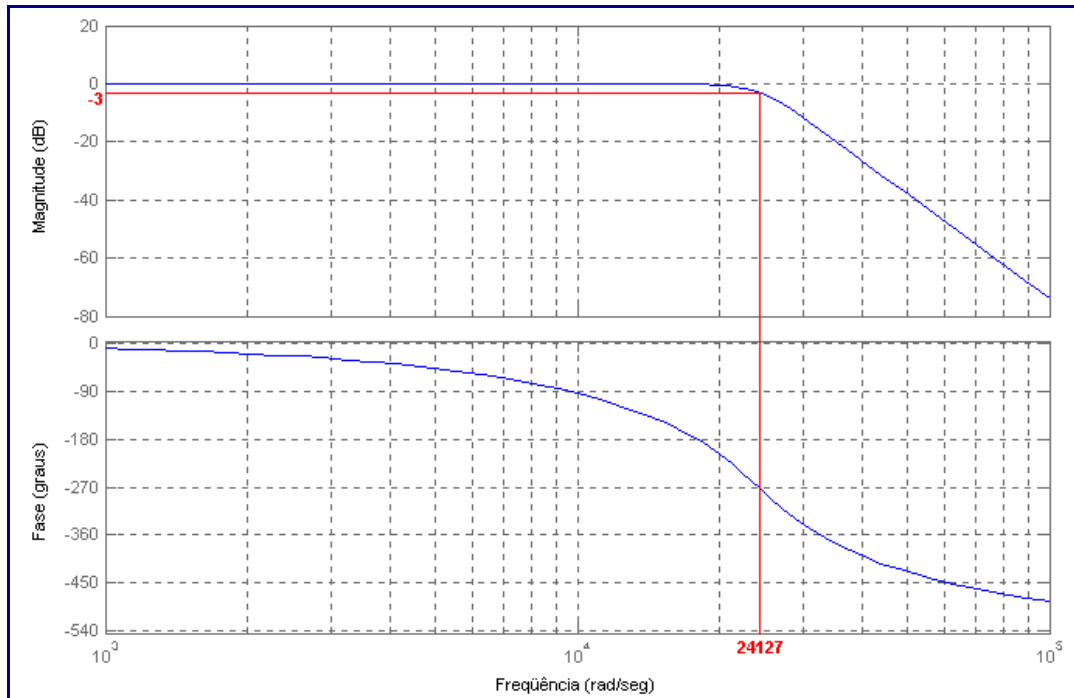


Figura 5.8 – Gráfico de Bode do filtro de sexta ordem com frequência de corte igual a 3840Hz ou 24127 rad/s.

Os gráficos das figuras 5.7 e 5.8 mostram claramente o perfeito ajuste dos filtros, cada um provocando uma atenuação de -3dB na sua frequência de corte correspondente e um decaimento de 120dB por década (ou 36dB por oitava).

O digrama completo do circuito eletrônico encontra-se na figura 5.9. Todos os três filtros Sallen-Key possuem ganho unitário, o que simplificará bastante a sua implementação e a análise.

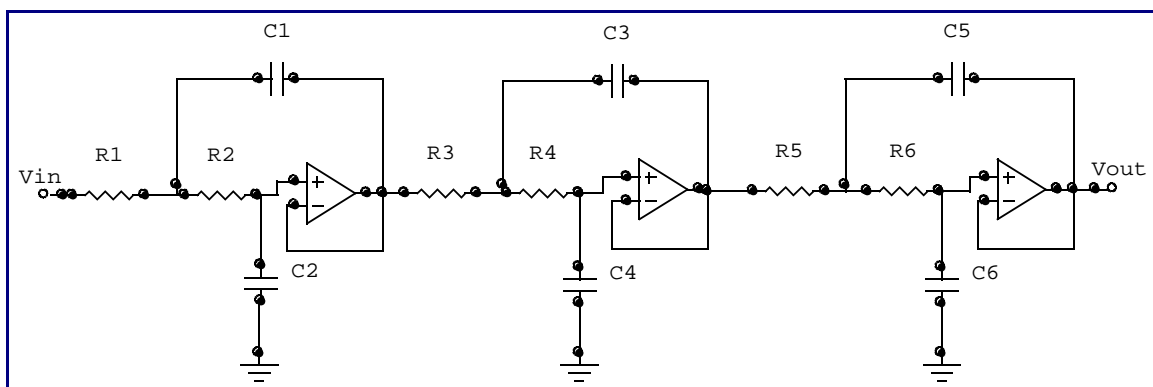


Figura 5.9 – Diagrama completo do filtro anti-aliasing.

Os valores dos resistores e capacitores são escolhidos com o auxílio das equações (5.8) e (5.9). Visto que, para a escolha dos componentes de cada filtro Sallen-Key, existem apenas duas equações



para quatro incógnitas, alguns valores precisam ser arbitrados. Uma outra simplificação útil consiste na utilização de resistores iguais em cada bloco. Desta maneira, as equações se reduzem à seguinte forma:

$$\omega_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{C_1 \cdot C_2}} \quad (5.23) \quad Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (5.24)$$

Mesmo com tantas simplificações ainda é necessária a escolha do valor de alguns componentes. Esta etapa do projeto é bastante importante, devendo-se escolher valores próximos aos comercialmente disponíveis. Várias tentativas são necessárias para que, no final, o comportamento do circuito divirja o mínimo possível do desejado.

Outro detalhe bastante relevante é o cálculo da sensibilidade do circuito à variação de seus componentes. Desta forma, é possível dar preferência àqueles que mais influenciam o comportamento do arranjo como um todo. O conceito de sensibilidade pode ser definido pela equação (5.25):

$$S_x^Y \equiv \frac{\partial Y/Y}{\partial x/x} = \frac{x}{Y} \frac{\partial Y}{\partial x} \quad (5.25)$$

Aplicando-se essa definição às equações (5.23) e (5.24), pode-se determinar a sensibilidade do filtro anti-aliasing proposto aos seus diversos componentes. O resultado encontra-se na tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Sensibilidade dos parâmetros do circuito em relação ao valor de seus componentes.

Parâmetro do Circuito	Componente	Sensibilidade
ω_0	R	-1
	C1	- 1/2
	C2	- 1/2
Q	R	0
	C1	1/2
	C2	- 1/2



As informações fornecidas pela tabela 5.2 mostram que os resistores exercem maior influência na determinação da frequência de corte do filtro, portanto, devem ter preferência durante a etapa de escolha dos valores.

Devido à pouca disponibilidade de componentes, foi implementado em laboratório apenas o filtro com frequência de corte igual a 7680Hz. O seu diagrama, juntamente com o valor de seus componentes, pode ser visto através da figura 5.10:

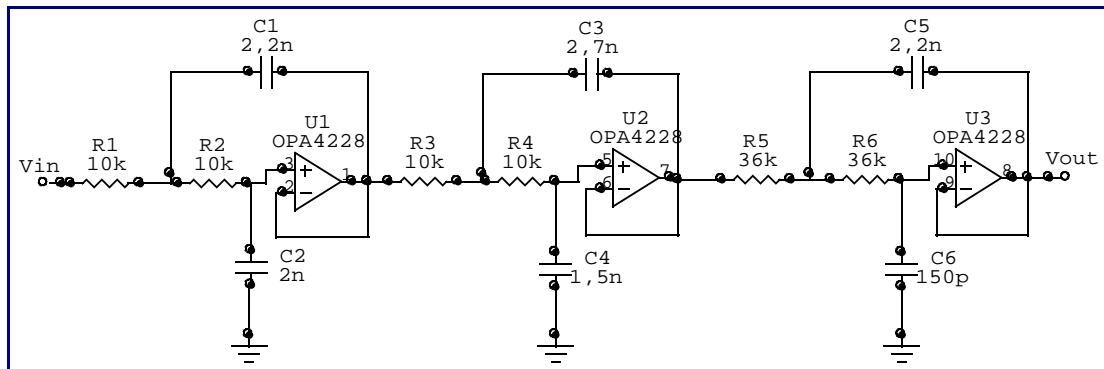


Figura 5.10 – Diagrama completo do filtro anti-aliasing com $\omega_c = 7680\text{Hz}$, incluindo a descrição valor dos componentes.

Utilizou-se um amplificador operacional quádruplo chamado OPA4228 da Burr Brown®, o qual é especialmente projetado para aplicações desse tipo. Ele possui um ganho x banda (GW) de 33MHz e um *slew rate* de 10V/ μs . O seu *data sheet* completo encontra-se no Anexo I.

Durante os testes práticos, foi aplicado ao filtro um sinal senoidal de amplitude constante, cuja frequência foi variada de menos de 1Hz até 15500Hz. Com isso pôde-se traçar o diagrama de Bode do circuito, o qual encontra-se exposto na figura 5.11:

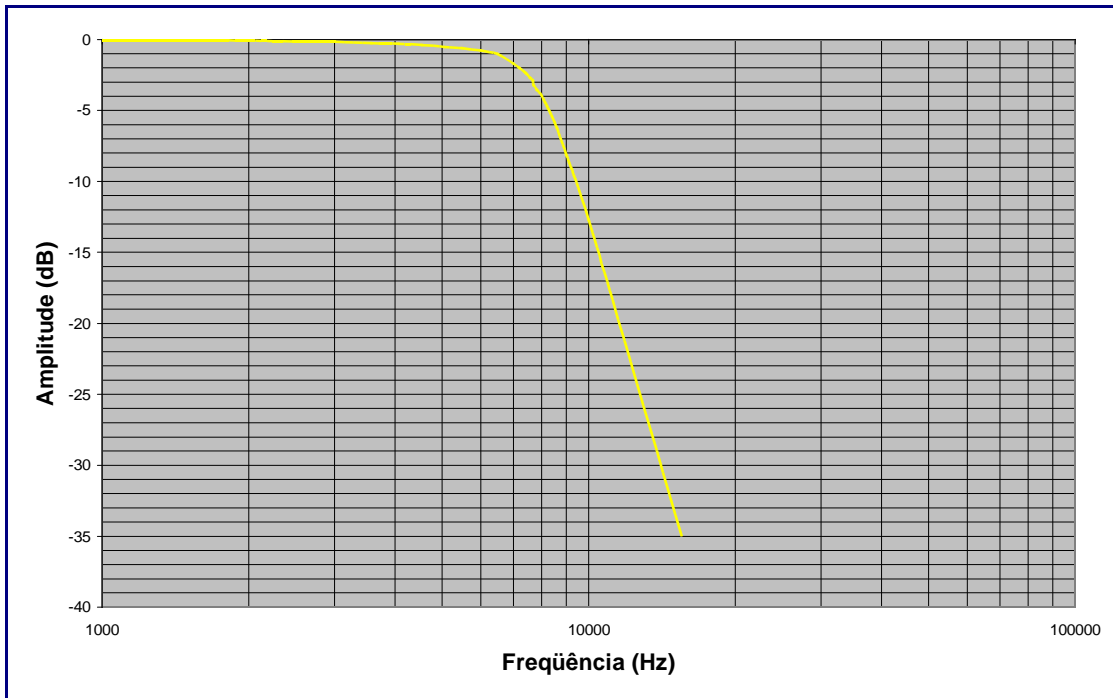


Figura 5.11 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixa Butterworth de sexta ordem, implementado no laboratório.

A tabela 5.3 contém os valores que compõem o gráfico da figura 5.11:

Tabela 5.3 – Dados coletados em laboratório durante o ensaio do filtro passa-baixa Butterworth de sexta ordem.

Frequência (Hz)	Vin (V)	Vout (V)	20*Log(Vout/Vin)	Frequência (Hz)	Vin (V)	Vout (V)	20*Log(Vout/Vin)
0,787	2,229	2,244	0,058255682	5060	2,228	2,1	-0,513917835
7,74	2,228	2,247	0,073757718	5500	2,228	2,075	-0,617941709
20,2	2,228	2,228	0	6000	2,228	2,036	-0,782748257
40	2,228	2,22	-0,031244241	6500	2,228	1,98	-1,024999925
61	2,228	2,226	-0,00780053	7000	2,228	1,83	-1,709281935
100	2,228	2,229	0,00389764	7200	2,228	1,77	-1,998838403
202	2,228	2,229	0,00389764	7410	2,228	1,7	-2,349325302
405	2,228	2,226	-0,00780053	7590	2,228	1,63	-2,714551642
805	2,228	2,22	-0,031244241	7660	2,228	1,6	-2,875904077
1000	2,228	2,217	-0,042989868	7700	2,228	1,54	-3,207889313
1500	2,228	2,212	-0,062601277	7830	2,228	1,48	-3,553069422
2000	2,228	2,207	-0,082257067	8000	2,228	1,41	-3,973921477
2470	2,228	2,19	-0,149421433	8500	2,228	1,135	-5,858386499
3000	2,228	2,188	-0,157357377	9000	2,228	0,875	-8,11814267
3570	2,228	2,165	-0,249145716	10000	2,228	0,515	-12,72215915
4060	2,228	2,15	-0,309534532	15500	2,228	0,04	-34,9171039
4540	2,228	2,13	-0,390711661				

Infelizmente, o gerador de funções não permitiu um ajuste preciso da frequência do sinal aplicado, entretanto, como pode ser observado, os resultados se mostraram bastante precisos. Utilizando-se uma interpolação entre os pontos da tabela, verifica-se que a frequência de corte do filtro seria de 7675Hz, diferindo do valor proposto em apenas 0,065%.



Tamanha precisão só foi possível devida à escolha minuciosa dos componentes que mais se aproximavam dos valores desejados, medindo-os com o auxílio de um multímetro-capacímetro. Houve a necessidade de adotar tal procedimento, pois não se dispunha de resistores e capacitores de precisão no laboratório.

Além da implementação do filtro RC ativo, com amplificador operacional e componentes discretos, realizou-se a montagem de um filtro a capacitor chaveado, utilizando-se um circuito integrado da Texas Instruments® que desempenha a função de um filtro passa-baixa Butterworth de quarta ordem – TLC14. A figura 5.12 ilustra a sua pinagem e seu esquema de ligação. O *data sheet* completo pode ser consultado no Anexo II.

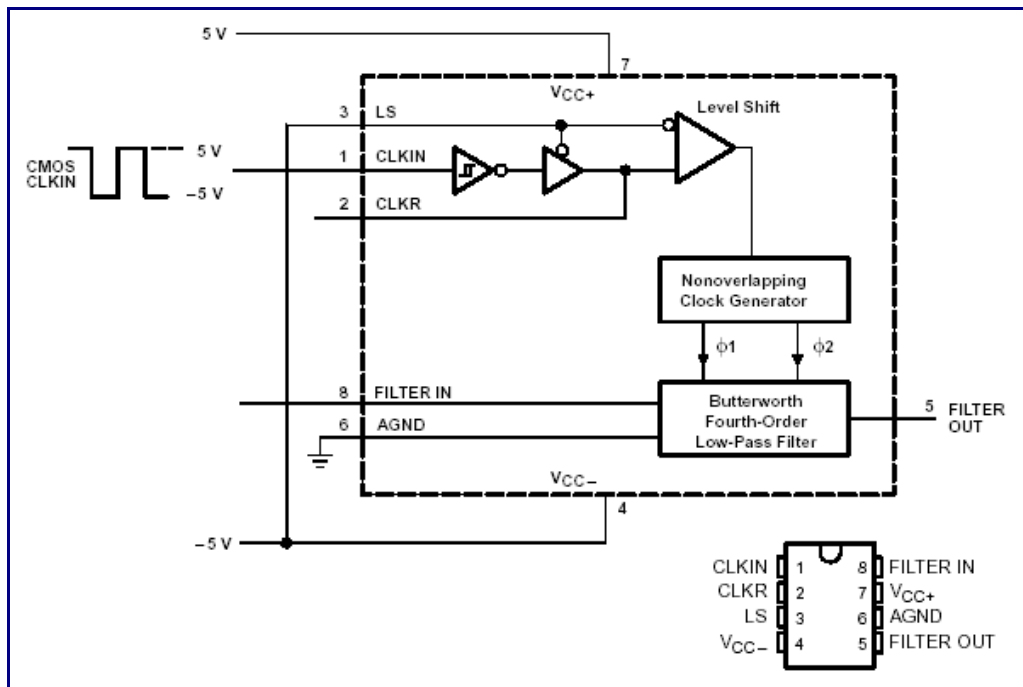
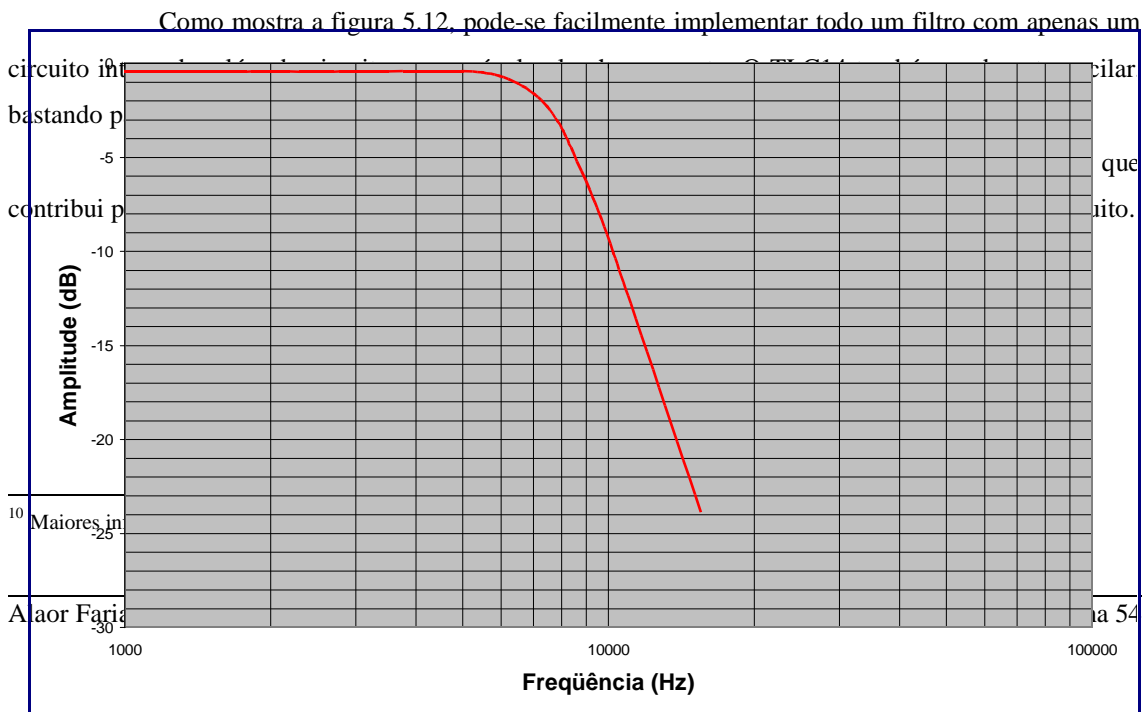


Figura 5.12 – Diagrama de ligação e pinagem do circuito integrado TLC14.



Maiores in
A maior Fari



Figura 5.13 – Gráfico de Bode do filtro a capacitor chaveado com frequência de corte igual a 7680Hz.

Tabela 5.4 – Dados coletados em laboratório durante o ensaio do filtro a capacitor chaveado.

Frequência (Hz)	Vin (V)	Vout (V)	20*Log(Vout/Vin)	Frequência (Hz)	Vin (V)	Vout (V)	20*Log(Vout/Vin)
0,903	2,215	2,123	-0,368474728	4560	2,218	2,115	-0,413023402
30	2,215	2,113	-0,40948467	5000	2,218	2,115	-0,413023402
58,3	2,215	2,113	-0,40948467	5490	2,218	2,097	-0,487262227
100	2,215	2,113	-0,40948467	5950	2,218	2,055	-0,662994312
506	2,218	2,115	-0,413023402	6490	2,218	1,967	-1,043143638
1000	2,218	2,109	-0,437699241	7020	2,218	1,84	-1,622874376
1613	2,218	2,109	-0,437699241	7460	2,218	1,705	-2,28474317
2000	2,218	2,111	-0,42946617	7840	2,218	1,559	-3,062308532
2410	2,218	2,109	-0,437699241	8060	2,218	1,47	-3,572884141
3000	2,218	2,113	-0,421240895	9300	2,218	0,973	-7,156974031
3500	2,218	2,113	-0,421240895	10240	2,218	0,693	-10,10456614
4020	2,218	2,115	-0,413023402	15500	2,218	0,143	-23,81251009

A impossibilidade de se especificar de maneira exata a frequência fornecida pelo gerador de funções, utilizado para chavear o filtro, provocou o erro na frequência de corte. Contudo, mesmo assim, este foi relativamente pequeno. Novamente, com o auxílio da interpolação, observa-se que o erro foi de 1,66%.

Devido ao fato de que o filtro anti-aliasing a ser implementado no protótipo deverá possuir duas frequências de corte diferentes, a topologia que emprega capacitores chaveados mostra-se mais vantajosa. Isto porque basta a alteração do período de chaveamento para que o valor de ω_c possa ser alterado. Além disso, como um valor é exatamente o dobro do outro, será possível o uso de um divisor de frequência para se alternar de uma frequência de corte para outra.

Além disso, por existir um circuito integrado que desempenha sozinho o papel do filtro, a montagem será mais simples e ocupará menos espaço físico. Também não será necessário adquirir inúmeros componentes de precisão empregados na outra topologia, o que reduzirá os custos.



A única desvantagem seria a geração de ruídos de alta frequência. Todavia, inserindo-se um simples filtro passa-baixa na saída do circuito, pode-se contornar esse problema.



6 – CONCLUSÃO:

Este projeto teve como objetivo realizar uma análise dos trabalhos e normas a respeito da qualidade da energia elétrica em âmbito nacional e propor elementos necessários ao futuro protocolo de medição a ser implantado pela ANEEL. Além disso, foram sugeridas algumas características para um futuro protótipo de um sistema de monitoração da QEE, baseado no projeto SIDAQEE[13].

Do ponto de vista normativo, foi elaborada uma compilação dos principais procedimentos e regulamentações hoje em vigor, proporcionando uma referência concisa para futuros trabalhos na área de qualidade.

Várias características que constituirão o protocolo de medição foram enumeradas e analisadas de maneira sucinta, aumentando ainda mais a bibliografia disponível a esse respeito.

Por fim, com o auxílio das informações do projeto SIDAQEE, foi proposto um novo sistema de monitoração da QEE. Tal trabalho será feito em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia, tendo como meta a implementação de melhorias ao projeto já existente.

Uma dessas melhorias constitui na inserção de um filtro *anti-aliasing* no bloco de condicionamento de sinais do circuito.

O projeto do filtro foi realizado com bastante sucesso, sendo escolhida a topologia a capacitor chaveado como a mais adequada.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que este projeto constitui uma boa referência para outros trabalhos na área de monitoração da qualidade da energia elétrica. A carência de bibliografia a esse respeito é ainda expressiva, o que motiva ainda mais a produção de novas pesquisas.



7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Ramos, A. J. P.; Bronzeado, H. S.; Lins, L. R.: “Proposta de Procedimentos entre Empresas de Energia Elétrica e Seus Consumidores Visando a Melhoria da Qualidade da Energia Elétrica”, XIV SNP-TEE, 1997, Belém – Brasil.
- [2] Ramos, A. J. P.: “Monitoração, Avaliação e Controle da Qualidade da Energia Elétrica”, Relatório Parcial 1, ANEEL, Março de 2000.
- [3] Bronzeado, H.: “Qualidade da Energia Elétrica – Conceitos, Problemas e Soluções”, Maio de 2000.
- [4] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W.: Electrical Power Systems Quality. Editora McGraw-Hill, E.U.A., 1996.
- [5] ANEEL – “Resolução 24/2000 – Continuidade da Distribuição de Energia Elétrica”, 24 de Janeiro de 2000.
- [6] ANEEL – “Resolução 505/2001 – Conformidade dos Níveis de Tensão em Regime Permanente nos Sistema de Energia Elétrica”, 26 de Novembro de 2001.
- [7] ONS – “Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Maio de 2002.
- [8] ANEEL – “Procedimentos de Distribuição – Versão Preliminar”.
- [9] ANEEL – “Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas – Instrumentos de Medição”, Relatório Parcial 4, Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2000.
- [10] ANEEL – “Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas – Protocolos de Medição”, Relatório Parcial 3, Universidade Federal de Uberlândia, Junho de 2000.
- [11] ANEEL – “Equipamentos para o Sistema ANEEL de Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica”, Julho de 2002.



- [12] Miguel, A. F.; De Melo, F. X. : “Avaliação de Medidores Relacionados à Qualidade da Energia”, Universidade de Brasília, Julho de 2002.
- [13] Vilaça, A L. A.: “Uma Proposta de Instrumento para Medição da Qualidade da Energia Elétrica”, Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2001.
- [14] Van Valkenburg, M. E.: Analog Filter Desing. CBS College Publishing, E.U.A., 1982.

ANEXO I

ANEXO II