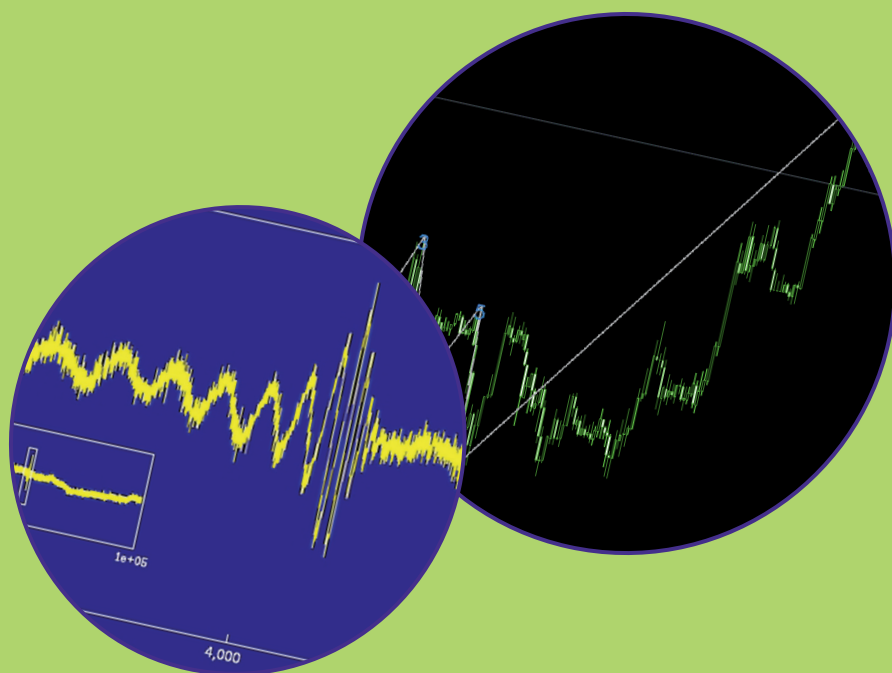


QUALIDADE NA ENERGIA ELÉTRICA

Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções

Ricardo Aldabó Lopez



Ricardo Aldabó Lopez

QUALIDADE NA ENERGIA ELÉTRICA

Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções

2ª edição

Artliber
EDITORA

Copyright© 2013 by Artliber Editora Ltda.

1ª edição - 2001

Revisão:

Maria Antonieta Marchiori Eckersdorff

Composição eletrônica e capa:

Artliber Editora

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Lopez, Ricardo Aldabó

Qualidade na energia elétrica -- 2ª ed / Ricardo
Aldabó Lopez. -- São Paulo: Artliber Editora, 2013.

Bibliografia.

1. Energia elétrica - Controle da qualidade 2.
Energia elétrica - Falhas I. Título

13-5390

CDD-621.319

Índices para catálogo sistemático:

1. Distúrbios: Energia elétrica: Engenharia 621.319
2. Energia elétrica: Distúrbios: Engenharia 621.319

2013

Todos os direitos desta edição reservados à

Artliber Editora Ltda.

Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3.294

05083-010 - São Paulo - SP - Brasil

Tel.: (11) 3643-0300 Fax.: (11) 3643-0309

info@artliber.com.br

www.artliber.com.br

Sumário

Prefácio, 13

Capítulo 1: Sistema de Energia Elétrica, 19

Energia elétrica comercial, 19

Chaveamento do sistema de potência, 21

Acoplamentos do sistema elétrico, 22

Sistema de aterramento, 24

Enlaces de terra, 25

Tensão de passo, 25

Fluxo de corrente no aterramento, 26

Energia e potência, 28

Fator de capacidade, 30

Controle de frequência, 31

Controle de tensão, 31

Impedância, 37

Tensão, corrente e potência, 41

Efeito Corona, 43

Transformador para rede elétrica, 43

Cargas pulsantes, 48

- Impedância de linha, 49
- Tensões de alimentação no Brasil, 50
- Tensão de fornecimento, 52
- Interferência e compatibilidade eletromagnética, 53
- Transmissão de corrente contínua em alta tensão, 54
- Operação de banco de capacitores, 56
- Energia elétrica no Brasil e no mundo, 57

Capítulo 2: Distúrbios na Energia Elétrica, 75

- Introdução, 75
- Principais fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos conforme classificação do IEC, 78
- Distúrbios de alta frequência, 79
- Descarga atmosférica, 86
- Descarga eletrostática (ESD), 95
- Corrente contínua em redes de corrente alternada (DC *offset*), 97
- Harmônicas, 97
- Sags (*dips*) e surges (*swells*), 107
- Categorias dos distúrbios eletromagnéticos, 110
- Subtensão e sobretensão, 111
- Desequilíbrios de tensão, 111
- Interrupção momentânea de tensão, 112
- Notching* de tensão, 113
- Distorção na forma de onda, 114
- Cintilação (*flicker*), 115
- Rede desbalanceada, 116
- Perda de neutro, 118
- Brownout* e *blackout*, 118
- Interferência eletromagnética (EMI), 119
- Perturbações de alta frequência (AF) por indução, 122
- Campos magnéticos de baixa frequência (BF), 124
- Campos magnéticos de AF, 125
- Pulso eletromagnético nuclear, 126
- Tempestade magnética ou geomagnética, 127
- Resumo dos distúrbios na energia elétrica, 129

Capítulo 3: Efeitos dos Distúrbios de Energia, 135

Computadores, 135

Sistemas de comunicação, 142

Controle de processos, 144

Atuadores de velocidade variável, 145

Sistemas de imagem, 149

Engenharia biomédica ou bioengenharia, 150

Fontes alternativas de energia, 159

Interruptor por falta de terra, 160

Transformadores, 161

Gerador de emergência, 162

Qualidade na geração de energia elétrica, 164

Lâmpada fluorescente, 167

Capítulo 4: Soluções para os Distúrbios de Energia, 171

Introdução, 171

Blindagem eletromagnética, 173

Supressor de surto transiente de tensão (TVSS), 179

Filtro de linha, 182

Filtro de ruído, 183

Filtro de harmônicas, 183

Transformador de isolamento, 183

Regulador de tensão, 184

Soluções para problemas de harmônicas, 187

Aplicação do reator de linha em atuador de frequência variável, 194

UPS (Uninterruptible Power Supplies), 202

Condicionador de energia, 212

Proteção coordenada de sistema elétrico e dados, 216

Para-raios, 222

Instalação de dispositivos protetores, 227

Proteção de tensão através de diodos de selênio e varistores, 229

Gráficos de incidências de distúrbios e soluções, 231

Deteção e recuperação de erros por software, 232

Dicas de compatibilidade eletromagnética em placa de circuito impresso, 233

Ruído produzido por fonte de alimentação, 238

Capítulo 5: Diagnóstico dos Distúrbios de Energia, 247

Ferramentas, 247

Fontes de distúrbios, 247

Fiação e conexões, 248

Distúrbios e relação entre sintoma e causa, 249

Procedimentos para inspeção na instalação elétrica, 255

Soluções para o sistema elétrico, 263

Controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), 264

Sistemas de aquisição de dados, 274

Sistema de monitoramento da qualidade de energia elétrica, 276

Instrumentos de valor eficaz verdadeiro (True RMS), 280

Noções sobre confiabilidade, 285

Capítulo 6: Tópicos de Eletrônica de Potência, 291

Introdução, 291

Semicondutores de potência para atuadores, 292

Conversores, 301

Conversor de linha alimentado por corrente, 304

Conversor de linha alimentado por tensão, 305

Conversor de células em série, 307

Conversor com tiristor no lado do motor, 307

Conversor com GTO no lado do motor, 308

Fonte chaveada, retificador e inversor, 310

Condicionador de energia unificado, 321

Termos relacionados, 323

Capítulo 7: Controle de Motor Industrial, 327

Controle de fase, 327

Controle PWM de motores trifásicos, 333

Acionamentos em corrente contínua, 333

Acionamentos em corrente alternada, 336

Circuito de controle PWM, 337

Inversor de frequência, 338

Capítulo 8: Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica, 343

Baterias recarregáveis, 345

Hidrogênio, 388

Célula combustível a hidrogênio, 392

Supercapacitor, 396

Armazenador eletromecânico de energia, 399

Sistema de armazenamento por bobina magnética, 403

Sistema de armazenamento por ar comprimido, 404

Capítulo 9: Ruído em Sinais Analógicos, 407

Tipos de sinal e sistemas de medição, 408

Fonte aterrada (referenciada ao terra), 408

Fonte não aterrada (flutuante), 409

Sistema de medição não referenciado ao terra (diferencial), 410

Sistema de medição referenciado ao terra, 411

Medição de fonte de sinal aterrada, 413

Medição de fonte de sinal não aterrada (flutuante), 414

Ruído de acoplamento em conexões, 416

Sistemas balanceados, 422

Cabeamento para sistemas de medição, 423

Solução de problemas causados por ruído em sistemas de medição, 424

Técnicas de processamento de sinal para redução do ruído, 425

Capítulo 10: Ruído em Sinais Digitais, 427

Características de circuitos digitais, 430

Interferência eletromagnética em circuitos digitais, 435

Redução de ruído em medição, 439

Recomendações básicas na instrumentação e controle, 445

Interferência eletromagnética em redes PLC, 447

Capítulo 11: Conceitos e Procedimentos, 457

Proteção contra descargas atmosféricas em equipamentos de telecomunicações, 457

Optoeletrônica, 462

Fibra óptica, 466

Tópicos sobre sistemas de realimentação e controle, 472

Sistemas de tempo real, 477

Ensaio de compatibilidade eletromagnética, 480

Tópicos sobre filtros de frequência, 487

Potência disponível em função da temperatura, altitude e ambiente, 502

Correção do fator de potência, 507

Apêndice: Pesquisa e Reparação de Defeitos, 513

Referências, 525

2

Distúrbios na Energia Elétrica

Introdução

O distúrbio de energia produz resultados indesejáveis para o sistema conectado como carga. Também chamado de problema de energia, que é um conjunto de distúrbios, ele aparece no sistema devido a fatores externos e internos. Os fatores externos são os produzidos pelos subsistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição.

A maioria dos problemas que surgem nos sistemas elétricos é causada pela excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final. A principal causa deste fenômeno deve-se à crescente utilização de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede elétrica. Quase todos os equipamentos eletrônicos, com alimentação monofásica ou trifásica, incorporam um circuito retificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo CC-CC ou CC-CA. Um dos tipos de retificadores mais utilizados em equipamentos de baixa potência é o monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente de entrada altamente distorcida. O elevado conteúdo harmônico da corrente distorce a tensão na saída devido à queda de tensão nas impedâncias do sistema de alimentação.

Classificação dos distúrbios:

- Transitórios, dos tipos impulsivos ou oscilatórios;
- Variações de tensão de curta duração, que podem ser instantâneas, momentâneas ou temporárias;
- Variações de tensão de longa duração, que podem ser de três tipos: interrupções, subtensões ou sobretensões sustentadas;
- Desequilíbrios de tensão, causados por má distribuição de cargas monofásicas, e que fazem surgir no circuito tensões de sequência negativa;
- Distorções da forma de onda, que podem ser classificadas em cinco tipos: nível CC, harmônicas, inter-harmônicas, “notching”, e ruídos;
- Oscilações de tensão, variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento (entre 0,95 e 1,05 pu), e que podem ser aleatórias, repetitivas ou esporádicas;
- Variações da frequência do sistema, desvios no valor fundamental (50 ou 60 Hz).

Os distúrbios elétricos são eventos que podem ser medidos ou registrados por instrumentos utilizados para monitorar sistemas elétricos. Esses instrumentos são, geralmente, voltímetros de precisão que podem medir magnitudes e polaridades de voltagens instantâneas.

Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. E diante deste potencial de prejuízos, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnica e economicamente viável para solucionar o problema.

O transiente é o distúrbio que dura menos de um ciclo. Os transientes são de natureza impulsiva ou oscilatória. Um transiente impulsivo é normalmente um impulso elevado, aleatório. A descarga atmosférica é a causa mais comum de transientes impulsivos.

Um transiente oscilatório oscila na frequência natural do sistema e normalmente acontece em um ciclo. Esses transientes (também chamados de transientes de chaveamento) ocorrem quando uma carga indutiva ou capaci-

tiva é retirada do circuito (por exemplo, motor e banco de capacitores para correção de fator de potência). Um transiente oscilatório ocorre porque a carga remanescente ao circuito rejeita a alteração. Isso é similar ao que acontece quando é bloqueado repentinamente o fluxo de água num conduto (fenômeno conhecido como golpe de aríete): a repentina mudança no fluxo da água provoca uma rejeição de carga.

A tabela a seguir mostra as categorias de transiente e características típicas da forma de onda.

Categorias de transiente	Componente espectral	Duração
Impulsiva		
Milissegundo (baixa frequência)	0,1 ms aumento	> 1 ms
Microsegundo (média frequência)	1 μ s aumento	50 ns a 1 μ s
Nanosegundo (alta frequência)	5 ns aumento	< 50 ns
Oscilatória		
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 ms a 50 ms
Média frequência	5 kHz a 500 kHz	5 μ s a 20 μ s
Alta frequência	0,5 MHz a 5 MHz	5 μ s

O transiente impulsivo é caracterizado pelo tempo de subida e duração, enquanto a frequência e duração caracterizam o transiente oscilatório. Ambos os tipos de transiente são subdivididos em três categorias relacionadas à frequência. Os transientes de baixa frequência são os tipos mais comuns em sistemas de energia. Os transientes de média frequência não são muito comuns, mas contém amplitudes muito altas de energia. Os distúrbios de alta frequência geralmente acontecem próximos à fonte do distúrbio e são difíceis de medir.

Os distúrbios são classificados em categorias: alta frequência, tensão, distorção e variação da frequência fundamental. Na categoria de alta frequência, os eventos podem ser classificados em modo normal e modo comum.

Normas e entidades:

- EN50160: é uma nova norma que cobre flicker, harmônicas, desvios, variações de tensão, e muito mais;

- IEC 60364-6: norma para ensaio de instalações elétricas de baixa tensão, como, por exemplo, alterações relativas aos requisitos para a resistência de isolamento e à comprovação da queda de tensão;
- IEC 61000-4-15: norma de medição de flicker que inclui especificações para medidores;
- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicas;
- IEEE 519 (1992): prática recomendada pela IEEE, utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. Descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária;
- IEEE 1159 (1995): prática recomendada pela IEEE para monitoração e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia;
- CBEMA: Computer and Business Equipment Manufacturers Association. A CBEMA virou ITI em 1994. A curva CBEMA define os níveis de suportabilidade de equipamentos, em função da magnitude da tensão e da duração do distúrbio. Distúrbios que caíam fora da curva podem causar danos aos equipamentos;
- ITI: Information Technology Industry Council. Grupo trabalha para defender os interesses da indústria de informática.

Principais fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos conforme classificação do IEC

Fenômenos conduzidos de baixa frequência:

- Harmônicas, inter-harmônicas;
- Ruídos do sistema elétrico;
- Flutuações de tensão (flicker);
- Afundamentos e interrupções de tensão;
- Desbalanceamento de tensão;
- Variações na frequência;

- Tensões induzidas de baixa frequência;
- Corrente contínua em redes de corrente alternada (DC offset).

Fenômenos radiados de baixa frequência:

- Campos magnéticos;
- Campos elétricos.

Fenômenos conduzidos de alta frequência:

- Tensão ou corrente de ondas contínuas conduzidas;
- Transientes unidirecionais;
- Transientes oscilatórios.

Fenômenos radiados de alta frequência:

- Campos magnéticos;
- Campos elétricos;
- Campos eletromagnéticos;
- Ondas contínuas;
- Transientes.

Fenômenos de descarga eletrostática (ESD)

Pulsos eletromagnéticos nucleares (NEMP)

Distúrbios de alta frequência

Refere-se a tensões que têm componentes de frequência superiores à frequência fundamental de 60 Hz. A frequência efetiva de um evento pode variar na faixa de centena de hertz até milhões de hertz.

Principais características:

- Picos no nível de tensão;
- Conteúdo de energia (área compreendida pelo sinal);

- A razão de mudança da tensão com o tempo: tempo de subida dv/dt ;
- Ângulo de fase (local da ocorrência na senóide);
- Frequência da ocorrência.

Quanto mais alta é a frequência, maior é o potencial de efeito sobre os equipamentos eletrônicos no sistema. Impulsos de alta tensão e baixo conteúdo de energia não são muito danosos aos equipamentos, mas provocam operação errática, perdas de memória e travamentos.

Fontes típicas de distúrbios em alta frequência:

- Raios;
- Arcos pela terra;
- Chaveamento de cargas;
- Operação de relés e contator;
- Chaveamento de capacitores para correção de fator de potência.

Os eventos podem compreender magnitudes de uma fração da tensão da linha até milhões de volts.

Impulso unidirecional

Impulsos são transientes de alta frequência de tensão ou corrente com polaridade unidirecional.

Na figura 2.1, o impulso ocorre no pico da meia onda positiva.

O pico efetivo de tensão é o nível de 170 V mais o impulso de 125 V, correspondendo a 295 V.

A área sob a curva do impulso é grande, o que indica um conteúdo substancial de energia. O pico de tensão combinado com o nível de energia pode danificar componentes do sistema e atuar dispositivos de proteção.

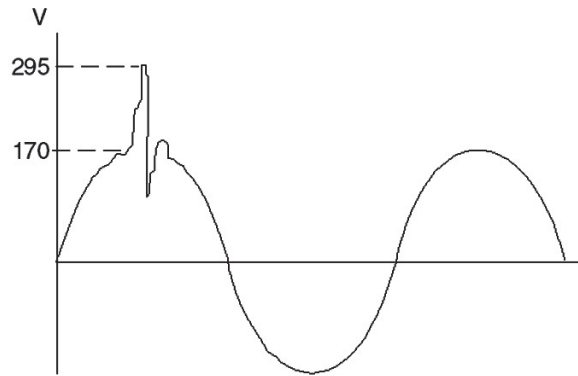


Figura 2.1

Na figura 2.2 o impulso ocorre no pico da meia onda negativa na direção positiva. Nesta situação, é pouco provável que ocorram danos aos equipamentos do sistema. É possível que diodos sejam polarizados reversamente ou que dispositivos de proteção atuem.

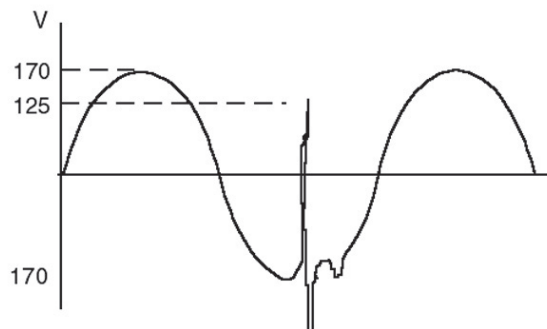


Figura 2.2

As soluções para os dois exemplos anteriores devem ser diferentes. No primeiro caso, ocorrência no pico da meia onda com a mesma polaridade, uma solução com boa relação custo-eficiência é a utilização de supressores. Filtros, na faixa dv/dt do impulso, são eficazes se a ocorrência for em qualquer ponto da onda. No segundo caso, os filtros são uma boa opção.

Eventos de modo normal e comum

Os eventos de alta frequência podem ocorrer de duas formas em redes elétricas. O distúrbio de modo comum ocorre nos condutores de fase e neutro simultaneamente enquanto o distúrbio de modo normal (também chamado de modo diferencial) ocorre entre os condutores de fases.

De maneira geral, os equipamentos são mais sensíveis aos eventos de modo comum, principalmente os que resultam em fluxo no condutor de aterramento.

Alguns fabricantes de condicionador de energia indicam o seguinte teste para verificar a ocorrência do ruído de modo comum: medir com um multímetro digital a tensão entre o neutro e terra da linha alimentadora de um computador; havendo um nível de sinal, por exemplo, 2,3 V, argumentam que é um ruído de modo comum suficiente para alterar sinais de dados do computador, normalmente com níveis de 5 V, e que isto seria corrigido com o condicionador de energia.

A verdade é que um pequeno sinal de tensão entre neutro e terra deve ser considerado normal. Sinais com valores superiores a 1% da tensão nominal de alimentação indicam problemas no sistema de aterramento.

O condicionador de energia providencia proteção de modo normal (linha para neutro) e não proteção de modo comum (neutro para terra). No caso do ruído de modo comum, este dispositivo somente mascara o problema porque ele possui um transformador com o neutro do secundário ligado ao terra da entrada de alimentação. Deste modo, mesmo com falta de aterramento o condicionador “informa” que está tudo bem.

O que pode ser considerado realmente um problema para fontes de alimentação eletrônicas são as correntes de terra, causadas por diferença de potencial.

Ruído (interferência eletromagnética)

O ruído (interferência eletromagnética) corresponde ao ruído eletromagnético de alta frequência, que pode, por exemplo, ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores eletrônicos de potência.

São divididos por duas categorias:

- Ruído de modo comum – ocorre entre neutro e terra;
- Ruído de modo normal – ocorre entre fases.

Causas:

- Chaveamento de equipamentos de potência;
- Indução de sinais de frequência;
- Dispositivos a arco;
- Aterramento mal feito ou impróprio.

Soluções:

- Uso de filtros;
- Separação física da fonte geradora e prejudicada;
- Aterramento correto e equalização de potenciais.

Impulso oscilatório

O transiente oscilatório é uma alteração súbita na condição estacionária de um sinal de tensão, corrente, ou ambos, nos limites positivo e negativo do sinal, oscilando na frequência natural do sistema. Tipicamente, o transiente oscilatório decai a zero dentro do ciclo.

Esses transientes são provocados pelo desligamento de cargas indutivas ou capacitivas, tais como motor ou banco de capacitores. O transiente oscilatório acontece porque a carga resiste à alteração. As figuras 2.3 e 2.4 mostram um transiente oscilatório típico provocado pela energização de um banco de capacitores.

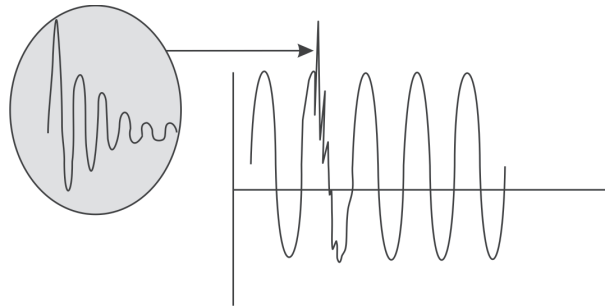


Figura 2.3

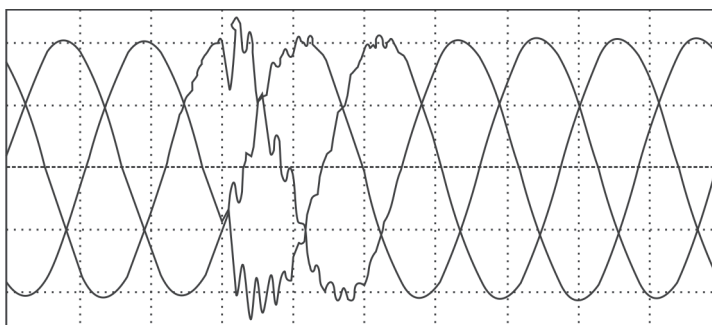


Figura 2.4

Os impulsos oscilatórios possuem polaridade positiva e negativa. O evento mais comum na causa de impulsos oscilatórios é o chaveamento de capacitores para correção do fator de potência.

O evento oscilatório possui dois problemas. O primeiro é o impulso principal com o tempo de subida e amplitude associados. O segundo é a frequência secundária de conformação da onda.

A frequência equivalente do impulso inicial é superior a 50 kHz enquanto a frequência secundária de conformação da onda varia de 400 Hz a 4 kHz.

Alguns filtros e condicionadores de energia têm dificuldades em filtrar o sinal de baixa frequência e, se ocorrer que essa frequência sintonize com a frequência de joelho do filtro, o sinal pode ser amplificado. Felizmente, as indutâncias inseridas normalmente nas linhas de distribuição são filtros otimizados naturais para este tipo de evento.

Evento repetitivo

O evento repetitivo refere-se a uma série de eventos que ocorrem em intervalos regulares (sincronizados). Ele pode ser unidirecional, oscilatório ou uma combinação dos dois, podendo ocorrer num único ciclo ou em múltiplos ciclos.

O exemplo mais comum de evento repetitivo é o impulso causado por SCRs no controle de carga por ângulo de fase. O evento em si não representa um problema mais grave do que qualquer outro de mesma magnitude. O

grande problema é a concentração dos eventos, que pode causar danos aos componentes dos filtros.

A natureza repetitiva também aumenta a possibilidade que um evento ocorra num período crítico de operação dos equipamentos tais como uma tarefa especial ou leitura de dados.

A figura 2.5 mostra um exemplo típico do evento repetitivo.

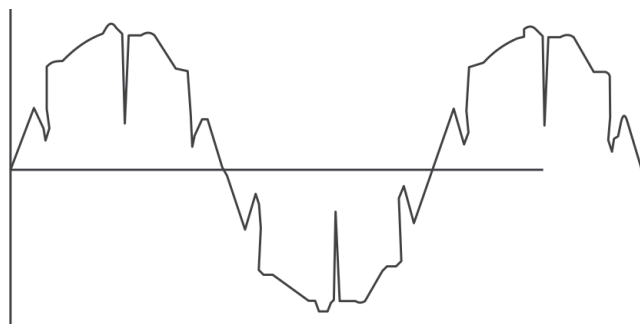


Figura 2.5

Eventos repetitivos podem influenciar medições analógicas de baixo nível, degradar a resolução de sistemas de imagem (raio X, scanners, etc.) e causar uma baixa relação sinal-ruído em equipamentos de comunicação.

Spikes de chaveamento

Os spikes de chaveamento, um tipo especial de EMI, são ruídos constituídos por pulsos repetitivos de amplo espectro de frequências que ocorrem na rede elétrica continuamente. São gerados por motores, aparelhos de ar condicionado, ventiladores de teto e praticamente todos os eletrodomésticos. Estes equipamentos injetam ruídos na rede elétrica de modo diferencial, com mais frequência, embora o façam também em modo comum. Os ruídos de modo diferencial são sinais espúrios que se apresentam entre a fase e o neutro, ou entre as duas fases. Ruídos de modo comum aparecem simultaneamente nas duas fases ou na fase e no neutro, com a mesma amplitude em relação ao terra.

Fontes chaveadas, reatores eletrônicos, corretores ativos de fator de potência, inversores para motores e uma série de outros dispositivos chaveadores costumam gerar ruídos de modo comum. A propagação destes ruídos se efetua por condução e um forte aliado para a atenuação dos mesmos são as indutâncias séries dos condutores nas instalações elétricas. Estas indutâncias criam uma alta impedância que dificulta a circulação de correntes interferentes.

Por serem compostos de um componente em alta frequência, os ruídos tendem a se propagar pela superfície dos condutores. Os fios rígidos utilizados nas instalações, por apresentarem pouca superfície de condução, favorecem também esta atenuação. Entretanto, os ruídos que não são atenuados e que penetram nos equipamentos, da mesma forma como ocorrem também com outros ruídos de EMI/RFI, acabam por produzir os efeitos de funcionamento errático dos equipamentos.

Isto é especialmente catastrófico em circuitos de controle de equipamentos como os controladores de voo, radares dos aeroportos, circuitos eletrônicos das aeronaves (daí a necessidade de desligar celulares, notebooks e similares em determinadas condições de voo), nos equipamentos de suporte à vida e em muitos outros equipamentos imprescindíveis para manter tecnologias atuais em funcionamento. Nas residências e escritórios comerciais, são responsáveis, entre outros problemas, pelo travamento dos computadores ou bugs de softwares. Em equipamentos de áudio e vídeo provocam chiados nos alto-falantes e interferências (chuviscos e ondulações) na tela de TV e monitores quando outro equipamento é ligado simultaneamente.

Descarga atmosférica

A descarga atmosférica ou raio representa a maior fonte de falhas e danos nos sistemas de eletricidade e de telecomunicações. Nos últimos anos, apesar da crescente aplicação de dispositivos de proteção para os equipamentos eletrônicos, a taxa de danos e falhas tem aumentado nos dois sistemas.

Isso é explicado pelo grau de desenvolvimento da tecnologia dos equipamentos eletrônicos, com preços muito acessíveis. As novas tecnologias incrementam circuitos com larga escala de integração (chips), popularizam o uso de microprocessadores isolados e conectados em rede.

O raio é simplesmente uma descarga de eletricidade estática. Eles ocorrem em nuvens de chuva, onde cargas estáticas são geradas em água e partículas de gelo e separadas por fortes correntes de ar. A carga estática sobre cada partícula individual é pequena, mas em grandes concentrações de nuvens a carga torna-se elevada. Uma tempestade pode gerar correntes de alta intensidade e tensões superiores a 100 milhões de volts.

Embora a crença de que o raio ocorre quando o campo de força elétrico do ar entre a nuvem e a terra é excedido, produzindo uma fagulha da nuvem para a terra, este acontecimento é muito raro. A alta intensidade de campo necessária para iniciar a descarga elétrica quase nunca ocorre no exterior das nuvens.

As partículas dentro de uma nuvem (chamadas hidrometeoros) estão sempre crescendo e interagindo e, através de colisões, é possível que elas adquiram carga elétrica. As partículas pequenas tendem a carregar positivamente, enquanto as partículas maiores carregam negativamente.

Sob a influência das correntes de ar e da gravidade, essas partículas tendem a ficar separadas conforme a carga: as carregadas negativamente ficam situadas na parte superior da nuvem e as carregadas positivamente ficam na parte inferior. A separação de cargas positivas e negativas produz um grande potencial elétrico (na ordem de milhão de volts) no interior da nuvem e entre a nuvem e a terra. Eventualmente, a resistência pode ser rompida e a descarga elétrica tem início.

Novas tecnologias, utilizadas em programas de pesquisa da NASA e universidades da Flórida e Novo México, confirmam que a descarga elétrica inicia no centro da nuvem e, após o início, propaga-se em direção ao campo de carga mais intenso, produzindo diversas ramificações.

A propagação ocorre em uma série de etapas pausadas, com a descarga avançando uma centena de metros em cada etapa. Muitas descargas ocorrem no interior da nuvem ou entre nuvens. Uma pequena fração das descargas, em torno de 15%, sai da área de nuvens (altura média de 4000 metros) e propaga-se em direção a terra.

O ponto de contato entre a descarga e o solo é aleatório e só pode ser determinado nos últimos metros do percurso. Quando a descarga elétrica encontra-se a alguns metros da superfície da terra, seu potencial elétrico pro-

duz campos elevados na superfície. Esses campos produzem muitas descargas, propagando-se do solo (principalmente objetos sobre ele) em direção à descarga elétrica descendente.

Uma das descargas, chamada de guia de conexão ou líder, encontra então a descarga descendente. Após o encontro das descargas descendente e ascendente, o potencial elétrico concentrado é descarregado para a terra. O resultado é um pulso de corrente com alta intensidade e curta duração sobre o solo ou objeto. Esse pulso, chamado surto de retorno, inicia na terra e propaga-se na direção da nuvem.

O surto de retorno é capaz de transportar correntes com intensidade de 10 kA a 500 kA fluindo em tempos menores que 1 ms. Durante esse tempo um caminho para a corrente é estabelecido entre a nuvem e a terra, produzindo várias descargas e surtos de retorno (média de 3, mas já foram registrados 25 surtos).

Quando um raio incide diretamente sobre uma instalação, o caminho principal acontece pela cobertura, atingindo a estrutura metálica de fundação, fiações condutoras, equipamentos elétricos e eletrônicos. A incidência sobre linhas de eletricidade, telefone e dados situadas nas proximidades também pode causar danos severos por impulsos de corrente. Além disso, o raio age como um poderoso transmissor de rádio, particularmente na fase do surto de retorno, e pode induzir tensões extremamente altas em condutores elétricos.

O raio é composto pelo relâmpago (flash de luz) e o trovão (som). O trovão é causado pelo aquecimento brusco do ar existente no caminho percorrido pelo raio. A temperatura nesta região pode atingir 20.000°C (três vezes a temperatura na superfície do sol).

O relâmpago e o trovão ocorrem simultaneamente, mas a velocidade de propagação da luz é quase um milhão de vezes superior à velocidade de propagação do som (340 m/s) e, então, vemos o relâmpago antes de escutarmos o trovão.

A estimativa da distância do local de incidência de um raio é feita multiplicando-se por 340 o número de segundos decorridos entre a visão do relâmpago e a audição do trovão.

Tipos de descarga atmosférica:

- Raio nuvem-terra: é o tipo mais perigoso e o que causa mais danos. Embora não seja o mais comum é o mais fácil de ser compreendido. Muitas descargas são originadas no centro de carga menos negativo e se propagam conduzindo cargas negativas em direção ao aterramento. Contudo, uma parcela das descargas conduz cargas positivas que ocorrem geralmente durante o período de dissipação das tempestades;
- Raio intranuvem: é o tipo mais comum e ocorre entre centros de cargas com polaridades opostas dentro da nuvem. O processo tem início no interior e é difundido para o exterior da nuvem, podendo extravasar seus limites e tornar-se um raio do tipo nuvem-terra;
- Raio entre nuvens: ocorre entre centros de carga de nuvens diferentes, produzindo uma descarga entre elas.

A tensão induzida em linhas por descargas atmosféricas

Um dos efeitos mais relevantes das descargas atmosféricas consiste nas tensões induzidas pela corrente que flui pelo canal ionizado constituído entre nuvem e solo durante o estabelecimento da descarga. Apesar da maior severidade do efeito da incidência direta de descargas, a probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas próximas é muito superior.

Desta forma, a indução de tensões em linhas ou em corpos condutores longos estendidos na superfície terrestre devido à incidência em região próxima à linha é muito mais frequente. Isso explica porque esse efeito é tão importante para sistemas de baixa e média tensão.

As tensões induzidas constituem a mais importante fonte de distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos de média e baixa tensão. As sobretensões associadas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos das linhas de distribuição de energia elétrica e pelos danos causados em redes elétricas e eletrônicas de nível de tensão reduzido, como as de telecomunicações.

Por outro lado, as sobretensões induzidas por descargas próximas das redes de distribuição e de telecomunicações se disseminam no sistema, ao propagar-se ao longo dos seus condutores. Tais redes podem atuar como consumidoras alimentadas, sendo capaz de ali causar danos. A disseminação

nas unidades consumidoras de equipamentos digitais (naturalmente dotados de baixo nível de isolamento) torna essas cargas extremamente susceptíveis a danos por surtos atmosféricos, introduzidos no ambiente do consumidor através de linhas de comunicação e de alimentação de energia.

A complexidade do fenômeno da tensão induzida e a influência neste dos parâmetros de descarga, notoriamente de natureza aleatória, determinam dificuldades consideráveis no estudo dos aspectos relativos à intensidade e forma do fenômeno e, por conseguinte, na definição das práticas e procedimentos de proteção contra o mesmo.

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas

Na prática, a principal atuação realizada para reduzir a probabilidade de ruptura de isolamento na linha motivada pela incidência direta de descarga atmosférica no cabo de blindagem (minimização de desligamentos da linha) consiste na melhoria do aterramento das torres. Busca-se alcançar valores reduzidos de impedância de aterramento. A qualidade da atuação é aferida pelo valor da resistência de aterramento medida, após os melhoramentos.

Valores de resistência da ordem de $10\ \Omega$ são recomendáveis, sendo o limite aceitável da ordem de $30\ \Omega$. Quando tais limites não são alcançados, normalmente em função da alta resistividade de solos locais, estando a linha em região de elevado índice de incidência de descargas, é usual a instalação de dispositivos para-raios. Tais dispositivos apresentam um comportamento não linear de sua resistência em função da tensão aplicada.

Para os níveis de tensão de trabalho da linha, o dispositivo, conectado entre a estrutura aterrada e a fase, apresenta um valor muito elevado de impedância, não permitindo o fluxo de corrente entre a terra e a fase energizada. Quando uma sobretensão elevada (como aquelas geradas por descargas atmosféricas) é aplicada, a impedância do dispositivo reduz-se drasticamente e ele permite o fluxo de corrente de descarga para a terra. Num curto intervalo após o fluxo, há a redução da sobretensão e o dispositivo recupera sua capacidade de isolamento, não mais permitindo o fluxo da corrente de baixa frequência da linha para a terra. Tais dispositivos são efetivos na redução de desligamentos da linha, mas apresentam custos relativamente elevados de instalação e requerem cuidados de manutenção.

Efeito da tensão induzida no circuito de média tensão

Quando a rede de média tensão é submetida a uma onda de sobretensão induzida, dependendo de sua amplitude, a solicitação sobre os isolamentos da rede pode gerar um arco de contornamento dos isoladores (*flashover*), como no caso da incidência direta em linhas. Porém, para este tipo de ocorrência, a corrente impulsiva que percorre o arco é muito menor. A tensão induzida gerada na rede tem a natureza de uma fonte de tensão, de nível usual bem inferior a 300 kV. A impedância de surto típica de redes de distribuição aéreas pode variar entre 200 e 400 Ω , dependendo da configuração da rede. Como a onda de corrente resultante é determinada ao se dividir a onda de tensão pela impedância de surto da linha, tem-se expectativa de amplitudes de corrente inferiores a 1 kA.

Mesmo com esse valor reduzido da corrente no arco elétrico de contornamento do isolador, a tensão de operação da rede pode ser capaz de sustentá-lo, o que resulta no fluxo de corrente de baixa frequência pelo arco, configurando um curto-circuito. Na sequência deve ocorrer o desligamento da rede, promovido pela atuação da proteção do sistema.

Mais preocupante do que os desligamentos são os danos em equipamentos da rede, como religadores e transformadores, cujo nível de isolamento se restringe à faixa de 95 kV. Em temporadas de chuvas, é frequente a ocorrência de danos em transformadores de distribuição. Para evitar tais danos, esses transformadores são protegidos no primário por dispositivos para-raios, instalados nos terminais do transformador, entre fase e neutro. Quando submetidos a surtos de tensão, tais dispositivos são capazes de grampear o nível de tensão em valores residuais (de 25 a 40 kV) inferiores à suportabilidade do equipamento, enquanto há fluxo da corrente impulsiva.

Nas condições de tensão durante a operação normal do sistema, o dispositivo apresenta alta impedância, atuando praticamente como uma chave aberta (a corrente é da ordem de 10^{-5} A). Na ocorrência de um surto de tensão, quando o valor da tensão aplicada aos terminais do dispositivo ultrapassa determinados limiares, o dispositivo mostra um comportamento não linear, apresentando drástica redução de sua resistência e consequente aumento brusco da corrente que o percorre. Para oscilação dessa tensão entre 20 kV e 40 kV, a corrente varia aproximadamente entre 1 mA e 10 kA.

Transferência de surtos da rede primária para a rede de baixa tensão através do transformador de distribuição

Embora o primário do transformador esteja protegido pelos dispositivos para-raios ali instalados, a elevação de potencial em seu aterramento pode ser transmitida para as unidades consumidoras através do circuito de baixa tensão, determinando esforços e, eventualmente, danos nas instalações e equipamentos do consumidor. Este efeito pode ocorrer tanto para correntes associadas à tensão induzida, quanto para aquelas associadas à incidência direta na rede de média tensão. O primeiro caso é muito mais frequente e representa menor severidade quanto à amplitude máxima das solicitações no consumidor.

Há dois aspectos relevantes a avaliar com relação ao surto que chega à instalação consumidora. Primeiramente, a injeção da corrente no aterramento do consumidor promove a elevação do potencial do condutor neutro e da fase. Isto pode configurar condições de risco quando o consumidor se expõe ao contato com o condutor neutro em posições distantes do seu aterramento (potencial de toque). Embora a maior parte da corrente de surto flua pelo condutor neutro, uma parcela desta corrente flui para o aterramento através dos condutores das fases, percorrendo as cargas do consumidor que conectam as fases ao neutro aterrado. Desta forma, este surto de corrente pode causar sobretensão na carga, muitas vezes capaz de danificá-la. É comum a ocorrência de danos nas instalações consumidoras em decorrência deste tipo de solicitação.

Muitos fatores estão envolvidos na definição do nível das sobretensões resultantes no consumidor. Pode-se obter a diminuição dos riscos para a carga do consumidor especificamente para este tipo de solicitação através das seguintes práticas:

- Redução da resistência de aterramento do transformador de distribuição – consegue-se diminuir a elevação do potencial nesse aterramento e reduzir o surto de corrente transferido para o aterramento do consumidor distante;
- Redução da relação entre as resistências de aterramento do transformador e do consumidor. Para um valor fixo da resistência de aterramento do transformador, quanto maior for a resistência de aterramento do

consumidor, menor será a corrente transferida para seu aterramento e o surto de tensão correspondente;

- Instalação de dispositivo de proteção na instalação consumidora, o mais próximo possível de sua carga – dispositivos supressores de surto conectados entre fase e neutro são capazes de proteger os equipamentos a cujos terminais estão ligados, embora não influenciem praticamente no nível de elevação do potencial alcançado pelo neutro em decorrência do fluxo de corrente pelo aterramento do consumidor.

Termos relacionados ao fenômeno descarga atmosférica

Canal principal do raio - caminho do ar ionizado onde flui a corrente de descarga. É iluminado durante a ocorrência da descarga.

Conexão guia do raio - movimento de condução descendente que se propaga da nuvem em direção ao solo. Divide-se em vários ramos e aquele que alcança primeiro o movimento ascendente proveniente de um objeto sobre o solo torna-se o caminho para o surto de retorno. Também é chamado de descarga líder. A palavra original em inglês, *stepped leader*, significa que seu movimento de propagação ocorre em passos, movendo-se através do ar em curtas erupções. Ele é sempre iluminado, mas não é visível porque o processo ocorre em velocidade superior à perceptível pelo olho humano. Câmaras especiais são utilizadas para fotografá-lo. A conexão guia pode iniciar no solo e propagar-se em direção à nuvem.

Fogo de St. Elmo's (em descarga atmosférica) - nome dado a um brilho com coloração entre azul e verde, que surge em torno de objetos (tais como aviões e mastros de navios) durante tempestades. É uma forma de descarga corona causada por potencial elétrico elevado.

Fulgurite - formação translúcida instável causada pela incidência de um raio sobre solo arenoso. A descarga aquece o solo fundindo partículas em torno do canal e resultando num tubo com forma do raio incidente. Fulgurite artificial pode ser desenvolvida em laboratório. A palavra fulgurite vem da palavra grega *fulgur*, que significa raio.

Gradiente de tensão (no raio) - tensão que surge radialmente através da terra, no ponto de incidência do raio. O gradiente de tensão pode eletrocutar pessoas ou animais nas proximidades. O termo gradiente significa que a tensão na terra diminui em função da distância do ponto de incidência do raio.

Guia da descarga atmosférica - canal de ar ionizado que pode mover-se em etapas (passos) e ramificações ou continuamente num único caminho.

Íon - partícula que pode transportar carga positiva ou negativa.

Ionização - processo que torna o ar condutivo, provocado por uma grande diferença de carga entre duas regiões de cargas opostas. No raio, é o iniciador do processo da descarga. Os elétrons na região carregada negativamente são atraídos em direção à região carregada positivamente, iniciando um movimento que forma um canal condutivo. O canal ionizado é um caminho de condução para a descarga.

Onda de choque (no raio) - rápida expansão do ar causada pelo aquecimento elevado e abrupto do ar em um canal de descarga. A onda de choque move-se com grande velocidade, diminuindo até chegar à velocidade do som, quando é produzido o trovão. A onda de choque pode causar danos a pessoas e equipamentos quando ocorre nas proximidades.

Raio tipo bigorna - também chamado “dardo do azul”, ocorre em céus aparentemente sem nuvens. Uma descarga do tipo nuvem – terra proveniente de uma nuvem em grande altura, cuja massa já passou pelo local de incidência. É um tipo de raio muito perigoso porque engana as pessoas (pensam que a tempestade está longe).

Raio tipo esfera - fenômeno raro, ainda não comprovado cientificamente, descrito como uma esfera iluminada flutuante que ocorre durante tempestades. Ela pode mover-se rapidamente ou lentamente, ou mesmo permanecer estacionária. A mesma ambiguidade ocorre em relação ao som produzido e ao tempo de duração.

Ramificação do raio - partes iluminadas do guia de conexão (*stepped leader*) que não constituem o canal principal. São visíveis somente durante o surto de retorno e, algumas vezes, são mais iluminadas do que o canal principal.

Surto de retorno (no raio) - fluxo de corrente (descarga) através do canal ionizado. O surto de retorno é brilhante e origina o trovão (som da descarga atmosférica). Geralmente ocorre mais de um surto de retorno no mesmo canal.

Descarga eletrostática (ESD)

Quando há uma diferença no potencial eletrostático entre dois objetos carregados, ocorre um fluxo de energia eletrostática para que seus potenciais fiquem equilibrados. Esse fluxo de energia é chamado de descarga eletrostática.

A eletricidade estática é um fenômeno natural no qual cargas elétricas estacionárias, produzidas pela fricção ou separação de materiais distintos, se acumulam em materiais condutores não aterrados ou em superfícies não condutivas.

A eletricidade estática produz pequenas correntes e altas tensões. O período de duração da descarga é curto, na ordem de hs a ms. Quando ocorre a descarga eletrostática, geralmente abaixo de 200 V, pode haver falha em semicondutores eletrônicos sensíveis, tais como circuitos integrados.

O nível de descarga eletrostática que sensibiliza o ser humano é, normalmente, acima de 3000 V. Contudo, a maioria dos semicondutores pode ser danificada por descarga com tensão inferior a essa. A sensibilidade de alguns componentes é inferior ao valor de pico de 3000 V, com duração em torno de 2 ms.

O armazenamento e o manuseio de placas de equipamentos eletrônicos sensíveis devem obedecer a alguns requisitos básicos, para manter sua segurança e a integridade, tais como:

- Dispor de proteção das placas através de invólucros condutivos;
- Limitar os movimentos das pessoas, quando manusearem um componente eletrônico;
- Não tocar o circuito impresso fora do seu invólucro, a não ser pelas bordas;
- Fazer o contato da embalagem de proteção eletrostática, contendo o dispositivo, com qualquer parte metálica, não pintada, do equipamento, durante um tempo mínimo de três segundos, ao adicionar um opcional em equipamentos eletrônicos sensíveis;

- Remover o equipamento sensível da embalagem no momento da instalação. Se não for possível, deixar sobre a embalagem de proteção estática;
- Evitar depositar sobre equipamento eletrônico sensível, ou outra superfície metálica, qualquer dispositivo opcional;
- Fazer o armazenamento dos componentes eletrônicos em estantes metálicas aterradas;
- Manusear os componentes eletrônicos utilizando pulseiras antiestáticas;
- Utilizar *shunts* condutivos nos terminais das placas (pente conector), impedindo que diferenças de potenciais sejam conduzidas para seus componentes;
- Vestir roupas antiestáticas para o manuseio dos componentes eletrônicos. A vestimenta eficiente de trabalho é o guarda-pó, confeccionado em algodão. Não utilizar tecidos de poliéster puro, que é um material de grande capacidade de geração de cargas eletrostáticas;
- Utilizar sopradores especiais de ar ionizado, que são muito utilizados em bancadas de manutenção de equipamentos eletrônicos sensíveis e têm a função de dissipar as cargas estáticas dos materiais não condutivos;
- Usar pulseiras de aterramento para que os técnicos não acumulem cargas estáticas, originadas da sua própria movimentação no ambiente. São providas de um resistor com valores entre 0,3 e 1 M Ω , a fim de proteger o referido técnico de contatos acidentais com partes vivas da bancada;
- Dispor de ambientes de trabalho com piso de material considerado de dissipação estática, cuja resistividade característica seja superior a 10⁵ Ω m e inferior a 10⁹ Ω m. Sapatos, cadeiras e mesas devem ser confeccionados com materiais do tipo condutivo, a fim de se estabelecer condutividade entre a pessoa e o piso.

A melhor superfície para as oficinas de manutenção é a que oferece com dissipação estática. Esse tipo de superfície não permite grandes variações de potencial eletrostático.

Resistividades médias de alguns materiais utilizados em pisos:

- Granito = $10^4 \Omega\text{m}$;
- Argila = $5 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$;
- Cerâmica = $10^9 \Omega\text{m}$;
- Borracha = $10^4 \Omega\text{m}$.

Corrente contínua em redes de corrente alternada (DC *offset*)

A presença de tensão ou corrente CC em sistemas de energia CA é chamada de DC *offset*. Isto pode ocorrer como resultado de um distúrbio geomagnético ou assimetria de conversores eletrônicos.

Uma das consequências do fenômeno é a saturação de transformadores em operação normal, produzindo aquecimento excessivo e a diminuição da sua vida útil. O DC *offset* também pode causar a erosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e conectores.

Harmônicas

A eletricidade gerada no subsistema de geração possui a forma de onda senoidal. Cargas tradicionais, como lâmpadas incandescentes conectadas a uma fonte de tensão senoidal, drenam correntes também na forma senoidal. Quando a forma de onda da corrente espelha a forma da tensão aplicada (ambas senoidais), não há presença de harmônicas. Em resumo, uma forma de onda senoidal pura não contém harmônicas.

Quando as correntes harmônicas atingem uma magnitude suficiente, ocorre a interação com o subsistema de distribuição elétrica e com outras cargas na vizinhança. A simples presença de harmônicas numa instalação não representa um problema. O problema é a sua interação com o sistema de distribuição, causando distorções e perdas na tensão.

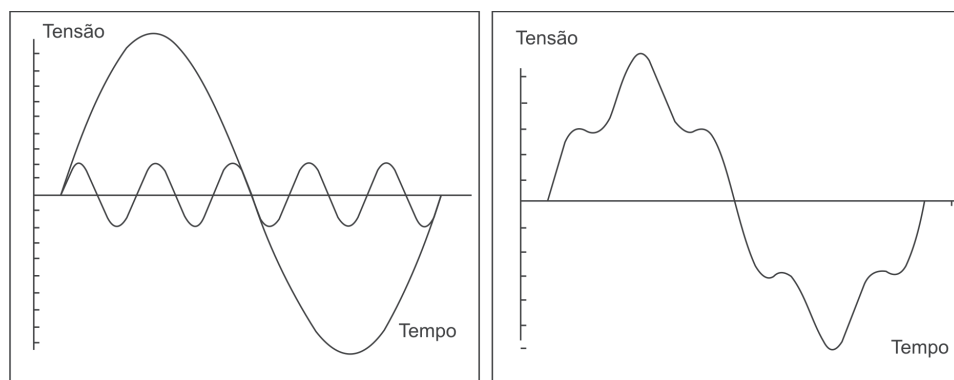


Figura 2.6 - Forma de onda típica do efeito de harmônicas

Quando a distorção de tensão atinge nível elevado, podem ocorrer diferentes tipos de problemas nos equipamentos eletrônicos. Se os picos de tensão são suprimidos, as fontes de tensão podem não acumular a energia suficiente para suprir sags momentâneos. Se os picos de tensão são amplificados, detectores de sobretensão podem atuar desligando a carga. Outros tipos de problemas: aquecimento e vibração excessivos em motores, aquecimento e ruídos excessivos em transformadores, erros de frequência, nível de tensão elevado entre neutro e terra e campos magnéticos significativos na vizinhança de transformadores e disjuntores.

A corrente solicitada por cargas de equipamentos eletrônicos, tais como computadores, não espelha a forma de onda da tensão original. Neste tipo de carga ocorre a presença de correntes não lineares, que são constituídas de harmônicas de ordem ímpar em relação à fundamental. Nos pontos onde a fundamental e suas harmônicas coincidem (por exemplo: no caso de harmônicas de 3ª e 5ª ordem coincidem em 90 e 270 graus), suas amplitudes são adicionadas por formas de onda pulsadas.

Harmônicas são integrais múltiplas da frequência de origem, e formas de onda não lineares são constituídas de componentes de alta frequência. Para a onda senoidal de 60 Hz, as harmônicas de ordem ímpar são a terceira (180 Hz), a quinta (300 Hz), a sétima (420 Hz) e assim por diante.

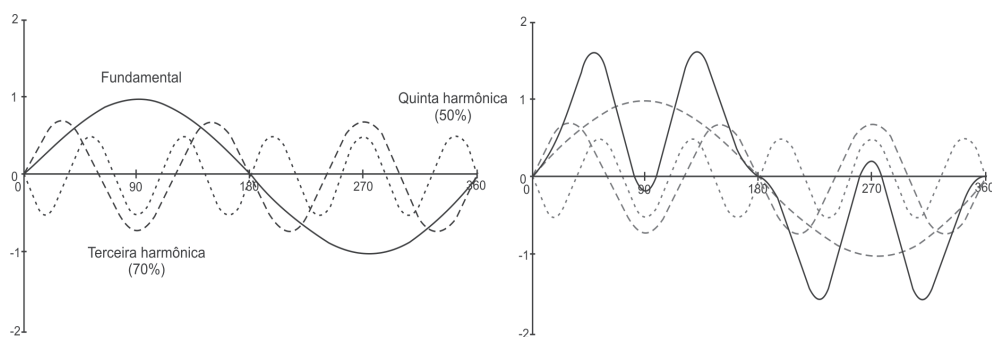


Figura: Fundamental com harmônicas e forma de onda resultante

Fontes de correntes harmônicas incluem o computador, equipamento de vídeo, UPS (*no-break*), forno de micro-ondas, sistema de controle baseado em SCR, atuador de velocidade variável e operação de elevador. Na área médica há os equipamentos de raio X, tomografia e ressonância magnética, que introduzem dificuldades para regular a tensão e estabilizar a corrente da energia elétrica.

Quase todos os equipamentos eletrônicos são fontes de correntes harmônicas. Quando as correntes harmônicas atingem uma magnitude suficiente, ocorre a interação com o subsistema de distribuição elétrica e com outras cargas na vizinhança.

A simples presença de harmônicas numa instalação não representa um problema. O problema é a sua interação com o sistema de distribuição, causando distorções e perdas na tensão.

Quando a distorção de tensão alcança nível elevado, podem ocorrer diferentes tipos de problemas nos equipamentos eletrônicos. Se os picos de tensão são suprimidos, as fontes de tensão podem não acumular a energia suficiente para suprir sags momentâneos. Se os picos de tensão são amplificados, detetores de sobretensão podem atuar desligando a carga.

Outros tipos de problemas: aquecimento e vibração excessivos em motores, aquecimento e ruídos excessivos em transformadores, erros de frequência, nível de tensão elevado entre neutro e terra e campos magnéticos significativos na vizinhança de transformadores e disjuntores.

A Distorção Harmônica Total (DHT) é a medida em graus que uma forma de onda pode se afastar em relação à forma puramente senoidal.

Quando a distorção de tensão aumenta, a DHT para a forma de onda da corrente decresce. Isto ocorre porque a distorção de tensão força o aumento no tempo do fluxo de corrente.

Um aumento de 2 ms para 4 ms no período torna a forma de onda mais senoidal e a distorção harmônica decresce.

Na ocorrência de harmônicas, normalmente as de ordem ímpar prevalecem sobre as de ordem par. Contudo, as harmônicas de ordem par têm um impacto muito grande em instalações elétricas porque criam resquícios de tensão CC em dispositivos, tais como motores e transformadores.

A norma IEEE 519 (controle de harmônicas em sistemas elétricos) especifica o limite de 25% para harmônicas de ordem par e proíbe o uso de conversores meia-onda para evitar condições de aparecimento na tensão CC.

Nas cargas conectadas em estrela, um tipo particular de harmônica deve ter atenção especial. Os múltiplos das harmônicas de terceira ordem são aditivos e retornam em grande quantidade pelo neutro.

Como a magnitude da corrente de retorno resultante pode alcançar 1,73 vezes a magnitude da corrente de fase, a corrente de retorno excede a capacidade da fiação e dos conectores.

A corrente de neutro também interage com a impedância da fiação causando tensões elevadas entre neutro e terra.

Características da presença de harmônicas:

- Condutores de neutro muito quentes e com corrente elevada;
- Transformadores quentes e ruidosos;
- Motores com falhas frequentes e trabalhando com temperatura elevada;
- UPS (*no-break*) com falhas frequentes;
- Geradores de energia com baixo rendimento (50 a 60% da capacidade nominal);
- Baixo fator de potência na instalação;
- Relógios elétricos adiantando constantemente.

Consequências da presença de harmônicas:

- Capacitores: queima de fusíveis e redução da vida útil;
- Motores: redução da vida útil e impossibilidade de atingir potência máxima;
- Fusíveis/Disjuntores: operação falsa ou errônea e componentes danificados;
- Transformadores: aumento de perdas, causando redução de capacidade, e diminuição da vida útil;
- Medidores: possibilidade de medições errôneas e de maiores contas;
- Telefones: interferências;
- Máquinas síncronas: sobreaquecimento das sapatas polares provocado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- Acionamentos de fontes: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero, e falha na comutação de circuitos;
- Carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações que agregam muitos aparelhos eletrônicos e possuem malhas de terra mal projetadas;
- Banco de capacitores: podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas. Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas e, em casos extremos, falha completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto ficam submetidos a tensões perigosas. Mesmo sem uma condição de ressonância, um capacitor é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, e sempre estará sempre sujeito a sobrecarga e sobreaquecimento excessivo.

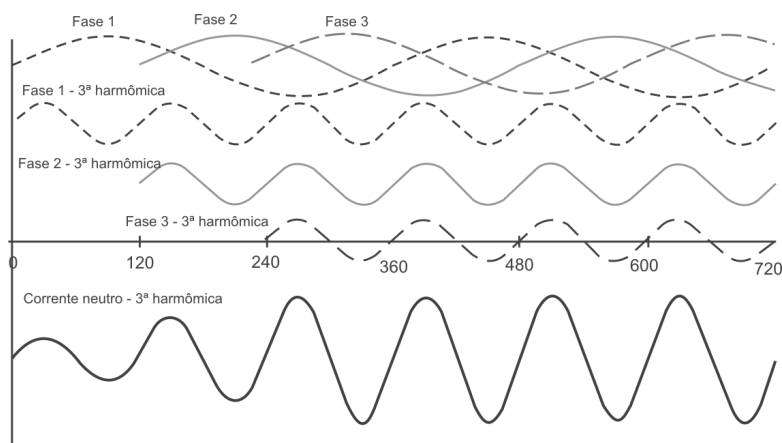


Figura: Harmônicas na corrente de neutro

Observações em relação à figura: no sistema trifásico estrela, a forma de onda da tensão de cada fase em relação ao neutro está deslocada de 120° . A configuração anula a corrente fundamental de neutro, mas não as harmônicas da fundamental. As correntes de fase, mostradas no topo, são introduzidas em intervalos de 120° . No condutor de neutro, 70% de corrente harmônica em cada fase resulta em 210% de corrente no neutro.

Soluções para problemas de harmônicas:

- Aplicar fontes de alimentação com controle interno de harmônicas e correção do fator de potência;
- Usar disposição balanceada das cargas fontes de harmônicas na instalação, de forma a obter corrente senoidal;
- Adicionar impedância (reatores de linha) e identificar fontes de correntes harmônicas para reduzir suas magnitudes;
- Acrescentar filtros passivos de harmônicas para controlar frequências harmônicas específicas;
- Adicionar filtros ativos de harmônicas para reduzir ou eliminar fator de potência e harmônicas;
- Utilizar transformadores projetados para tolerar os efeitos de harmônicas;

- Empregar transformadores que fazem a integração da mudança de fase nas harmônicas e controlam impedâncias de sequência zero;
- Aplicar os procedimentos do IEEE19 - requisitos e práticas recomendadas para o controle de harmônicas em sistemas elétricos.

Ações do sistema elétrico contra os distúrbios por harmônicas:

- Elevação da potência de curto-circuito – através da conexão em paralelo dos transformadores de subestações ou da elevação da tensão nominal do sistema. Essa solução é de custo elevado;
- Seccionamento da rede – criando redes isoladas para atender às áreas emissoras de harmônicas;
- Compensação harmônica centralizada – pela instalação de filtros de harmônicas no barramento de subestações que atendem os consumidores com emissão de harmônicas acima de determinados limites;
- Compensação harmônica distribuída – por meio da instalação de filtros de harmônicas nas cargas não lineares com frequência sintonizada, quando vários consumidores emitem harmônicas acima de determinados limites.

Causas do aparecimento das distorções harmônicas:

- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- Fornos a arco;
- Compensadores estáticos, tipo reator saturado, etc;
- Motores de corrente contínua controlados por retificadores;
- Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
- Processos de eletrólise através de retificadores não controlados;
- Motores síncronos controlados por ciclo conversores;
- Fornos de indução de alta frequência, etc;
- Fornos de indução controlados por reatores saturados;
- Cargas de aquecimento controladas por tiristores;

- Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Computadores;
- Eletrodomésticos com fontes chaveadas, etc.

As distorções que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental são denominadas de inter-harmônicas e são geralmente causadas por conversores de frequência. A distorção de tensão harmônica total procura quantificar o conteúdo harmônico total e é dado por:

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2}$$

Onde: $DTHT$ é em % e V_h é a tensão harmônica individual.

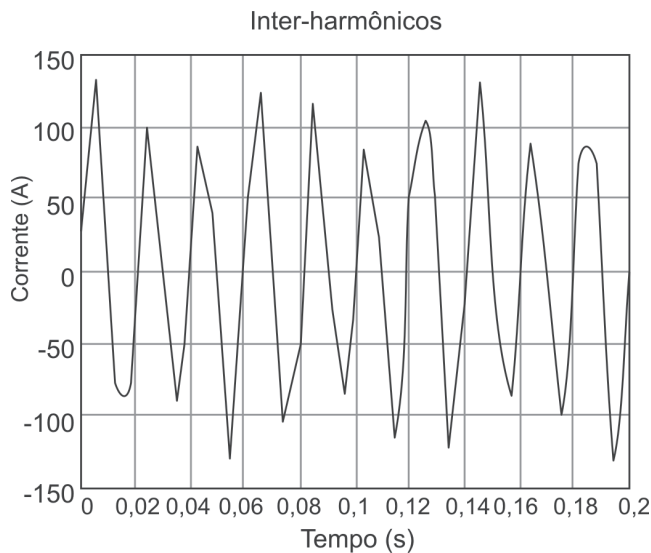


Figura 2.7 - Forma de onda com inter-harmônicas

No Brasil, os valores de referência da taxa de distorção harmônica total (DHT) para tensão são definidos pela Aneel, conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Limites para distorção harmônica total (DHT) no Brasil.

Tensão nominal (V_N)	DHT de tensão
$V_N < 1 \text{ kV}$	10%
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8%
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6%
$69 \text{ kV} < V_N \leq 139 \text{ kV}$	3%

Fonte: Aneel

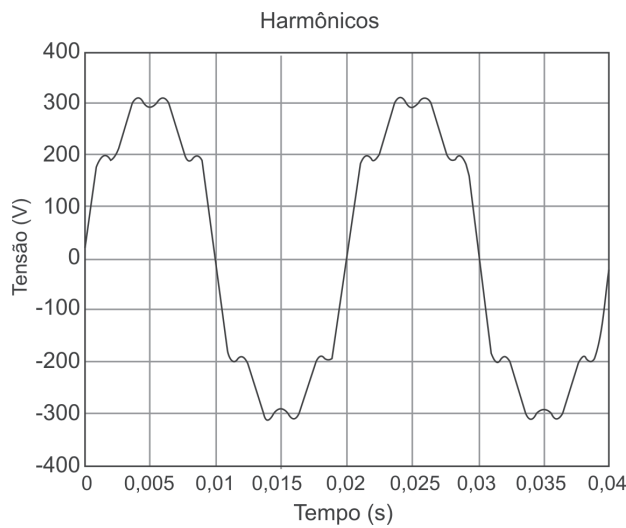


Figura 2.8 - Forma de onda com harmônicas

Fator de desclassificação (K)

As subestações de baixa tensão são especialmente sensíveis às harmônicas de corrente que provocam sobreaquecimentos e possíveis defeitos nos equipamentos. Historicamente, a potência nominal e o calor que um transformador dissipa em regime de plena carga são calculados com base na hipótese de que o sistema é composto por cargas lineares que, por definição, não

produzem harmônicas. Entretanto, se uma corrente que contenha harmônicas, circular pelo transformador, ele sofrerá um aquecimento adicional, que poderá levá-lo a uma avaria.

O fator K é um fator de desclassificação definido para os transformadores e indica quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando existirem harmônicas. A expressão aproximada mais usual para o fator K é dada por:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

Onde FC é fator de crista.

A máxima potência fornecida por um transformador é dada por:

$$S_{máx} = \frac{S_{nom}}{K}$$

Para a utilização dessa expressão deve-se determinar, por medição (no caso de instalações existentes) ou por cálculo (no caso de projetos), o valor de pico e a corrente eficaz em cada fase do secundário do transformador. Calcular as médias desses valores e entrar na expressão.

Por exemplo, se o fator K determinado para certo transformador de potência nominal 1 000 kVA é 1,2, então, a máxima potência que esse equipamento poderia fornecer sem que houvesse sobreaquecimento seria igual a $1\,000/1,2 = 833$ kVA.

A expressão para a determinação do valor de K é aproximada, uma vez que ela não considera todas as componentes harmônicas existentes na instalação. Entretanto, ela permite uma aproximação adequada para se determinar a máxima potência disponível por um transformador sujeito à influência da distorção na forma de onda de corrente.

Na prática, o procedimento para a determinação do fator K de um transformador. Considerando como exemplo um transformador de 750 kVA, fator de crista (FC) da onda de corrente igual a 2. Isso significa que o valor de pico do sinal é duas vezes maior que o seu valor eficaz.

$$K = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,414$$

Assim como a máxima potência que o transformador em questão poderia fornecer seria igual a:

$$S_{\max} = \frac{S_{\text{nom}}}{K} = \frac{750}{1,414} = 530 \text{ kVA}$$

Ou seja, o transformador foi desclassificado em cerca de 29% devido à presença das harmônicas na instalação.

Os instrumentos especializados em medição e análise de harmônicas facilitam a obtenção do fator K, evitando cálculos aproximados.

Sags (*dips*) e surges (*swells*)

Os eventos de tensão são variações na amplitude de tensão e ocorrem na faixa de frequência nominal das redes elétricas, 60 Hz.

Definições do IEEE 1159-1995 – práticas recomendadas na monitoração da qualidade de energia elétrica:

- Um sag (*dip*) é o decréscimo entre 0.1 e 0.9 por unidade da tensão nominal (pu) na tensão ou corrente *RMS*, frequência nominal, com tempo de duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto;
- Um surge (*swell*) é o aumento entre 1.1 pu e 1.8 pu na tensão ou corrente *RMS*, em frequência nominal, com tempo de duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

Adicionalmente, o documento classifica os tempos de duração em três categorias: instantâneo, momentâneo e temporário (conforme a tabela anterior – categorias dos distúrbios eletromagnéticos).

As normas ANSI C84.1-1989 (*Utility Power Profile*) e CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*) relacionam os parâmetros limites de amplitude e duração para a ocorrência real de danos em equipamentos eletrônicos.

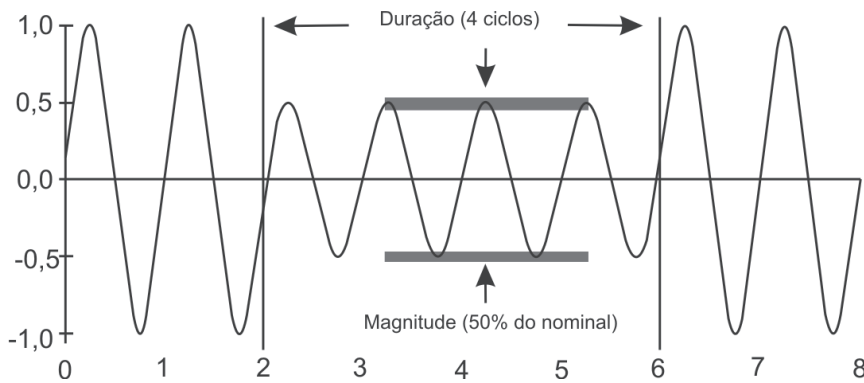
A menor amplitude de um *sag* ou o maior valor de um *swell* são relacionados a uma faixa de tempo em que o equipamento deve operar sem problemas.

Duração (ms)	Limites de amplitude
8 - 50	- 30% ; 20%
50 - 500	- 20% ; 15%
> 500	$\pm 5\%$ (residencial); $\pm 10\%$ (industrial)

A magnitude do sag é expressa como uma porcentagem do valor nominal. A expressão “um sag para 80% do nominal” em um sistema de 120 VRMS refere-se a uma redução para 96 VRMS. O sag é transitório (ocorrência momentânea) e apresenta excursão do sinal de tensão num período mais curto do que a sobretensão e a subtensão.

Sags são causados quando cargas pesadas, tais como motores, são conectadas na linha. Essas cargas drenam correntes de ligação (*inrush*) que afundam o sinal de tensão por curtos períodos. A recuperação do nível de tensão depende do tamanho do motor, sua inércia e impedância da fonte. Falhas no sistema elétrico também causam sags, que persistem até a normalização do sistema.

A redução no nível de tensão (afundamentos ou sags) é uma das principais causas de problemas em sistemas industriais. Esses eventos tipicamente ocorrem na linha de distribuição devido a tempestades, árvores e acidentes. Os afundamentos de tensão são descritos em termos de magnitude e duração. Quando o afundamento de tensão resulta no desligamento de equipamentos ou em falha na sua operação normal, ele é considerado de baixa compatibilidade.



Magnitude e duração do afundamento de tensão

O tempo médio de um afundamento de tensão é de 10 milissegundos a 1 segundo, dependendo das condições dos sistemas de transmissão e distribuição. Durante um afundamento de tensão, a energia disponível para a carga é reduzida e podem ocorrer problemas na operação de equipamentos se não forem tomadas medidas corretivas.

Soluções para minimizar os efeitos do afundamento de tensão:

- Condicionador de energia de grande porte, tais como compensador estático e sistema de armazenamento de energia em retaguarda. O custo dessas soluções é elevado;
- Condicionadores de energia de médio e pequeno porte, estrategicamente instalados para proteger processos simples ou equipamentos individuais;
- Equipamentos especialmente projetados para alta imunidade contra afundamentos de tensão.

O surge resulta da operação inversa causadora do sag: desconectar cargas pesadas da rede elétrica. Neste caso, o nível de tensão aumenta. O surge (também chamado de swell) é considerado o oposto do sag.

Sags e surges podem causar problemas em equipamentos eletrônicos. Alguns exemplos: reinicializações e desligamentos por atuação da proteção interna dos equipamentos.

Categorias dos distúrbios eletromagnéticos

Tabela 2.2

Categorias	Espectro (típico)	Duração (típica)	Magnitude de tensão
Transiente			
Impulsivo			
Nanossegundo	5 ns	< 50 ns	
Microsegundo	1 ms	50 ns - 1 ms	
Milissegundo	0.1 ms	> 1 ms	
Oscilatório			
Baixa frequência	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
Média frequência	5 - 500 kHz	20 ms	0 - 8 pu
Alta frequência	0.5 - 5 MHz	5 ms	0 - 4 pu
Variação de curta duração			
Instantânea			
Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Momentânea			
Interrupção		0.5 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
Sag		30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
Swell		30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
Temporária			
Interrupção		3 s - 1 min	< 0.1 pu
Sag		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu
Swell		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu
Variação de longa duração			
Interrupção sustentada		> 1 min	0.0 pu
Subtensão		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
Sobretensão		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
Desequilíbrio de tensão		estado estacionário	0.5 - 2%
Distorção na forma de onda			
DC Offset		estado estacionário	0 - 0.1%
Harmônicas		estado estacionário	0 - 20%
Interharmônicas	0 - 6 kHz	estado estacionário	0 - 2%

Subtensão e sobretensão

Subtensão é a diminuição na tensão CA RMS para menos de 90% do valor nominal com duração superior a 1 minuto. Sobretensão é o aumento na tensão CA RMS superior a 110% do valor nominal, com duração superior a 1 minuto.

As condições de subtensão são causadas por instalação mal dimensionada, taps incorretos de transformadores, reguladores de tensão desajustados ou sobrecarga não intencional na rede elétrica. A subtensão pode resultar em operação errática ou baixa performance dos equipamentos. Motores drenam mais corrente, operam com aquecimento excessivo e menos eficiência sob condições de subtensão.

A sobretensão resulta da baixa regulação no sistema elétrico, regulador desajustado ou por flutuação nas cargas demandadas. A sobretensão causa falha em equipamentos eletrônicos.

As flutuações de tensão CA em intervalos significativos são conhecidas como subtensões e sobretensões. Variações de curta duração são chamadas de sags e surges.

Desequilíbrios de tensão

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia seja prejudicada, e alguns consumidores sofram um desequilíbrio de tensão na alimentação das cargas.

Estes desequilíbrios podem apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais se destacam:

- Motores de Indução – para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que somados aos resultados da tensão de sequência positiva, resultam num conjugado pulsante no eixo da máquina e no sobreaquecimento da máquina. Como consequência direta dessa elevação de temperatura tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos;
- Máquinas síncronas – como no caso anterior, a corrente de sequência negativa, fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela sequência positiva. Consequentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma frequência igual a duas vezes à da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor;
- Retificadores – uma ponte retificadora CA/CC, controlada ou não, injeta na rede CA, quando essa opera, sob condições nominais, correntes harmônicas características (de ordem 5, 7, 11, 13, etc.). Entretanto, quando o sistema supridor encontra-se desequilibrado, os retificadores passam a gerar, além das correntes harmônicas características, a terceira harmônica e seus múltiplos. A presença da terceira harmônica e seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita a manifestação de ressonâncias não previstas, causando danos a uma série de equipamentos.

Interrupção momentânea de tensão

Interrupção momentânea ocorre, por exemplo, quando o sistema elétrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já tenha se extinguido).

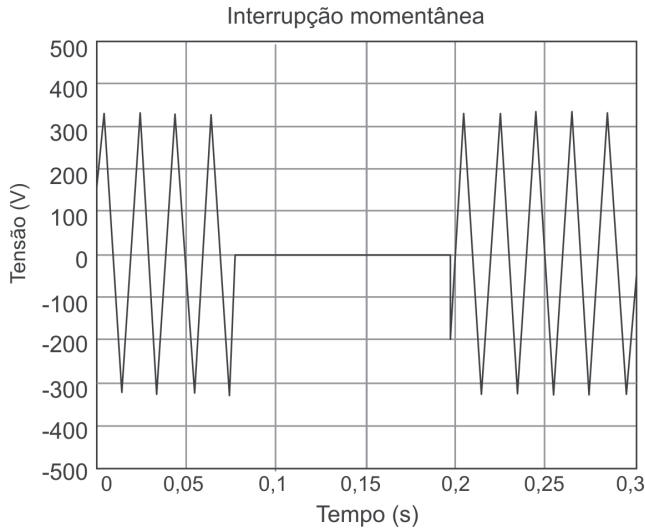


Figura 2.9 - Interrupção momentânea de tensão

Notching de tensão

Microcortes de tensão (*notches*) consistem em pequenos cortes periódicos na forma de onda da tensão, que resultam de quedas de tensão nas indutâncias do sistema elétrico, decorrentes de cargas que consomem correntes com variações bruscas periódicas (caso dos retificadores com filtro capacitivo ou indutivo).

Distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Este fenômeno pode ser detectado pelo conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os *notchings* são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.

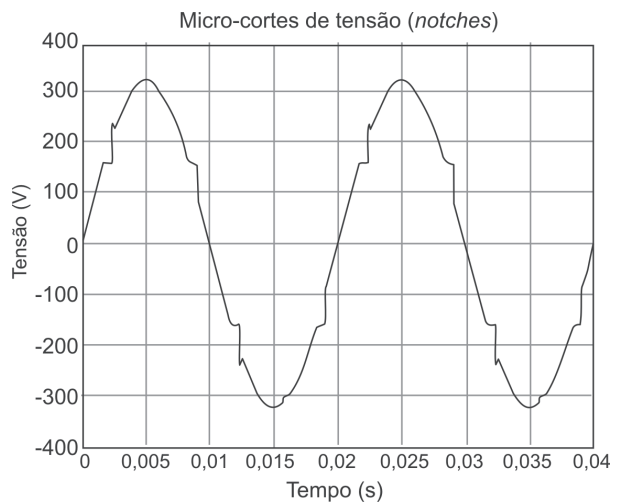


Figura 2.10 - *Notches* (microcortes de tensão)

Notching causado por conexão frouxa

A figura 2.10.1 mostra a forma de onda de *notching* causado por conexão frouxa. A figura 2.10.2 mostra a progressão do *notching* provocado pelo mesmo problema de conexão frouxa, após dois dias.

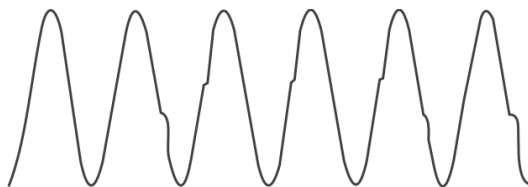


Figura 2.10.1 - Forma de onda de *notching* por conexão frouxa

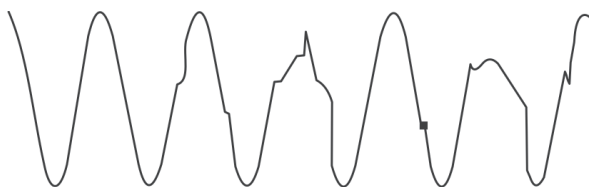


Figura 2.10.2 - Forma de onda da progressão do *notching* por conexão frouxa

Distorção na forma de onda

A distorção é causada por cargas não lineares, nas quais a corrente instantânea não varia linearmente em relação à tensão aplicada. As principais fontes são os dispositivos chaveados repetitivamente dentro de um ciclo, tal como diodos e SCRs.

A análise das ondas distorcidas revela a presença de harmônicas de alta ordem, principalmente harmônicas de ordem ímpar.

Distorções na forma de onda e suas harmônicas associadas causam uma série de problemas nos equipamentos e sistemas:

- Os equipamentos eletromagnéticos, tais como transformadores e motores, sofrem sobreaquecimento porque a alta frequência induz perdas;
- O conteúdo harmônico pode fazer o motor pulsar, danificando os rolamentos. Controles eletrônicos podem operar erroneamente;

- Os capacitores de fator de potência ficam sobreaquecidos e podem falhar, seus fusíveis de proteção podem atuar;
- O neutro compartilhado em sistemas trifásicos com cargas não lineares torna-se sobrecarregado se não estiver corretamente dimensionado.

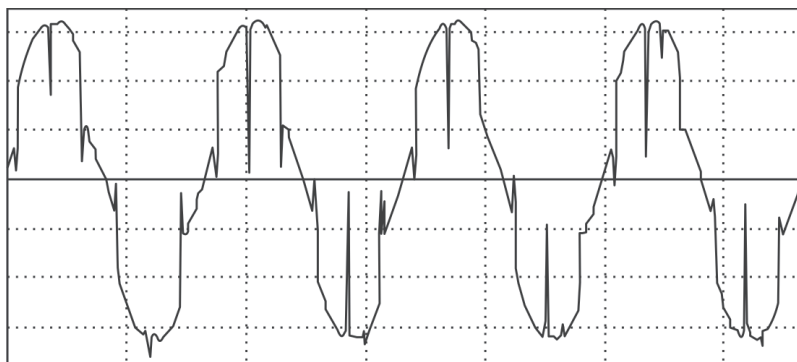


Figura 2.11 - Distorção na forma de onda

Cintilação (*flicker*)

Flutuações de tensão entre 0,5 e 25 Hz que causam variações visíveis a olho nu na iluminação. É a existência de pequenas e repetitivas quedas de tensão que são causadas por cargas elevadas que solicitam altas correntes por breves e repetidos períodos.

O fenômeno de cintilação luminosa, ou efeito *flicker* é basicamente constatado através da impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso de lâmpadas, principalmente as do tipo incandescentes. Entre as causas do fenômeno são citadas cargas com ciclo variável, cuja frequência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30 Hz. Nessa faixa de frequências, o olho humano é extremamente sensível às variações da emissão luminosa das lâmpadas, sendo que a máxima sensibilidade do olho fica em torno de 10 Hz.

A impedância da rede é constituída pelo conjunto cabo e transformador AT/BT, sendo esta tão menor quanto maior for a potência (kVA) do transformador. Nas redes de distribuição públicas, o *flicker* é mais comum nas redes rurais ou com baixa densidade de consumidores. O *flicker* tem um efeito fisiológico desagradável para as pessoas que trabalham em ambientes

com lâmpadas incandescentes, mas sem nenhum efeito sobre os aparelhos e circuitos eletrônicos. O *flicker* é causa de preocupação somente quando cargas pesadas são manobradas ou quando a impedância do circuito é alta.

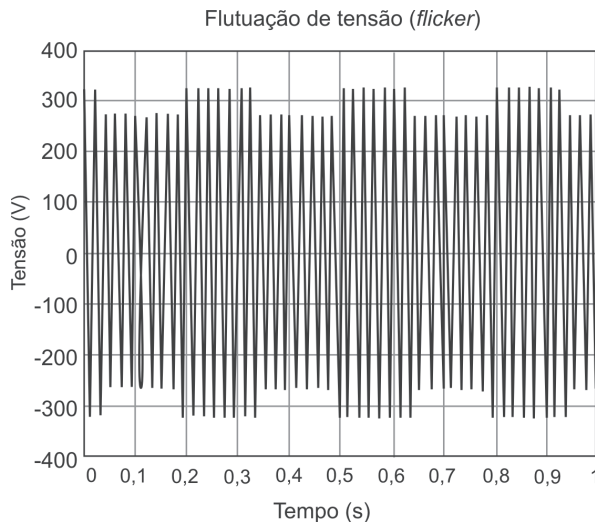


Figura 2.12 - Forma de onda com cintilação (*flicker*)

Nas instalações industriais submetidas a *flicker* é necessário modificar as instalações. As medidas mais efetivas incluem:

- Separar cabos de cargas pesadas, preferivelmente alimentando cada uma por um transformador individual AT/BT;
- Divisão das cargas;
- Aumentar tempos de atraso nos sistemas de controle automáticos;
- Redução da taxa de repetição do ciclo de trabalho;
- Distribuição racional das operações que requerem pulsos de demanda, com a instalação de um compensador estático de potência reativa. Tecnicamente uma redução da impedância da fonte é uma excelente solução.

Rede desbalanceada

A distribuição de energia através de um sistema bifásico com um fio de neutro foi concebida como uma maneira eficaz de conciliar a necessidade de

um valor de tensão doméstica seguro, com um cabeamento economicamente viável. Essa configuração pode ser gerada a partir dos altos valores da tensão de transmissão por um transformador abaixador com tap central aterrado, o neutro. As duas fases estão defasadas de 180 graus, fazendo com que a tensão entre elas seja o dobro das medidas entre qualquer uma delas e o neutro ($110/220 V_{CA}$).

Teoricamente, se duas cargas iguais forem colocadas entre cada uma das fases e o neutro, não haverá fluxo de corrente neste último. Na prática não é isto o que acontece. Qualquer desbalanceamento de carga nas fases provoca fluxo de corrente no neutro, tanto maior quanto for a magnitude do desbalanceamento. Uma vez que a impedância do neutro não seja zero, haverá uma tensão entre o neutro e o terra. E as cargas distribuídas pelas fases mudam dinamicamente fazendo com que essa tensão não seja estável, certamente contendo harmônicas e podendo, inclusive, possuir componente em corrente contínua. Por estar em um potencial diferente do zero, esse neutro está sujeito também ao acoplamento de ruídos provenientes de interferência eletromagnética e radiofrequência. Isto resulta num caótico ruído de modo diferencial na rede que irá alimentar os equipamentos.

Nos sistemas de alimentação bifásicos derivados da rede trifásica, as tensões das fases estão defasadas de 120 graus, fornecendo $127 V_{CA}$ entre qualquer uma das fases e o neutro ou $220 V_{CA}$ entre fases. Aqui sempre haverá corrente de neutro, mesmo que as cargas entre neutro e fases sejam iguais. De fato, neste caso, a corrente de neutro terá o mesmo módulo da corrente da fase, com defasagem de 240 graus. A impedância do neutro vai gerar uma tensão residual entre neutro e terra e apresentar os mesmos problemas descritos anteriormente.

A solução dos transformadores balanceadores de rede, na verdade, é muito parecida com a primeira descrição adotada para a distribuição de energia: um transformador isolador com relação de 1 para 1 e saídas em contrafase com tap central de referência. Isto significa que as fases de saída em relação à referência possuem metade da tensão de entrada tomada de um par fase-neutro da rede. A vantagem obtida aqui só aparece quando se alimentam cargas simétricas (impedâncias iguais entre os terminais de alimentação e o terminal terra), porque o ruído que está distribuído equitativamente entre os terminais de saída (ruído de modo comum) é zero na referência, que deve ser aterrada. Tal sistema equipotencial minimiza os problemas de corrente de fuga.

Perda de neutro

A maior parte das distribuidoras de energia disponibiliza ao usuário uma instalação secundária composta por duas fases 127 V_{CA} e o neutro, sendo o neutro aterrado. O consumidor, por sua vez, projeta o quadro de força e a instalação elétrica a partir desta disponibilidade, fazendo o balanceamento por meio de uma equitativa distribuição de cargas entre as fases, tentando equilibrar as perdas na fiação.

Entretanto, pode ocorrer, apesar de não ser frequente, uma interrupção da circulação de corrente pelo neutro em função de algum problema físico na instalação como rompimento de cabos, oxidação dos contatos na caixa de entrada, etc. Em muitas instalações residenciais, o eletricitista responsável inadvertidamente coloca um fusível de proteção no neutro. Esta é uma situação potencialmente perigosa, pois, ao invés de proteger, se o fusível romper, provocará também a perda do neutro. Com essa perda, a corrente de retorno, antes circulante pelo neutro, passa a circular entre as fases, provocando um completo desbalanceamento da tensão nominal.

Cargas pesadas, como máquinas de lavar roupa, geladeiras e freezers, passarão a operar com baixa tensão, podendo danificar os motores. Por outro lado, cargas leves, como CD players, videocassetes, telefones sem fio, periféricos dos computadores, passarão a operar com sobretensão, podendo igualmente danificar. Para evitar o problema, resta ao consumidor fazer uma revisão periódica da instalação elétrica, ou utilizar condicionadores de energia, principalmente nos equipamentos sensíveis que atuarão como “buffers” de proteção.

Brownout e blackout

O *brownout* é um termo usado para designar uma situação que ocorre na rede elétrica e que pode provocar danos a equipamentos. Pode ser definido como uma subtensão severa e prolongada, que ocorre normalmente quando falta uma das fases da rede. Esta situação provoca um forte desbalanceamento de tensão, sendo que a outra fase, na reabsorção de corrente, fica com um valor de tensão muito abaixo do nominal.

Esta anomalia ocorre frequentemente em tempestades, quando os vendavais podem romper os cabos do sistema de distribuição nas vias públicas

ou ainda pela abertura de fusíveis de proteção nos transformadores abaixadores. Mesmo que o consumidor conecte seus equipamentos mais sensíveis em condicionadores de energia, certamente, alguns eletrodomésticos como geladeiras e freezers estarão ligados diretamente nas tomadas da rede elétrica, podendo sofrer graves consequências. Desta forma, na ocorrência deste distúrbio, os disjuntores do quadro de força devem ser desligados até que a situação se normalize.

Se o *brownout* se caracteriza por energia fraca nas tomadas de força, o blackout é conhecido como ausência total da energia elétrica. No Brasil foi batizado pelo nome de “apagão”. Em sistemas essenciais, que não podem ter o funcionamento interrompido, a solução é a instalação de grupos geradores, cuja função é manter estes sistemas funcionando pelo tempo de duração do *blackout*, ou utilizar *nobreaks* com grandes bancos de baterias, que possibilitam também um tempo de autonomia suficiente para a execução de tarefas prioritárias.

Interferência eletromagnética – EMI

A interferência eletromagnética é um distúrbio de emissão provocado pelos circuitos internos dos equipamentos e também por eventos naturais que atingem a rede elétrica causando uma resposta indesejada, o mau funcionamento ou a degradação de performance de equipamentos. Por sua vez, a interferência por radiofrequência é uma energia elétrica contida dentro do espectro das transmissões de ondas de rádio. A RFI conduzida é mais facilmente encontrada nas frequências de kHz de até 30 MHz. A RFI por irradiação é encontrada na faixa de frequência dos 30 MHz de até 10 GHz.

Os chassis dos equipamentos, bem como seus cabos de força e interligação, captam com muita facilidade estes dois tipos de interferência. Esses ruídos apresentam amplo espectro de frequência e são difíceis de serem filtrados, principalmente se o sistema de aterramento não apresentar qualidade. Embora a maior parte dos equipamentos possua filtros internos para atenuar a presença destes ruídos, a conexão de um bom aterramento é indispensável para que estas correntes espúrias fluam adequadamente para o terra.

Os níveis de EMI/RFI são internacionalmente regulamentados por normas que definem e estabelecem o conceito de EMC (*Electro*

Magnetic Compatibility). Ou seja, a compatibilidade que um equipamento eletrônico deve apresentar entre os limites da sua capacidade de emissão de ruídos (*EMI/RFI Emissions*) e os limites da tolerância à captação deles, é chamada de imunidade ou suscetibilidade (*EMI/RFI immunity* ou *susceptibility*).

Um exemplo é a IEC 61000-2-2 que normatiza o uso da rede elétrica de baixa tensão para a transmissão de dados. Esta tecnologia é usada há algum tempo em baixa velocidade para monitoração e controle de equipamentos remotos pelas concessionárias, mas vem sendo testada para uso da internet em alta velocidade, podendo poluir ainda mais a rede de distribuição de energia.

A utilização maciça da eletrônica digital operando em altas frequências e grandes velocidades, em grande variedade de equipamentos, aumentou significativamente a sensibilidade em relação à interferência eletromagnética.

A interferência eletromagnética, EMI, é qualquer tipo de sinal indesejado, conduzido ou radiado, gerado propositalmente ou não, e capaz de interferir no correto funcionamento de um equipamento sensível.

A compatibilidade eletromagnética, EMC, é a busca de soluções para tornar compatível a operação de equipamentos ou instalações sensíveis, em um ambiente eletromagnético agressivo. O conceito de EMC declara que um equipamento não deve sofrer interferências nem interferir no correto funcionamento de outros equipamentos situados no mesmo ambiente. Isto significa possuir baixa suscetibilidade eletromagnética e baixo nível de emissão de ruídos.

A suscetibilidade eletromagnética mede a capacidade de um equipamento suportar emissões eletromagnéticas interferentes sem sofrer problemas de funcionamento. Em outras palavras, é a imunidade do equipamento contra a interferência eletromagnética.

Fontes de ruído e EMI:

- Industrial e comercial: fornos a arco e de indução, lâmpadas fluorescentes, impressoras laser e ar condicionado;
- Comunicações: estações de rádio e TV, radar, telefonia celular e transmissores de comando remoto;

- Sistemas de potência: contator, retificadores, chaveamentos e curto-circuitos;
- Causas naturais: descargas atmosféricas e tempestades magnéticas;
- Máquinas e ferramentas: aparelhos de solda, compressores, motores e sistemas de ignição;
- Eletrodomésticos: forno de micro-ondas, máquinas de lavar e secar, termostatos, controles de iluminação, compressores e motores.

Uma das etapas no processo para minimização da interferência eletromagnética é o bloqueio, a atenuação ou absorção da irradiação indesejada dentro do próprio circuito. Além da aplicação de técnicas especiais no projeto e confecção dos circuitos, existem três maneiras básicas de se obter este resultado:

- Por reflexão, com a utilização de transformadores, choques de modo comum e indutores de maneira geral;
- Por derivação à terra (*bypass*), por meio de capacitores cerâmicos;
- Por absorção, pela utilização de *beads* de ferrite no caminho do sinal.

A técnica de absorção com *beads* de ferrite é muito utilizada devido à simplicidade e ao baixo custo, possuindo larga aplicação em equipamentos digitais e analógicos. Adicionalmente, esta técnica permite a remoção da interferência diretamente nas trilhas do circuito impresso ao utilizar componentes eletrônicos com a tecnologia de integração em larga escala.

A maior dificuldade no uso dos *beads* de ferrite é a especificação da impedância, que deve ser calculada levando-se em conta a frequência de trabalho e a corrente de polarização presente no circuito. Como os fabricantes especificam os ferrites por suas impedâncias características a 100 MHz, é necessário consultar vários gráficos e tabelas diferentes ou conjuntos de soluções integradas fornecidas por desenvolvedores.

Regras básicas na especificação dos beads de ferrite:

- Considerar a eficiência dos componentes no projeto;
- Selecionar componentes casados com a impedância do caminho que

está conduzindo o ruído. Ruídos de modo comum tendem a se propagar por caminhos diferentes do percorrido pela corrente do circuito;

- Colocar os supressores o mais próximo possível da fonte de ruído que se deseja atenuar.

Variações na frequência do sistema elétrico

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60 Hz). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5$ Hz). Variações de frequência, que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente, podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, entretanto, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas, operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

Perturbações de alta frequência (AF) por indução

Em AF, convencionalmente acima de 1 MHz, os fenômenos de interferência tornam-se consideravelmente mais complicados. Os condutores de potência tornam-se antenas eficientes, e os campos eletromagnéticos ainda que fracos produzem interferência considerável, todos os cabos são afetados e alguns podem entrar em ressonância. Os fenômenos em AF são severos, frequentes, difíceis de analisar e são motivos para reconsiderar as práticas estabelecidas para instalação da fiação.

A indutância dos cabos é um problema mais importante em AF do que em BF. A indutância linear de uma estrutura condutora reta é de aproximadamente 1 mH/m. Além disso, uma interligação de um comprimento excedendo 1/30 de um comprimento de onda torna-se praticamente incapaz

de assegurar a equipotencialidade entre duas massas interligadas. Acima de $1/30$, um condutor torna-se uma efetiva antena radiante e deixa de comportar como condutor equipotencial.

A redução das perturbações em AF de modo comum em cabos de AF pode ser obtida por uma das três ações a seguir:

- Efeitos de atenuação – interligação fechada (em malha) por condutores de equipotencialização;
- Filtros entre os condutores e massas mecânicas de cada equipamento;
- Ferrites em cabos que apresentem problemas.

Como exemplo, uma excelente medida preventiva para limitar variações rápidas de tensão entre um circuito eletrônico e seu ambiente é conectar o terminal 0 V do filtro (referência de tensão) ao envoltório metálico, estando este ligado ou não à terra.

Pulsos (*spikes*) de AF

A faixa de frequências que apresenta as maiores dificuldades, tanto na radiação como na proteção contra a energia radiada, está na faixa de VHF – 30 a 300 MHz, também conhecida como banda métrica. A maioria dos arcos elétricos, faíscas, descargas eletrostáticas (como contatos secos, starters de lâmpadas fluorescentes, operação de disjuntores e outros dispositivos de manobra de sistemas de AT) geram pulsos que são conduzidos em modo comum e radiados. O espectro de radiação cobre a banda de VHF.

A amplitude dos pulsos de corrente pode atingir dezenas de ampères. Os circuitos digitais são particularmente sensíveis a esses pulsos. O método recomendável de se obter uma proteção satisfatória e a compatibilidade eletromagnética de uma instalação é respeitar a imunidade padronizada pela norma IEC 1000-4-4.

Perturbações sustentadas (longa duração)

Conversores de frequência, controladores de velocidade eletrônicos, pontes de Graetz e escovas de motores com comutadores também geram perturbações de AF e em modo comum. O valor de pico dessas perturbações

pode atingir e mesmo superar 1 A. Uma solução é instalar filtro na fonte de potência e/ou no equipamento perturbado. Outra solução é o uso de cabos de potência que tenham blindagem aterrada nas duas extremidades.

Para fontes de interferência pesada, é recomendado formar uma malha de interligações equipotenciais de todas as massas nas vizinhanças do equipamento perturbado, tais como dutos metálicos, bandejas metálicas, bandejas, etc.

A propagação irradiada é referida como de campos, ondas eletromagnéticas ou ondas Hertzianas. Elas possuem uma componente E – campo elétrico em V/m, e uma componente H – campo magnético em A/m. Esses campos radiados, quando encontram um condutor (que funciona como antena receptora) dão origem a pequenas fems e correntes no material condutor, em forma de uma perturbação conduzida. Para os cabos dos circuitos, essas perturbações são em modo comum. É possível proteger os equipamentos contra esses campos radiados por meio de uma gaiola de Faraday ou filtros passa-baixa.

Campos magnéticos de baixa frequência (BF)

Em BF só os campos magnéticos podem causar problema. No modo sustentado ou impulsivo (curto-circuito, descarga atmosférica, flash), o campo H é geralmente produzido junto ao equipamento afetado. A medição de intensidade do campo exige apenas uma sonda em anel (*loop*) e um osciloscópio. O campo magnético em BF não se propaga, mas se mantém nas proximidades da sua origem (por exemplo, transformador ou motor de indução) e sua intensidade decresce rapidamente com a distância D da fonte na razão de $1/D^3$.

Em grandes distâncias, o decréscimo é menor e se aproxima a $1/D^2$. Este último valor é usado quando se considera o campo em torno de barramentos e linhas aéreas. A intensidade do campo magnético de uma corrente retilínea com retorno a uma distância infinita (caso da descarga atmosférica) decresce de acordo com $1/D$. Os laços formados entre os condutores fase e correntes desviadas do condutor neutro (pelas ligações de equipotencialização) são normalmente grandes e as correntes podem ser elevadas.

A consequência mais comum de um campo magnético de BF é a distorção da imagem de um CRT (tubo de raios catódicos) com saltos e movimentos em ondas da imagem, além de alterações na cor. Equipamentos como o CRT não blindado, microscópio eletrônico, espectrômetro de massa ou cabeça de leitura magnética, toleram até 1 A/m em BF. Além disso, os laços de fuga formados entre conexões equipotenciais às massas são associados (naturalmente) com as correspondentes tensões.

A blindagem magnética de campo magnético de frequências inferiores a 10 kHz. A solução mais fácil é colocar o equipamento perturbado fora do alcance do campo perturbador. Usar uma blindagem com chapa grossa pode reduzir a intensidade do campo por um fator da ordem de 10.

Campos magnéticos de alta frequência (AF)

Os transmissores de rádio têm potência radiante variando desde mW até MW. Um meio efetivo de reduzir a intensidade do campo de um rádio transmissor recebido por ETIs (equipamentos da tecnologia da informação) é usar antenas tão afastadas quanto possível dos ETIs e localizadas a maior altura possível. Desde que o princípio não pode ser usado no caso de transmissores portáteis, seu uso deve ser restrito às áreas suficientemente afastadas dos ETIs para assegurar uma operação sem perturbações destes últimos.

Os equipamentos eletrônicos raramente são afetados por campos da ordem de 1 A/m. Entretanto, campos de intensidade superiores a 10 A/m geralmente não são tolerados. A faixa de frequências que ocorre as perturbações mais severas é a de VHF.

Uma corrente de modo comum, de AF, em um cabo, sempre produz onda radiada. A recíproca também é verdadeira: uma onda de AF atingindo um cabo produz nele uma corrente de modo comum. Os métodos de proteção contra campos de AF são os mesmos adotados contra as perturbações por condução nas mesmas frequências.

O efeito de antena de cabos conduzindo correntes de AF por acoplamento em modo comum constitui o principal problema de compatibilidade eletromagnética.

Pulso eletromagnético nuclear

O pulso eletromagnético nuclear é originário de fusão do átomo e conhecido como NEMP (do inglês, *Nuclear Electromagnetic Pulse*). Este pulso possui alta intensidade e o processo envolve transporte de elétron acoplado nêutron-gama, física de plasma, química do ar e eletromagnetismo. As principais realizações estão na modelagem teórica e simulação numérica da geração e propagação de campos NEMP através da atmosfera.

Qualquer evento nuclear produz grande número de nêutrons e raios gama. O nêutron é uma partícula elementar, não carregada, que tem massa quase igual à do próton e se encontra em todos os núcleos atômicos conhecidos, com exceção do núcleo de hidrogênio. Os raios gama interagem com as moléculas de ar para gerar elétrons Compton, que deixam para trás os íons positivos.

O Efeito Compton ou o Espalhamento de Compton é a diminuição de energia (aumento de comprimento de onda) de um fóton de raio-X ou de raio gama, quando ele interage com a matéria. Espalhamento Inverso de Compton também existe, onde o fóton ganha energia (diminuindo o comprimento de onda) pela interação com a matéria. O comprimento de onda aumentado no total é denominado variação de Compton. O espalhamento nuclear de Compton é a interação envolvendo apenas elétrons de um átomo. O efeito é importante porque demonstra que a luz não pode ser explicada meramente como um fenômeno ondulatório. A interação entre a alta energia dos fótons e elétrons resulta no elétron recebendo parte da energia (fazendo-o recuar), e um fóton contendo a energia restante sendo emitida numa direção diferente da original, sempre conservando o momento total do sistema. Se o fóton ainda possui energia suficiente, o processo pode ser repetido.

Esta separação parcial de carga produz um campo elétrico radial. Os elétrons depositam sua energia por ionização, produzindo plasma de alta em torno da fonte. Em evento nuclear de baixa altitude, a interface ar-terra causa a assimetria na distribuição de corrente, produzindo aumento da corrente e pulsos eletromagnéticos irradiados.

Pulsos eletromagnéticos de baixa intensidade podem causar interferências temporárias em sistemas eletrônicos enquanto pulsos mais inten-

sos podem corromper dados digitais e danificar equipamentos elétricos e eletrônicos.

Apesar de ser difícil eliminar a sobretensão induzida por um pulso eletromagnético, existem meios de reduzi-la através do fortalecimento do sistema de proteção:

- Blindagem reforçada (tipo gaiola de Faraday);
- Filtragem e proteção contra sobretensão para o fenômeno transportado por cabos de força, de dados ou por antenas.

Tempestade magnética ou geomagnética

As erupções na superfície solar geram ondas de choque que podem afetar o campo magnético da Terra. Fenômenos desse tipo normalmente se traduzem em luzes intensas no céu, como as auroras boreais.

O campo eletromagnético natural da Terra protege os seres vivos, mas as tempestades magnéticas podem introduzir ruídos e desvanecimento de sinal nas telecomunicações, interferir na órbita dos satélites artificiais ou induzir correntes elétricas na superfície terrestre, gerando sobrecargas nas redes e desligamentos.

As erupções são causadas por bolhas de gás que irrompem na superfície do Sol e se espalham pelo sistema solar. Esse tipo de evento pode lançar ao espaço até 100 bilhões de toneladas de partículas com carga elétrica, em velocidades que alcançam até 2 00 km/s. A frequência de erupções é maior no período de máxima solar, fenômeno que ocorre a cada 11 anos, quando o Sol atinge o pico de seu ciclo de atividade.

As tempestades geomagnéticas acontecem quando um grande fluxo de radiação emitida pelo Sol atinge o campo magnético e a atmosfera da Terra. Quando fortes rajadas de vento solar atingem a Terra, as ondas de radiação se chocam com a magnetosfera, alterando a intensidade e a direção do campo magnético terrestre. Em casos extremos pode causar quedas de energia elétrica, interferência no funcionamento dos satélites de comunicações e de instrumentos de navegação, com efeitos imprevisíveis sobre o clima.

As intensidades das tempestades geomagnéticas, desde fracas até muito fortes, podem causar diferentes danos elétricos, principalmente nas latitudes altas, onde se concentram seus efeitos. O fluxo magnético vindo do Sol pode provocar fortes ondas de descarga elétrica nos cabos de transmissão de força, causando: curtos-circuitos, queima de equipamentos, panes em sistemas elétricos e redes de distribuição de energia, prejudicando circuitos integrados, computadores de bordo, satélites, foguetes, etc. Em caso extremo, pode causar blecautes nos sistemas de transmissão e nos transformadores de energia elétrica. Em 1989, uma tempestade impediu o funcionamento de usinas nucleares nos EUA. Também pode haver indução de tensão ao longo de condutores no nível de aterramento, afetando linhas de dutos de gás e petróleo.

A radiação de uma tempestade geomagnética afeta os equipamentos eletrônicos dos satélites, prejudicando as comunicações. Os sistemas podem ter circuitos integrados danificados e isto pode alterar comandos de softwares nos computadores de bordo. Em uma tempestade geomagnética, as camadas superiores da atmosfera se aquecem e se expandem, e podem mudar a altura, retardar ou modificar a órbita dos satélites que podem ser danificados ou perdidos com o decaimento de suas órbitas. Esse foi um dos motivos da queda do laboratório de estudos norte-americano Skylab, em 1979. Os sistemas de comunicação, como TV a cabo e aparelhos celulares, que operaram por sinais de satélites, podem sofrer interferências. Nas tempestades geomagnéticas, a ionosfera se altera, devido às correntes e às partículas de energia, afetando negativamente as comunicações e rádio navegação. Algumas interferências pelas ondas geradas agem como ruído nas frequências e podem ser observadas nas telas de TV ou nas transmissões de rádio, degradam sinais utilizados pelo GPS e outros sistemas de navegação, que perdem o sinal e têm sua precisão comprometida.

Resumo dos distúrbios na energia elétrica

Tabela 2.3 - Resumo dos distúrbios na energia elétrica.

	Espectro	Duração Típica	Magnitude Típica
Variação instantânea de tensão			
Surtos	> 5 kHz	< 200 ms	---
Transitórios	< 5 kHz	< 0,5 ciclo	---
Oscilatórios	< 300 Hz	< 30 ciclos	---
Cortes (notch)	0 a 200 kHz	Estacionário	---
Variação momentânea de tensão			
Sag	---	0,5 ciclo a 1 min	0,1 a 0,9 pu
Swell	---	0,5 ciclo a 1 min	1,1 a 1,8 pu
Interrupção	---	0,5 ciclo a 1 min	< 0,1 pu
Variação sustentada de tensão			
Subtensão	---	≥ 1 min	0,1 a 0,9 pu
Sobretensão	---	≥ 1 min	> 1,1 pu
Interrupção	---	≥ 1 min	< 0,1 pu
Variação momentânea de frequência	---	Variável	Variável
Distorção harmônica total	---	Estacionário	0 a 20%
Flutuação de tensão	---	Intermitente	0,95 a 1,05 pu
Cintilação (flicker)	< 30 Hz	Estacionário	---
Desequilíbrio de tensão	---	---	---

Tabela 2.4 - Distúrbios: causas, efeitos e soluções.

Distúrbio	Descrição	Causas	Efeitos	Soluções
Interrupções	Interrupção total da alimentação elétrica.	Curto-circuito, descargas atmosféricas, e outros acidentes que exijam manobras precisas de fusíveis, disjuntores, etc.	Queda do sistema. Danificação de componentes. Perda de produção.	UPS Geradores de emergência (interrupções de longa duração).
Transientes	Distúrbio na curva senoidal, resultando em rápido e agudo aumento de tensão.	Descargas atmosféricas. Manobras da concessionária. Manobras de grandes cargas e bancos de capacitores.	Travamento, perda de memória e erros de processamento. Queima de placas eletrônicas, danificação de materiais de isolamento e de equipamentos.	Supressores de transientes. UPS com supressores de transientes. transformadores de isolamento.
Sag / Swell	Subtensões (sags) ou sobretensões (swells) curtas (meio ciclo até 3 segundos). Sags respondem por 87% de todos os distúrbios elétricos.	Queda/Partida de grandes equipamentos. Curto-circuito. Falha em equipamentos ou manobras da concessionária.	Perda de dados e erros de processamento. Desligamento de equipamentos. Oscilações em motores com redução de vida útil.	UPS. Reguladores de tensão.
Ruídos	Sinal indesejado de alta frequência que altera o padrão normal de tensão (onda senoidal).	Interferência de estações de rádio e TV. Operação de equipamentos eletrônicos.	Travamentos, perda de dados e erros de processamento. Recepções distorcidas (áudio e vídeo).	UPS. Transformadores de isolamento. Filtros de linha.
Harmônicos	Alteração do padrão normal de tensão (onda senoidal), causada por frequências múltiplas da fundamental (50/60Hz).	UPS, reatores eletrônicos, inversores de frequência, retificadores e outras cargas não-lineares.	Sobreaquecimento de cabos e equipamentos. Diminuição da performance de motores. Operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis.	Filtros de harmônicas. Reatores de linha. Melhorias na fiação e no aterramento. Transformadores de isolamento.
Variações de tensão de longa duração	Variações de tensão com duração acima de 1 minuto.	Equipamentos e fiação sobrecarregados. Utilização imprópria de transformadores. Fiação subdimensionada ou conexões mal feitas.	Desligamento de equipamentos. Sobreaquecimento de motores e lâmpadas. Redução de vida útil ou de eficiência dos equipamentos.	UPS. Verificar conexões e fiações elétricas. Transferência de equipamentos para outros circuitos.

Termos relacionados aos distúrbios na energia elétrica

Camada Física - camada do modelo OSI referente às características elétricas, mecânicas e os procedimentos de controle para dispositivos de interface que se conectam a um meio de transmissão.

Centelhamento (*flashover*) - ponto em que ocorre uma descarga elétrica ao redor de uma aresta por uma superfície. Pode resultar em trilhas carbonizadas e deterioração permanente.

Dropout - perda discreta de tensão. Um sag de tensão (parcial ou completo) por um curto período de tempo (milissegundos) constitui um *dropout*.

Especificação de corrente de surto - valor de pico de uma corrente senoidal monofásica de duração específica que um dispositivo pode tolerar, com a temperatura da junção também específica, no início do surto.

Flutuação de tensão - variações sistemáticas no envelope de tensão cuja magnitude não excede o valor de 0.9 a 1.1 pu.

Jitter - pequenas variações rápidas de uma forma de onda causadas por flutuações no ângulo de disparo ou tensão de alimentação.

Limite de perturbação - nível máximo admissível das perturbações eletromagnéticas medido em condições especificadas.

Modulação - técnica de transmissão em que a informação no formato em que está é inadequada ao meio de transmissão e, por isso, é adicionada a um sinal adequado a esse meio. O sinal adequado ao meio é chamado de portadora, e a adição da informação à portadora chama-se modulação.

Modulação de amplitude - modificação do nível de tensão ou amplitude de uma frequência de linha para transmitir informações digitais ou análogas.

Modulação de fase - modificação da fase de um sinal para transmitir informações digitais. Um dos três modos de modificar um sinal senoidal para fazê-lo carregar informações. A onda senoidal, ou “portadora”, tem a sua fase modificada de acordo com as informações a serem transmitidas.

Modulação de frequência - mudança de frequência de uma linha para transmitir informações digitais ou análogas.

Modulação por largura de pulsos - modulação senoidal que fornece variação dos períodos de condução e corte, dentro do ciclo, a fim de eliminar harmônicas de baixa ordem.

Nível de compatibilidade eletromagnética - nível máximo especificado de perturbações eletromagnéticas a que pode ser submetido um dispositivo, equipamento ou sistema que funciona em condições particulares. Na prática, o nível de compatibilidade eletromagnética não é um nível máximo absoluto, mas pode ser ultrapassado com pequena probabilidade.

Nível de imunidade - nível máximo de uma perturbação eletromagnética de forma dada que age sobre um dispositivo, equipamento ou sistema específico, pelo qual este se mantém capaz de funcionar com a qualidade desejada.

Nível de perturbação - valor de uma perturbação eletromagnética de forma dada, medida em condições especificadas.

Perturbação eletromagnética - fenômeno eletromagnético suscetível de criar problemas de funcionamento de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou de afetar desfavoravelmente a matéria viva ou inerte. Uma perturbação eletromagnética pode ser um ruído, um sinal não desejado ou uma modificação do próprio meio de propagação.

Portadora - sinal de comunicação formatado para transmissão adequada em um determinado meio e que tem a finalidade de transportar a informação desejada por esse meio.

Por unidade (pu) - porcentagem formada pela divisão entre o valor indicado pelo valor nominal. Por exemplo, um sag de 0.8 pu em um circuito de 480 V representa 384 V, e uma interrupção de 0.1 pu em 120 V representa 12 V.

Protocolo - conjunto formal de convenções que governam a formatação e a temporização relativa da troca de mensagens entre dois sistemas de comunicação.

Protocolo de comunicação - padrões de hardware e software que governam a transmissão entre duas estações.

Ruído - sinal elétrico não desejado com conteúdo espectral menor do que 200 kHz em sistemas de tensão ou corrente, ocorrendo em condutores de fase, neutro ou linhas de sinal.

Sensoreamento - técnicas de regulação que monitoram a corrente ou tensão de saída. Sensoreamento local refere-se aos terminais de saída. Sensoreamento remoto refere-se à realimentação de um circuito de carga para a fonte de alimentação.

Suscetibilidade eletromagnética - inaptidão de um dispositivo, um equipamento ou um sistema de funcionar sem degradação de qualidade na presença de uma perturbação eletromagnética.

Transiente - alteração súbita na tensão, de curta duração. Por exemplo, um pulso rápido causado pela operação de um comutador.

Transiente de tensão - pico de tensão provocado por um retardo de tempo no chaveamento de dois dispositivos ou por ruído na linha.

Transiente impulsivo - alteração súbita na condição de estado estacionário de uma tensão, corrente, ou ambos, com polaridade unidirecional.

Transiente oscilatório - alteração súbita na condição de estado estacionário de uma tensão, corrente, ou ambos, com valores de polaridade positiva e negativa.

4

Soluções para os Distúrbios de Energia

Introdução

Assim como existem vários tipos de distúrbios na energia elétrica, existem muitos tipos de dispositivos para correção desses distúrbios. Os dispositivos encontrados no mercado são aplicados aos principais problemas, e encontrar o casamento correto entre o dispositivo e o problema faz parte de um processo de análise e solução.

A tabela a seguir mostra a possibilidade dos diferentes tratamentos de correção para os distúrbios mais comuns.

Tabela 4.1

Interferência	Sag	Impulso	Distorção	Interrupção (outage)	Tensão neutro-terra	Distúrbio repetitivo	Sobre tensão
Equilibrar cargas		sim (3)			sim (3)	sim (3)	
Transformador		sim (4)			sim	sim (4)	
Regulador de tensão	sim (1)	sim (5)				sim (5)	sim (8)
Supressor de surto		sim (2)				sim (2)	
Filtro / supressor		sim (2)				sim (2)	
Condicionador	sim (2)	sim	sim (9)		sim	sim	sim(7)
Gerador / motor	sim (1)	sim	sim	sim	sim	sim	
UPS standby	sim	sim (2)		sim		sim (2)	sim (8)
UPS on-line	sim	sim	sim	sim	sim (6)	sim	sim

- (1) O sag (dip) pode exceder o limite do regulador de tensão.
- (2) O limite de supressão pode ser superior à capacidade da carga.
- (3) A instalação refeita da carga pode não solucionar porque depende de a fonte ser comum ou não.
- (4) O transformador pode não atenuar suficientemente a interferência.
- (5) O dispositivo pode não providenciar atenuação do impulso.
- (6) Limita as proteções para o modo comum e neutro-terra.
- (7) Alguns condicionadores de energia não oferecem regulação de tensão.
- (8) Alguns dispositivos não reagem apropriadamente à sobretensão.
- (9) O dispositivo pode recondicionar a onda senoidal.

Os dispositivos para correção de distúrbios devem gerenciar (controlar) a energia, e não criar ou eliminar energia. Algumas vezes, um impulso pode ser desviado de uma carga ou ser dissipado por uma resistência. A energia do impulso deve ser controlada de modo que não afete as cargas protegidas.

Se o dispositivo é projetado para fornecer energia continuamente para uma carga (UPS por exemplo), ele deve possuir capacidade suficiente de suprimento. O dispositivo deve ser compatível com a carga. Se o dispositivo interage com a carga, a condição resultante pode ser pior do que o problema original.

Blindagem eletromagnética

Blindagem eletromagnética é o método que proporciona a atenuação dos campos eletromagnéticos que incidem sobre uma instalação ou seus equipamentos. A blindagem é uma barreira metálica interposta entre a fonte emissora de ondas eletromagnéticas e o equipamento ou instalação que se quer imunizar contra as interferências que essas ondas possam causar.

O crescimento dos centros urbanos e a necessidade de ampliar o número de subestações elétricas e as linhas de transmissão (sistema de potência) com tensões cada vez mais elevadas, com o crescimento no número de equipamentos eletrônicos sensíveis, formaram um quadro muito favorável às interferências eletromagnéticas.

Nos sistemas de potência, os campos eletromagnéticos irradiados podem ter dois tipos de origem. A primeira refere-se à emissão de campos eletromagnéticos por elementos condutores do sistema de potências em operação, em regime permanente. No segundo caso, pode haver emissão de campos eletromagnéticos em regime de operação transitória, através de abertura de chaves e disjuntores.

Situações complexas ocorrem quando centros de informática ou de telecomunicação são instalados nas proximidades de subestações de potência. As interferências eletromagnéticas podem acarretar distúrbios severos nos equipamentos. Nesses casos, duas soluções podem ser implementadas. A primeira consiste na blindagem da subestação (no caso de ser abrigada), determinada por estudos de compatibilidade eletromagnética. A outra consiste na blindagem eletromagnética da instalação onde estão os equipamentos eletrônicos sensíveis.

A blindagem perfeita de uma instalação ou mesmo de um simples equipamento é praticamente impossível. Teoricamente, um equipamento pode ser colocado no interior de uma blindagem, constituída de um invólucro metálico de paredes espessas, não recebendo ou emitindo qualquer sinal eletromagnético.

Na prática, esta situação é impossível porque o equipamento, para ser utilizado, deve ser ligado a uma fonte externa qualquer. Dessa forma, as emissões eletromagnéticas podem atingir o equipamento pela conexão externa.

Uma condição que inviabiliza a blindagem perfeita é a necessidade de ventilação de alguns equipamentos, o que pode deteriorar as condições otimizadas.

A blindagem magnética pode ser constituída de material ferromagnético, material condutor não magnético, diamagnético ou paramagnético ou uma combinação de ambos. Quanto menor a frequência do sinal, maior é o poder de penetração do campo magnético na blindagem, exigindo espessura metálica cada vez maior.

Blindagem ferromagnética

A atenuação do campo magnético propiciada por uma blindagem é função da permeabilidade magnética do material utilizado. A permeabilidade magnética é a característica que um determinado material possui de permitir ser atravessado (com facilidade ou não) por linhas de campo magnético. Dessa forma, o fluxo magnético procura o caminho de menor relutância, que é o da blindagem (permeabilidade maior que a do ar).

As blindagens magnéticas podem ser utilizadas para atenuar tanto campos de corrente contínua como campos de corrente alternada. O efeito de atenuação de campo nas blindagens de aço estrutural é pequeno devido à sua baixa permeabilidade magnética.

Blindagem condutiva

Na presença de materiais condutivos, tais como cobre e alumínio, o fluxo magnético induz correntes parasitas na sua massa. As correntes parasitas produzem outro fluxo magnético que se contrapõe ao primeiro, atenuando a sua intensidade. Nesse caso, o fluxo magnético penetra na blindagem, induzindo correntes parasitas que geram um campo magnético contrário ao campo magnético incidente, desviando a sua direção.

A blindagem condutiva é construída com materiais diamagnéticos e paramagnéticos. O cobre, de ótimo desempenho na blindagem, apresenta um

custo elevado. O alumínio, graças ao seu menor custo, tem a preferência na construção desse tipo de blindagem.

A blindagem condutiva é utilizada somente na presença de campos eletromagnéticos gerados por fonte de corrente alternada, como resultado do princípio de atuação desse tipo de blindagem.

Da mesma forma que os materiais utilizados na blindagem ferromagnética, os materiais condutivos necessitam ter espessura adequada em função da atenuação desejada. Quanto maior for a condutividade do material, maior será o grau de atenuação do campo magnético, porque a penetração do fluxo magnético na massa da blindagem é menor.

A espessura das blindagens, tanto magnéticas como condutivas, varia entre 1 e 6 mm, que é determinada pelo grau de atenuação desejado no projeto. Uma blindagem aplicada na atenuação de campos magnéticos deve utilizar material magnético. Uma blindagem aplicada na atenuação de campos elétricos deve utilizar material condutivo, independente da frequência do campo incidente.

Impedância de transferência

A impedância de transferência é uma característica significativa dos cabos blindados e seu estudo é complexo, entrando nas áreas especializadas de cabos elétricos. Nesta seção, de informações práticas e gerais, é apresentada uma definição básica da impedância de transferência.

Num cabo blindado ligando dois aparelhos, uma onda eletromagnética de perturbação externa induz corrente na malha formada pela blindagem e pelas conexões de massas.

Se a blindagem é perfeita ou ideal, a onda de perturbação não penetra no interior do cabo e não aparece nenhuma tensão induzida entre a blindagem (massa) e os condutores internos.

O problema é que não existe um cabo blindado perfeito, sempre aparece uma tensão residual em função da frequência eletromagnética de perturbação.

A fórmula simplificada para impedância de transferência (Z_t) é: $Z_t = V_p / I_p$. Para atender às normas de compatibilidade eletromagnética, a impedância de transferência deve ser a menor possível. O fenômeno é muito mais

complexo do que a fórmula simplificada, dependendo do tipo de blindagem considerada e dos materiais utilizados.

Os fabricantes de cabos fornecem curvas de valores para a impedância de transferência em função da frequência.

Considerações sobre blindagem eletromagnética

O conceito de proteção eficaz exige uma compreensão da fonte de interferência, o ambiente em torno e a distância entre a fonte e o ponto de observação (o receptor). Se o circuito está operando próximo da fonte (no campo de indução), as características do campo são determinadas pela fonte. Se o circuito está distante, as características do campo são determinadas pelo meio de transmissão. Um circuito opera em campo próximo se a distância da fonte da interferência é menor que o comprimento de onda (λ) da interferência dividida por 2π , ou $\lambda/2\pi$. Se a distância entre o circuito e a fonte de interferência é maior, o circuito opera em campo distante.

A interferência causada por um pulso de largura 1 ns tem uma largura de banda de aproximadamente 350 MHz. O comprimento de onda de um sinal de 350 MHz é de aproximadamente 0,81 m (a velocidade da luz é de aproximadamente 0,30 m/ns). Dividindo o comprimento de onda por 2π , temos uma distância de aproximadamente 0,13 m, o limite entre próximo e distante do campo. Se um circuito está dentro do raio de 0,13 m de uma fonte de interferência de 350 MHz, então o circuito opera no campo próximo da interferência. Se a distância for superior a 0,13 m, o circuito opera no campo distante da interferência.

Independentemente do tipo de interferência, há uma impedância característica associada a ela. A impedância de onda de um campo é determinada pela razão de seu campo elétrico pelo campo magnético. No campo distante, a relação entre o campo elétrico e o campo magnético é a característica (impedância da onda) do espaço livre, dada por $Z_0 = 377 \, \Omega$. No campo próximo, a onda de impedância é determinada pela natureza da interferência e da sua distância da fonte. Se a fonte de interferência é de alta corrente e baixa tensão (por exemplo, uma antena ou um transformador de energia), o campo é predominantemente magnéti-

co e apresenta uma impedância de onda inferior a $377 \, \Omega$. Se a fonte de interferência é de baixa corrente e alta tensão (por exemplo, uma haste de antena ou um circuito de chaveamento digital de alta velocidade), então o campo é predominantemente elétrico e apresenta uma impedância de onda superior a $377 \, \Omega$.

O encapsulamento condutivo pode ser utilizado para proteger circuitos sensíveis dos efeitos de campos externos. Esses materiais apresentam um casamento de impedância para a interferência incidente, pois a impedância da blindagem é inferior à impedância de onda do campo incidente. A eficácia da blindagem condutora depende de dois fatores: perda devido à reflexão da onda incidente no exterior da blindagem; perda pela absorção da onda transmitida no interior da blindagem. A quantidade de perdas por reflexão depende do tipo de interferência e sua impedância de onda. A quantidade de perda de absorção é independente do tipo de interferência. Ela é igual para radiações de campo próximo ou afastado, bem como para campos magnéticos ou elétricos.

A perda de reflexão na interface entre dois meios depende da diferença de impedância característica dos dois meios. Para campos elétricos, a perda de reflexão depende da frequência da interferência e do material da blindagem. Esta perda pode ser expressa em dB e é dada por:

$$R_e(dB) = 322 + 10 \log_{10} \left[\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right]$$

Onde:

σ_r = condutividade relativa do material de blindagem, em Siemens por metro;

μ_r = permeabilidade relativa do material de blindagem, em Henries por metro;

f = frequência da interferência;

r = distância da fonte de interferência, em metros.

Para campos magnéticos, as perdas dependem também do material de blindagem e da frequência da interferência. A perda de reflexão para os campos magnéticos é dada por:

$$R_m(dB) = 14,6 + 10 \log_{10} \left[\frac{f_r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right]$$

Para ondas planas ($r > 1/2p$), a perda de reflexão é dada por:

$$R_{pw}(dB) = 168 + 10 \log_{10} \left[\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right]$$

A absorção é o outro processo de perda nos materiais de blindagem. A atenuação da onda pela absorção é dada por:

$$A(dB) = 3,34t \sqrt{\sigma_r \mu_r f}$$

Onde:

t = espessura do material protetor, em polegadas.

Esta expressão é válida para ondas planas de campos elétricos e magnéticos. Como a intensidade de um campo transmitido decresce exponencialmente em relação à espessura do material de blindagem, a perda de absorção é proporcional à espessura e inversamente proporcional à profundidade da camada de blindagem. Aumentando-se a espessura do material de blindagem, a eficácia da blindagem em altas frequências melhora.

A perda de reflexão para ondas planas no campo distante decresce com o aumento da frequência, porque a impedância da blindagem, Z_s , aumenta com a frequência. A perda de absorção aumenta com o crescimento da frequência. Para campos elétricos e ondas planas, o principal processo de proteção é a perda de reflexão. Em altas frequências, o principal processo é a perda de absorção.

Para sinais interferentes de alta frequência, materiais de boa condutividade, leves e fáceis de trabalhar, como o cobre ou o alumínio, fornecem blindagem adequada. Em baixas frequências, as perdas de reflexão e absorção de campos magnéticos são baixas. É muito difícil blindar circuitos contra campos magnéticos de baixa frequência. Nestas aplicações, materiais de elevada permeabilidade e baixa relutância fornecem o melhor resultado, desviando o campo magnético para fora do circuito protegido. Exemplo de material de elevada permeabilidade é o aço.

Tipos de cabos e formas de aterramento

Cabos de controle conduzindo sinais de baixo nível: pares trançados com blindagem individual e coletiva. A blindagem individual deve ser aterrada apenas na chegada do equipamento. A blindagem coletiva deve ser aterrada em ambas as extremidades.

Cabos de controle conduzindo sinais de alto nível: blindagem coletiva aterrada em ambas as extremidades.

Cabos de força, iluminação e aquecimento: blindagem somente para os de iluminação e aquecimento em painéis com equipamentos eletrônicos sensíveis.

Esses três tipos de cabos devem ser agrupados em chicotes separados conforme o tipo, com distância entre si superior a 25 cm ou através de utilização de eletrodutos metálicos ou eletrocalhas.

Cada eletroduto ou eletrocalha deve ser aterrado a cada 10 m, através de um condutor de cobre nu. Em canaletas de concreto subterrâneas, deverão ser utilizados dois condutores de terra de cobre nu, aterrados a cada 10 m, correndo pelas laterais da canaleta e por cima dos cabos.

Painéis

Os painéis deverão ser metálicos, com boa blindagem eletromagnética e mínimo de aberturas para o exterior. As portas deverão possuir bom contato elétrico quando fechadas e não devem ter vedações isolantes.

A fiação interna dos painéis deve ter blindagem simples, aterrada no equipamento terminal e no painel. Os grupos de cabos para um mesmo equipamento devem ser dispostos em chicotes separados, conforme visto anteriormente.

Os painéis com equipamentos analógicos ou digitais de baixo nível não devem conter, na medida do possível, dispositivos eletromecânicos de chaveamento (relés, disjuntores e contactora).

Supressor de surto transiente de tensão (TVSS)

O supressor de surtos é um dispositivo não linear que limita a quantidade dos impulsos transientes de tensão que alcançam a carga. O termo supres-

sor é incorreto porque, na verdade, o dispositivo desvia a energia excedente e limita a sua intensidade na carga.

Os dois tipos básicos de supressores são os grampeadores (*clamps*) e *crowbars*. O supressor tipo *clamp* possui um componente não linear, como o MOV (*Metal Oxide Varistor*) ou diodo de avalanche.

Quando um impulso excede a tensão nominal do MOV, ele passa (em nanossegundos) da condição de resistência muito alta para o modo condutor (baixa resistência). Como o MOV oferece menos resistência ao impulso do que a carga, a maior parte da energia é dirigida para ele e dissipada em sua resistência interna.

O limite de condução (*breakover*) do supressor é o ponto em que o dispositivo começa a conduzir. A resistência dinâmica do dispositivo, o tempo de resposta e a quantidade de energia do impulso aplicado, forçam o dispositivo a limitar os impulsos de alto nível.

A limitação da tensão de pico no supressor estabelece a performance mínima de sua capacidade.

Por exemplo: a tensão de pico da tensão nominal de 120 Vca é 170 V; considerando uma margem de segurança de 10%, teremos 187 V. Nesse caso devemos considerar um componente real com limite de 200 V. O ponto de limite é aplicado nas direções positiva e negativa. Se o supressor conduz em 200 V para mais ou menos, a carga deve ser capaz de suportar impulsos de até 370 V.

Impulsos de mesma amplitude e polaridade incidindo sobre as linhas de fase e neutro (modo comum) não são afetados por um supressor em modo normal. Várias configurações de MOV são utilizadas para a proteção de cargas em modo comum e modo normal.

As configurações básicas são:

- Fase - Neutro; Neutro - Terra;
- Fase - Terra; Neutro - Terra;
- Fase - Neutro; Fase - Terra; Neutro - Terra.

O diodo de avalanche responde em nanossegundos para grampear a tensão excessiva, mas tem baixa dissipação de energia. Assim, um surto que exceda o limite do diodo de avalanche pode atingir o equipamento ou destruir o supressor de surto.

Quando ocorre uma sobretensão, o dispositivo *crowbar* muda do estado de alta para baixa impedância, dirigindo o surto para a terra. Tubo de descarga a gás é um exemplo de dispositivo *crowbar*, fornecendo o caminho de terra para o surto e dissipando energia sob a forma de luz e calor. Sua grande vantagem é a capacidade de proteção contra correntes elevadas de surto, sem destruição ou aquecimento excessivo. A desvantagem é o tempo de resposta, pois em alguns casos o transiente ocorre mais rápido do que a reação do dispositivo.

Muitos supressores de surto utilizam uma combinação dessas tecnologias (multiestágios).

Protetor de surto para rede de energia

O dispositivo pode ser para uso em circuito monofásico, bifásico ou trifásico. Principais recomendações:

- Os dispositivos protetores devem ser instalados nas proximidades dos equipamentos eletrônicos, em paralelo com o seu circuito de alimentação, sempre após o disjuntor de proteção de sobrecorrente;
- Se houver falha do dispositivo protetor, ou ao término de sua vida útil, pode ocorrer um curto-circuito monopolar à terra cujo sistema deverá ser interrompido pela ação do disjuntor de proteção de sobrecorrente. A vida útil dos dispositivos protetores depende do fabricante e do tipo;
- Selecionar os dispositivos protetores em função do valor máximo da energia transitória dissipada com onda de 8 X 20 ms. São comercializados dispositivos protetores com uma larga faixa de energia dissipativa.

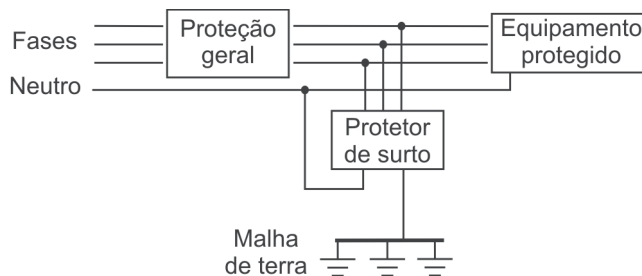


Figura - Instalação de dispositivo protetor em uma instalação trifásica

Protetor de surto para linha telefônica

Geralmente as linhas telefônicas são o meio de transmissão de dados em informática, sendo necessário bloquear a incidência de transitórios através delas. Isso pode ser feito utilizando-se um dispositivo protetor em série com o equipamento protegido, instalado nas imediações.

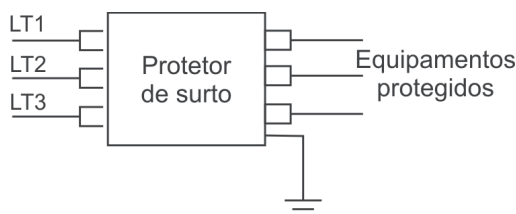


Figura - Dispositivo protetor de surto para linha telefônica

Considerações sobre o dispositivo protetor de linha telefônica:

- Selecionar o dispositivo protetor em função da classe de tensão que pode variar entre 25 V a 150 V em corrente contínua;
- Logo após a atuação, o dispositivo protetor regenera as condições normais da linha telefônica;
- Um dispositivo protetor pode proteger várias linhas telefônicas, de acordo com o modelo adotado.

Filtro de linha

O supressor de surto possui limitações funcionais que não permitem a proteção da carga contra impulsos de pequena amplitude, alta frequência e eventos contínuos (RFI ou ruído). O filtro eletrônico de linha é baseado em supressores de surto e providencia, adicionalmente, resposta de frequência e conformação da forma de onda. A resposta de frequência é atendida pelos filtros passa-baixa LC. A conformação da forma de onda permite ao filtro grampear impulsos com baixo nível de tensão.

As limitações do filtro de linha são a ausência de isolamento e a quantidade de corrente que o filtro drena para a terra durante operação normal. Essas limitações restringem a atenuação de eventos em modo comum. A efetividade é maior nos eventos em modo normal.

Filtro de ruído

O filtro de ruídos permite a passagem da frequência fundamental 60 Hz, bloqueando as outras frequências. Os tipos mais comuns de filtros são o passivo e o transformador isolador.

O filtro passivo utiliza resistores, capacitores e indutores compondo circuitos que filtram a frequência fundamental. Esse tipo de filtro é efetivo somente para ruídos de modo normal, não eliminando os ruídos de modo comum.

O transformador isolador utiliza dois conjuntos de indutores acoplados a um núcleo magnético comum, separados com blindagem magnética. Essa blindagem reduz ou elimina o ruído de modo normal através da transferência para o terra.

Os fios de neutro e terra são ligados juntos no secundário do transformador; com o mesmo potencial entre terra e neutro, o ruído de modo comum é eliminado.

Principais considerações na aplicação de filtros:

- Redução de ruído ≥ 60 dB;
- Atenuação do ruído de modo comum de 10 kHz a 100 kHz;
- Eficiência mínima de 90%.

Filtro de harmônicas

O filtro de harmônicas elimina a distorção harmônica causada pelos equipamentos de uma instalação e pode ser instalado na entrada do equipamento protegido ou na saída do dispositivo causador da distorção. As harmônicas causam sobrecarga nos equipamentos elétricos e corrente excessiva no neutro.

O filtro de harmônicas utiliza capacitores, indutores e resistores compondo circuito capaz de desviar as correntes harmônicas para terra. Esse dispositivo nunca deve ser instalado sobre o controlador (medidor) de energia da instalação.

Transformador de isolação

Quando um impulso de modo normal é aplicado ao primário do transformador, ele desenvolve um campo magnético (como a eletricidade normal)

e é acoplado magneticamente ao secundário. O único fator limitante é a indutância do transformador.

O impulso de modo comum não pode desenvolver um campo magnético porque as polaridades iguais em ambas as entradas do primário impedem a circulação e formação do campo magnético. Contudo, o evento de modo comum flui através do acoplamento capacitivo entre os enrolamentos do transformador.

Um transformador pode reduzir os eventos de modo comum em baixa frequência, porque a reatância capacitiva do acoplamento é muito alta, mas os eventos de modo comum em alta frequência fluem livremente.

A capacidade de atenuar eventos de modo comum pode ser melhorada substancialmente com a blindagem em torno dos enrolamentos.

A figura 4.1 mostra o aterramento mínimo e o aterramento recomendado pelas normas para o transformador isolador, no caso o transformador de distribuição (TD) de uma instalação.

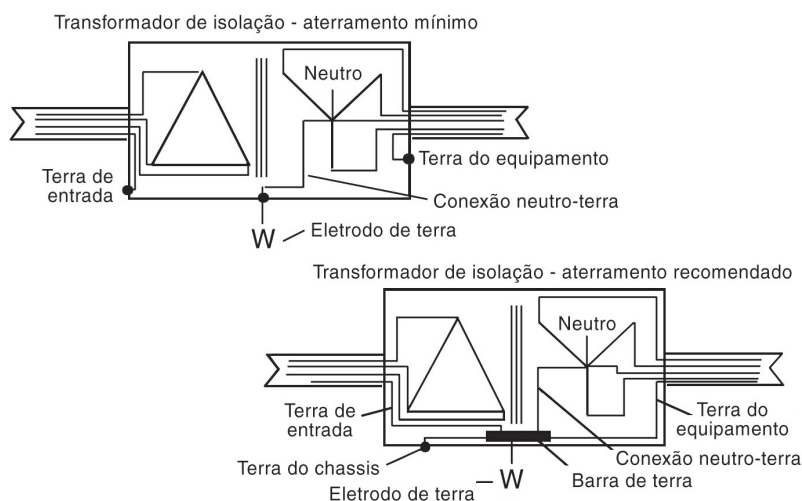


Figura 4.1

Regulador de tensão

O regulador de tensão mantém a tensão sobre uma carga dentro de limites especificados. Os tipos mais comuns de reguladores são o transformador ferroressonante e o transformador com saída controlada.

O transformador ferroressonante usa o princípio da saturação para regular a tensão. Um transformador funciona pela passagem da corrente através do enrolamento primário, criando um fluxo eletromagnético que induz corrente no enrolamento secundário. Quando a corrente aumenta no primário, a quantidade total do fluxo no núcleo também aumenta, assim como a corrente no secundário.

Há um ponto limite no qual a corrente adicional não causa acréscimo do fluxo. Quando isso acontece, a corrente no secundário fica estabilizada no valor máximo independentemente da quantidade de corrente adicionada ao primário. Esse é o ponto de saturação.

O transformador ferroressonante é projetado para alcançar rapidamente a saturação. Isso previne que um aumento drástico na corrente do primário alcance o secundário e, conseqüentemente, a carga a ser protegida.

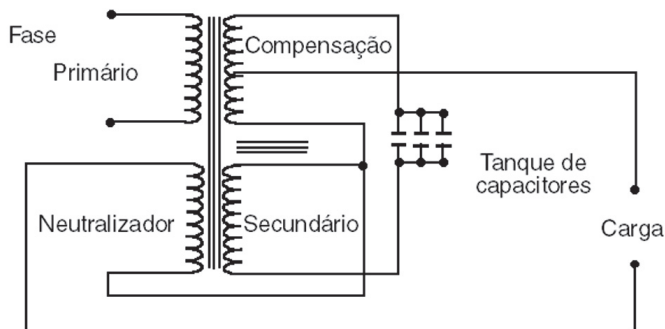


Figura 4.2 - Esquema básico do transformador ferroressonante

A maior vantagem do ferroressonante é a redução dos ruídos de modo comum e modo normal. Como todos os transformadores, eles possuem ligação do neutro para terra no secundário, o que elimina o ruído de modo comum. O ruído de modo normal é reduzido significativamente porque não consegue passar através do núcleo saturado do transformador.

A principal desvantagem do transformador ferroressonante é que ele é um dispositivo de alta impedância, reagindo mais lentamente para a demanda de corrente do que os outros tipos de transformadores. Isso é significativo em cargas com alta corrente de ligação (*inrush*), tais como em computadores.

Outra desvantagem é a distorção harmônica, porque o transformador ferroressonante produz onda quadrada (senóide cortada no topo e nas laterais). A solução é colocar filtros que realizam, com relativa eficiência, a conformação da onda.

O circuito de oscilação indutivo-capacitivo é o coração do transformador ferroressonante. Os capacitores do tanque devem ser substituídos regularmente de forma a garantir sua eficiência.

Se houver queda na tensão de entrada, o transformador ferroressonante drena uma quantidade maior de corrente e mantém a tensão de saída. Se a tensão de entrada cair a zero, o tanque de capacitores entra em operação e mantém o nível de tensão na saída.

A capacidade do transformador ferroressonante de manter a tensão de saída depende da quantidade de carga, do tipo da carga e quantidade de energia solicitada.

O regulador com chaveamento de taps usa o princípio da razão de espiras, que declara: se o número de espiras no primário e secundário for igual, o valor da corrente de saída será igual ao da corrente de entrada. Logo, a variação do número de espiras no primário provoca a variação da tensão de saída.

Esse tipo de regulador possui um sensor que detecta as alterações de tensão e um conjunto de SCRs que atua na relação de espiras. Principais características:

- Razão de regulação típica entre +10% e -15% da tensão nominal;
- Mínimo de sete taps, quatro para tensões abaixo da nominal e dois para tensões superiores;
- Os taps devem ajustar passos entre 4% e 10% da tensão;
- O tempo de resposta deve ser inferior a dois ciclos.

Os conceitos de regulador de tensão e condicionador de energia podem causar alguma confusão quanto ao entendimento. Um condicionador de energia pode incluir a regulação de tensão, isolamento, filtragem, eliminação de harmônicas e supressão de transientes, em conjunto ou em combinações.

Alguns reguladores de tensão são construídos como parte de um condicionador de energia, enquanto outros são reguladores de tensão independentes.

Os distúrbios corrigidos pelo regulador de tensão são de dois tipos: eventos repetitivos de curta duração (sags e surtos) e eventos de longa duração, de alguns segundos até horas, conhecidos como subtensão e sobretenção. Reguladores com longo tempo de resposta são efetivos somente para os eventos de longa duração. Os reguladores com tempo de resposta curto (1 ciclo) atendem os dois tipos de distúrbios.

Embora os reguladores de tensão sejam dispositivos relativamente simples, eles podem reduzir a confiabilidade de um sistema elétrico. Adicionalmente, a relação custo-benefício é, algumas vezes, muito superior aos outros tipos de condicionadores.

Considerações sobre aplicação do regulador de tensão

- **Eficiência** – alguns tipos consomem muita energia em operação, principalmente em cargas que consomem acima de 1 kVA. Os tipos ferroressonante e magnético são muito ineficientes, os tipos chaveado por taps e eletromecânico são eficientes.
- **Confiabilidade** – os reguladores com componentes ativos são mais sensíveis a falhas do que os constituídos por componentes passivos e transformadores. O tipo eletromecânico necessita manutenção regular em motores, correias e escovas. O tipo chaveado por taps contém controle por SCRs ou triacs, sensíveis aos problemas da rede e cargas;
- **Interação com a carga** – todos os tipos de reguladores podem causar interação com a carga, principalmente os tipos ferroressonante e chaveado. Quando isso ocorre, a regulação de tensão torna-se instável;
- **Resposta ao sag (dip) e interrupção** – nesse caso, são comuns as reinicializações ou desligamentos indevidos;
- **Regulador de tensão deve ser aplicado somente em caso de distúrbios graves na tensão.**

Soluções para problemas de harmônicas

- **Dispor de fontes de alimentação com controle interno de harmônicas e correção do fator de potência;**

- Promover a disposição balanceada das cargas fontes de harmônicas na instalação, de forma a obter corrente senoidal;
- Adicionar impedância (reatores de linha) e identificar fontes de correntes harmônicas para reduzir suas magnitudes;
- Acrescentar filtros passivos de harmônicas para controlar frequências harmônicas específicas;
- Adicionar filtros ativos de harmônicas para reduzir ou eliminar fator de potência e as harmônicas;
- Utilizar transformadores projetados para tolerar os efeitos de harmônicas;
- Empregar transformadores que fazem a integração da mudança de fase nas harmônicas e controlam impedâncias de sequência zero;
- Aplicar os procedimentos do IEEE19 – Requisitos e práticas recomendadas para o controle de harmônicas em sistemas elétricos.

Balanceamento de cargas para corrigir baixo fator de potência

Harmônicas causam formas de onda não senoidais, que por sua vez produzem baixo fator de potência. A correção do fator de potência necessita de uma compreensão de suas causas. Enquanto o fator de potência reativo é corrigido por reatâncias balanceadas, o fator de potência induzido por harmônicas deve ser corrigido através da introdução de dispositivos, tais como reatores, filtros passivos e ativos. O controle do fator de potência induzido por harmônicas também pode ser obtido através da mistura dos tipos de carga e tipos de ângulo de fase.

Ações do sistema elétrico contra os distúrbios por harmônicas

As concessionárias de energia elétrica fazem o planejamento dos sistemas elétricos de forma a serem pouco sensíveis às emissões harmônicas por cargas não lineares.

Ações desenvolvidas:

- Elevação da potência de curto-circuito – por meio da conexão em

paralelo dos transformadores de subestações ou da elevação da tensão nominal do sistema. Essa solução é de custo elevado;

- Seccionamento da rede – criando redes isoladas para atender áreas emissoras de harmônicas;
- Compensação harmônica centralizada – através da instalação de filtros de harmônicas no barramento de subestações que atendem os consumidores com emissão de harmônicas acima de determinados limites;
- Compensação harmônica distribuída – instalação de filtros de harmônicas nas cargas não lineares com frequência sintonizada, quando vários consumidores emitem harmônicas acima de determinados limites.

Carga linear

A característica essencial de uma carga linear é que ela não altera seu valor Ôhmico em função da tensão ou corrente aplicadas. Se a carga for resistiva pura, a frequência da tensão aplicada não afeta a corrente resultante; o valor da resistência não se altera com a variação da frequência. Em outras palavras, uma carga linear ao ser alimentada com tensão senoidal de frequência fixa, drena uma corrente também senoidal de mesma frequência.

Carga não linear

A característica essencial de uma carga não linear é que, ao aplicarmos uma tensão em seus terminais, ela drena da rede uma corrente que não é senoidal. Isto porque o valor da resistência ôhmica da carga muda ao longo da linha de carga. Nestas cargas, a lei de Ohm não se aplica ao longo do tempo, mas apenas a instantes determinados ou para cada ponto individual da linha de carga.

Corrente harmônica

O desenvolvimento da corrente total com múltiplas frequências resulta na criação de outras correntes com frequências de ordem múltipla, que são necessárias para a produção de uma forma única de corrente não linear, distorcida. Desta forma, uma fonte de tensão senoidal em 60 Hz alimentando uma carga não linear produz a circulação de correntes de outras frequências reais, além da fundamental.

A circulação de correntes harmônicas provenientes da alimentação de cargas não lineares em um sistema de potência deve ser encarada como um fato natural e não como problema do sistema ou distúrbio indesejado. O que deve ser feito é limitar o valor dessas correntes a valores que não prejudiquem o sistema em suas diversas configurações de uso. Como a carga drena da rede as correntes harmônicas, elas circulam desde a fonte de alimentação até a própria carga, na mesma direção da corrente da onda fundamental.

Tensão harmônica

As correntes harmônicas percorrem todas as impedâncias do circuito quando estão fluindo da fonte até a carga não linear, incluindo os circuitos alimentadores, os painéis intermediários e a própria fonte. Este fluxo gera tensões com a mesma frequência (não é a fundamental) porque as impedâncias dos circuitos são cargas lineares indutivas. Desta forma, pequenas correntes de ordens superiores são suficientes para produzir elevadas tensões harmônicas.

Como estas tensões são produzidas nas impedâncias do sistema, elas são diretamente proporcionais a estas impedâncias e sua minimização depende destas. A maior parte das impedâncias dos sistemas CA são impedâncias dos cabos, que aumentam com a frequência. Assim, há no sistema tensões harmônicas proporcionais à ordem das correntes harmônicas.

Filtro ativo para controle de harmônicas

A crescente utilização de equipamentos eletrônicos, tais como motor de velocidade variável e fonte de alimentação chaveada, para a otimização da eficiência e controle de processos, está aumentando a incidência dos distúrbios causados pela distorção harmônica nas instalações elétricas e, como consequência, nos sistemas elétricos.

A aplicação de filtros passivos gera ressonâncias no sistema que são dependentes das condições específicas. Os filtros passivos devem ser coordenados com relação aos requisitos das cargas e, seu projeto é de extrema complexidade para algumas condições de carga.

Os filtros ativos têm a vantagem de compensar os efeitos das harmônicas sem afetar a frequência fundamental. Isso significa que o filtro ativo não introduz ressonâncias que possam diversificar os distúrbios harmônicos conforme a frequência aplicada.

O conceito do filtro ativo utiliza a eletrônica de potência para produzir componentes harmônicas que cancelam as harmônicas geradas por cargas não lineares. As configurações aplicadas na topologia do filtro ativo são diversas e, uma das mais utilizadas é a baseada na modulação PWM. Nessa configuração, chamada de filtro ativo paralelo, o filtro é conectado em paralelo com a carga.

O inversor de tensão com modulação PWM utilizado nessa configuração de filtro ativo torna possível o controle de harmônicas. Esse inversor utiliza capacitores CC como fonte e pode chavear em alta frequência para gerar um sinal que cancela as harmônicas de uma carga não linear. Um ramo do inversor é mostrado na figura 4.3.

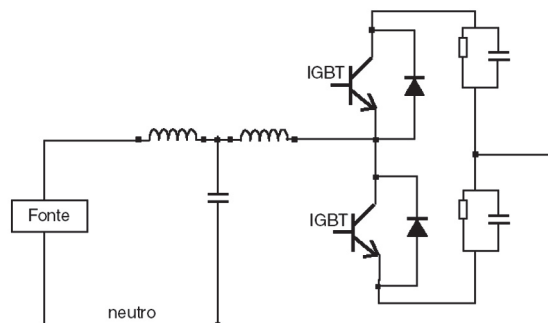


Figura 4.3 - Esquema básico do filtro ativo paralelo

O filtro ativo não precisa fornecer energia para cancelar as correntes harmônicas. As correntes harmônicas são canceladas como uma energia reativa. A redução da distorção harmônica de tensão ocorre porque as correntes que fluem através da impedância da fonte são reduzidas.

A forma de onda da corrente para cancelar harmônicas resulta da fonte do inversor e de um filtro para interface entre a fonte e o sistema de potência. O filtro consiste de indutores com alta isolação para converter o

sinal de tensão gerado pelo inversor em um sinal de corrente que cancela harmônicas.

A forma de onda da corrente é obtida pelo controle preciso de chaveamento nos componentes IGBT. Esse controle é limitado pela frequência de chaveamento do inversor e pela tensão proveniente dos indutores no filtro de interface.

A tensão através dos indutores determina a razão di/dt que pode ser obtida pelo filtro. Isso é importante porque valores altos na razão di/dt são determinantes no cancelamento das componentes harmônicas de alta ordem. Entretanto, existe uma contradição quanto ao valor do indutor. Um indutor de valor elevado é bom para a isolação do sistema e para a proteção contra os distúrbios, mas limita a capacidade do filtro em cancelar as componentes harmônicas de alta ordem.

O principal componente do filtro ativo é a fonte de tensão do inversor. A ponte de inversão em onda completa trifásica é construída com três ramos idênticos de inversores IGBT.

Um enlace CC é estabelecido pela divisão equitativa das capacitâncias CC entre os polos positivo e negativo. Essa configuração, combinada a controles individuais para os ramos, permite a compensação de cargas desbalanceadas ou monofásicas.

Na configuração do filtro ativo paralelo, o controle é acompanhado pela monitoração da corrente para a carga não-linear e pela geração de sinais que propiciam ao conversor criar uma corrente que cancele as harmônicas.

A taxa de amostragem da corrente na carga deve ser suficientemente alta para caracterizar com precisão toda a faixa de harmônicas que devem ser eliminados (256 amostras por ciclo é uma taxa típica).

Existem muitos métodos de controle para gerar a corrente de compensação que cancela as harmônicas na corrente da carga. Eles se distinguem pela forma que utiliza para originar o sinal de referência na compensação harmônica.

Efeito dos transientes sobre o filtro ativo

O filtro ativo não é projetado para controlar as correntes transientes que incidem na carga. Contudo, o impacto dos transientes sobre os componentes do filtro devem ser considerados.

Os limites impostos ao controle do inversor previnem a geração de corrente de compensação excessiva durante a atuação do transiente. O principal problema ocorre nos componentes do filtro passivo que serve de interface entre a fonte e o inversor.

O filtro passivo de interface inclui indutores e capacitores. Supressores de surto são utilizados para limitar picos de alta tensão associados a eventos de chaveamento da carga ou incidências de descargas atmosféricas.

O capacitor do filtro pode receber, em determinadas condições, uma tensão transiente com valor superior à sua capacidade e à do supressor de surto associado. Os transientes originados no chaveamento de capacitores em subestações também causam sobrecarga nos diodos do IGBT.

Outros dispositivos de sistemas elétricos podem sofrer interferências com os transientes causados por chaveamento de capacitor.

Compensador ativo de harmônicas

Uma planta industrial pode possuir diversos tipos de cargas elétricas: lineares (unidades com regeneração de energia, cargas resistivas, máquinas CA) e não lineares (acionamentos com velocidade ajustável, dispositivos a arco). O compensador ativo deve detectar as correntes harmônicas e gerar correntes de compensação para cancelá-las, deixando principalmente a componente fundamental da corrente para ser absorvida da fonte de alimentação. O compensador tem um controle em malha fechada para a regulação do inversor e da tensão CC, para a detecção e geração da referência de corrente de compensação. Desta forma, dependendo da aplicação, poderá operar como compensador de harmônicas, de correntes reativas ou mitigação de *flicker*.

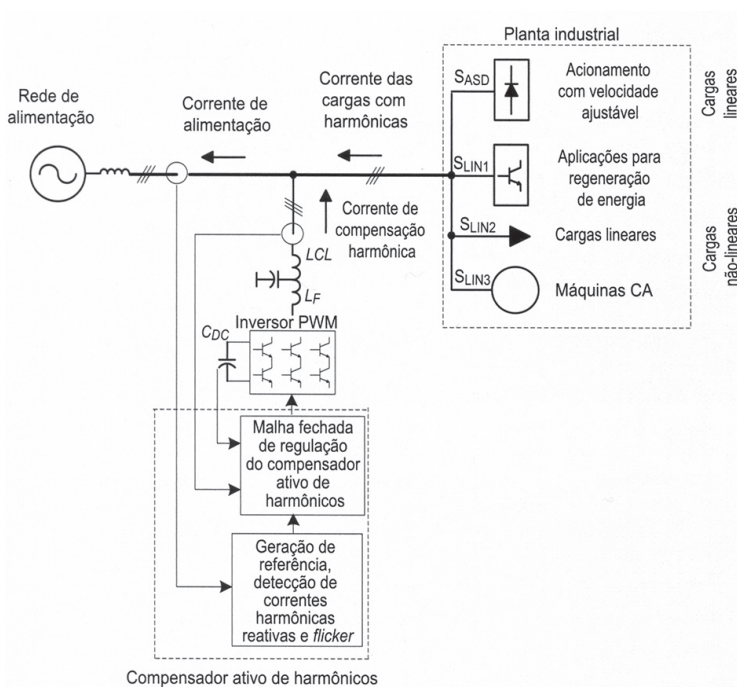


Figura 4.3.1 - Esquema de um compensador ativo de harmônicas em aplicação industrial

Aplicação do reator de linha em atuador de frequência variável

Existem várias formas para se obter reatância na linha de um atuador de frequência variável, também chamado de VFD (*Variable Frequency Drive*): indutância discreta com enrolamento trifásico em núcleo de ferro, ou com enrolamentos das três fases simples em núcleo de ferro ou núcleo de ar, ou indutância associada com transformadores isoladores.

O transformador isolador é utilizado quando é necessário transformar a tensão e para atenuar o ruído de modo comum em equipamentos que usam controle por SCR. Em VFD com ponte retificadora de diodos (tipo mais usado), o reator trifásico com núcleo de ferro fornece uma opção com melhor relação custo-eficiência na obtenção da reatância de linha.

O dimensionamento do reator de linha é expresso como uma porcentagem baseada no kVA do VFD. Por exemplo, um reator de linha de 5% para um VFD de 50 kVA, sistema de 460 V, proporciona uma indutância de 0,561 mH por fase, conforme os seguintes cálculos:

Impedância base:

$$Z_b = V^2 / \text{kVA} \times 1000 = 460^2 / 50 \times 1000 = 4,232 \, \Omega$$

Indutância base:

$$L_b = Z_b / 2\pi f \times 1000 = 4,232 / 2\pi 60 \times 1000 = 11,22 \, \text{mH}$$

$$\text{Reator de linha } 5\% = 0,05 \times L_b = 0,05 \times 11,22 = 0,561 \, \text{mH}.$$

A operação de banco de capacitores com a finalidade de corrigir fator de potência cria um curto-circuito momentâneo quando é energizado, durante o qual a energia é absorvida da linha para carregar o capacitor. Como consequência, a forma de onda da tensão sofre uma queda brusca na amplitude.

A magnitude típica da sobretensão é situada entre 1.2 pu e 1.6 pu, com frequência entre 400 Hz e 600 Hz. Durante o evento de sobretensão, o capacitor do VFD é carregado pelo pico de tensão do transiente. Isso resulta em falha na operação do VFD e danos nos diodos.

A sobretensão acontece, normalmente, no mesmo período do dia e, principalmente, pela manhã, quando os capacitores são conectados para responder à demanda de carga.

Em alguns VFDs, a falha por sobretensão será relacionada com o chaveamento de cargas de motores e de capacitores para correção do fator de potência.

O reator de linha ajuda a minimizar o efeito desses transientes. A impedância do reator causa a queda da tensão, limitando a magnitude da corrente de surto que atua sobre o capacitor do VFD.

O dimensionamento do reator é função da magnitude do transiente, impedância da fonte e nível limite do VFD. Na maioria dos casos, um reator de linha de 3% é suficiente. Em alguns casos, principalmente quando o transiente de sobretensão é superior a 1.6 pu, um reator de linha de 5% pode ser necessário.

Se o transiente de sobretensão ocorrer quando o VFD estiver inativo, o reator de linha pode não surtir efeito, especialmente para VFDs com menos de 5 hp. Isso acontece porque, quando está inativo, o VFD não drena corrente e o excesso de energia não pode ser transferido para a carga conectada (motor).

Dispositivos de proteção contra surtos não protegem com eficiência os VFDs, porque sua tensão de grampeamento mais baixa pode originar falhas pela sua baixa capacidade de energia.

A forma de onda da corrente em VFDs com retificador de diodos é caracterizada por ter a forma de dois pulsos em meio ciclo, cada pulso carregando o capacitor na tensão de pico. O resultado é um fluxo de corrente não senoidal, com distorção harmônica total entre 90% e 150% e harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens.

A aplicação de um reator transforma as discontinuidades da corrente em continuidades porque a tensão nos terminais do VFD tem sua forma de onda grampeada nos topos dos ciclos enquanto o tempo de carregamento do capacitor aumenta. Dessa forma, a largura do pulso da corrente aumenta enquanto decresce o pico da amplitude.

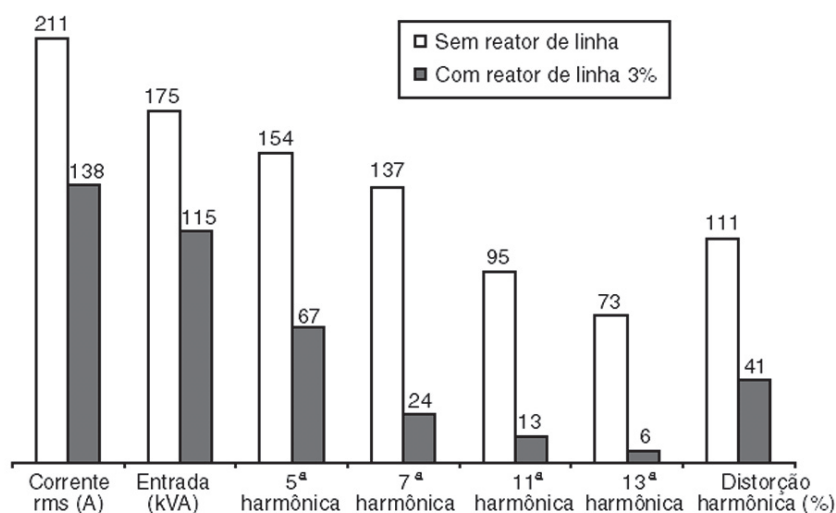


Gráfico 4.1 - Benefícios obtidos com a aplicação de um reator de linha de 3%

O uso de reatores de linha reduz as harmônicas de corrente e, como consequência, a corrente total *RMS*, que é definida como a raiz quadrada do quadrado da soma de todas as frequências harmônicas (incluindo a fundamental).

A redução da corrente total *RMS* causa uma redução na demanda de kVA do VFD e também nas perdas da linha, proporcionando um retorno rápido do investimento na instalação dos reatores.

Como o reator não altera a componente fundamental da corrente, a potência permanece a mesma (conforme os requisitos de carga), e a razão kW/kVA é melhorada. Essa razão é a definição do fator de potência verdadeiro.

O fator de potência de VFDs é, normalmente, baixo (0,6 a 0,65) devido ao conteúdo harmônico da forma de onda da corrente e pode ser melhorado com a introdução de um reator ou filtro de harmônicas.

Grande parte dos problemas em uma instalação é causada por falha no circuito fase - terra. Nesses casos, a tensão nos terminais do VFD possui grande desbalanceamento, que produz corrente elevada em uma das fases de alimentação do VFD (picos de corrente podem alcançar 250% da nominal quando instalado próximo de transformador). A aplicação de reatores de linha reduz os distúrbios de corrente.

Aplicação de reator de linha em controle por tiristores (SCRs)

Quando são utilizados SCR's em controle elétrico, geralmente ocorre uma distorção da tensão na forma de entalhes (chanfros) na senóide da onda. Equipamentos, tais como aquecedor por indução e controle de velocidade de motor CC, experimentam com frequência esse problema.

A figura 4.5 mostra a distorção da tensão na forma de entalhes.

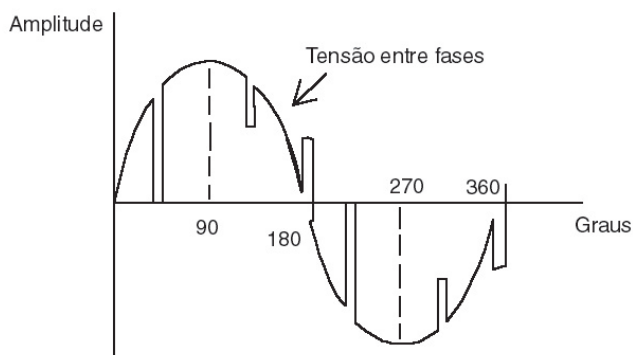


Figura 4.5

As irregularidades na forma de onda ocorrem durante a comutação do SCR ou durante a transição de estado em dois SCR's na sequência de condução.

Acontece um curto-circuito entre fases por um breve período e, consequentemente, a corrente é alta e a tensão é baixa no momento. Em alguns casos, o entalhe ultrapassa o eixo de tensão zero no sentido inverso, causando grandes problemas.

Durante um ciclo normal da tensão senoidal, a tensão cruza o nível 0 (eixo X) em 0 e 180 graus. Alguns equipamentos eletrônicos são projetados para gatilho na passagem pelo nível 0. Isso proporciona a ativação do equipamento sem surtos de corrente, o que aconteceria caso houvesse tensão. Outros equipamentos utilizam a passagem em 0 V para sinal de temporização interna.

Quando esses distúrbios estão presentes, principalmente em equipamentos trifásicos, ocorrem passagens extras pelo nível de 0 V. Em vez das duas normais por ciclo de tensão, podem ocorrer até quatro passagens. Isso danifica o equipamento, que muda de estado o dobro de vezes e, em alguns casos, com velocidade duplicada.

A solução para o problema é econômica e fácil de aplicar. Através de uma rede divisora de tensão, os entalhes no sinal são reduzidos antes do equipamento. Adicionar impedância na forma de reatância indutiva em série com o controlador SCR e entre o controlador e a linha de alimentação proporciona uma distribuição do distúrbio.

Se a impedância adicional for metade da original, então 1/3 do distúrbio é dissipado na nova impedância e 2/3 permanecem no ponto comum de conexão do equipamento. Se a impedância adicional for equivalente, o distúrbio é dissipado igualmente entre as duas impedâncias. A metade da tensão do distúrbio estará presente no ponto de conexão comum.

Conforme demonstrado por experiências de laboratório, a utilização de reator de linha de 3% reduz em 50% a magnitude dos entalhes em circuitos trifásicos. Não é recomendado usar reator de linha de 5% em circuitos com SCR porque ele reduz a amplitude do entalhe mas, ao mesmo tempo, aumenta a largura (tempo) do pulso. Isso pode causar problemas ao controlador.

Problemas de EMI em atuador de frequência variável

As transições abruptas de tensão nos terminais de saída de um VFD (atuador de frequência variável) são fontes inerentes de interferência eletro-

magnética (EMI). Essas transições são determinadas pelos tempos de transição na condução dos semicondutores utilizados no inversor do VFD.

A tendência atual na fabricação dos VFDs é a utilização de semicondutores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), com menor perda de potência e maior velocidade de chaveamento do que os predecessores BJT (*Bipolar Junction Transistor*). Entretanto, esses melhoramentos resultam em tempos de transição da tensão inferiores a 100 ns, e essa alta relação dv/dt produz correntes de ruído de modo comum nos capacitores de *by-pass* para terra do motor e cabos de alimentação.

Essas correntes de ruído causam interferência eletromagnética e afetam os sinais de controle, a realimentação do codificador, os links de comunicação para os controladores lógicos programáveis (CLPs), tais como RS-232, RS-484, I/O remotos e diferentes tipos de sensores (ultrassônicos, sistemas de códigos de barras, peso e temperatura).

A corrente de terra também produz radiações, com os cabos do VFD agindo como uma antena. A recepção de rádio AM, os dispositivos controlados por rádio e a recepção de TV são os equipamentos mais susceptíveis para a interferência dos VFDs.

A fonte de ruído na operação dos VFDs é a relação dv/dt da tensão de saída modulada em largura de pulsos (PWM).

A figura 4.6 mostra que os capacitores dos cabos e motor resultam em correntes de terra elevadas, com magnitude determinada pela equação $I = C dv/dt$.

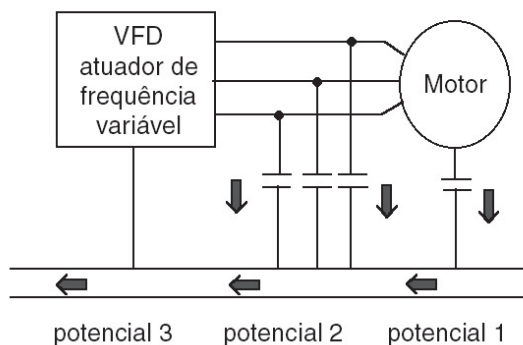


Figura 4.6

A alta impedância de terra em alta frequência resulta diferenças instantâneas de tensão entre pontos considerados como referência de terra. Essa tensão surge como um ruído de modo comum e pode interferir em sinais de controle e outros dispositivos de comunicação.

As correntes de terra também geram interferência radiada através dos condutores, que funcionam como antena.

O tempo de comutação da forma de onda de saída do VFD e a frequência de chaveamento do inversor determinam a frequência do ruído.

A frequência de chaveamento, entre 1 kHz e 16 kHz, determina o espectro do ruído em baixa frequência.

O tempo de comutação dos inversores IGBT, entre 50 ns e 500 ns, resulta em frequências de 600 kHz a 6 MHz.

Os problemas de EMI podem ser minimizados significativamente com a adoção de medidas preventivas durante a instalação dos VFDs. A utilização de cabo blindado na conexão com o motor é a principal delas, forçando a corrente de ruído a fluir através da blindagem de volta ao inversor, antes de se alastrar pelo sistema na forma de alta frequência. O uso de cabo blindado também reduz a área de emissão (antena) para a interferência radiada. A blindagem deve ser aterrada nas duas terminações.

Além da utilização de cabo blindado, as seguintes práticas são adotadas na redução do ruído:

- Fios condutores trançados nos extremos para propiciar um acoplamento capacitivo balanceado;
- Cabos de controle e alimentação elétrica afastados no mínimo em 25 cm;
- Uso de bobina de modo comum, com múltiplas espiras, nos condutores e blindagem;
- Módulos de isolamento óptica para os sinais de controle.

Bobinas de modo comum (CMCs - *Common Mode Chokes*) e filtros de EMI são os principais dispositivos utilizados para reduzir interferência EMI em VFDs de frequência variável. A bobina de modo comum é um indutor

com os condutores das três fases enrolados na mesma direção em torno do núcleo magnético toroidal.

O CMC representa uma alta impedância para qualquer corrente de ruído capacitiva gerada durante os tempos de transição da forma de onda. O CMC não afeta a alimentação elétrica e ocupa pouco espaço, em contraste com o reator de linha.

O filtro EMI para aplicação em VFD é do tipo passa-baixa, com indutâncias em série e capacitores de passagem conectados no modo fase para terra, instalados na entrada do VFD.

Tensão de modo comum em atuador de frequência variável

Quando um atuador de frequência variável (VFD) opera um motor em corrente alternada, o desgaste na isolamento do motor aumenta significativamente. Isso ocorre mesmo com a tensão correta na alimentação, porque o atuador também gera tensão de modo comum (ou tensão de frequência zero).

A tensão de modo comum é a tensão entre o neutro do motor e o terra. A isolamento entre o enrolamento e o laminado do motor tem de suportar a soma das tensões fase – neutro e modo comum.

A figura 4.7 mostra o diagrama esquemático de um atuador típico, sem transformador de entrada. O circuito consiste de dois conversores tiristorizados com os terminais acoplados através de indutores. O conversor de entrada utiliza SCRs com controle do ângulo de fase enquanto o conversor de saída utiliza GTOs (*Gate Turn Off*) com controle por modulação da largura de pulso (PWM).

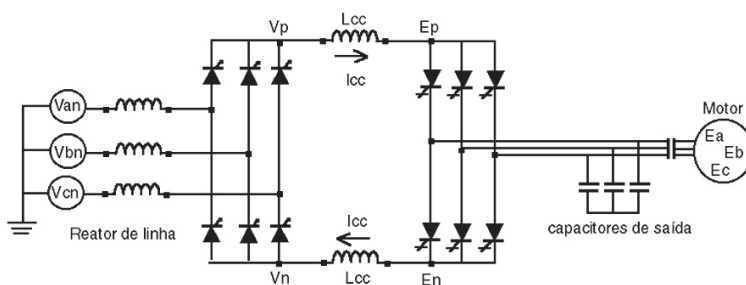


Figura 4.7

$$\text{Tensão de neutro no motor} = (E_a + E_b + E_c) / 3$$

As duas tensões terminais CC devem ser iguais para ambos os conversores porque os indutores têm o mesmo valor e conduzem a mesma corrente (duas bobinas idênticas no mesmo núcleo de ferro).

Logo:

$$V_p - E_p = E_n - V_n ; V_p + V_n = E_p + E_n ; (V_p + V_n) / 2 = (E_p + E_n) / 2$$

Como as tensões CC são iguais, as tensões CA de neutro serão diferentes para a soma das tensões principais CC. Se o neutro do conversor de entrada é aterrado, então, o neutro do conversor de saída (neutro do motor) concentra a tensão total.

A frequência de saída é normalmente diferente da frequência de entrada e pode existir um momento em que os valores de pico dos conversores coincidam. Cada pico pode alcançar 50% da tensão nominal fase-neutro, e a soma pode chegar em 100%. Com a possibilidade do pico de tensão de modo comum ser igual ao pico da tensão fase-neutro, a isolação do motor poderá sofrer um desgaste excessivo.

O problema da tensão de modo comum pode ser minimizado com o sobredimensionamento na isolação do motor. Outro método consiste na inserção de um transformador isolador na entrada do conversor. No caso, o secundário do transformador não deve ser aterrado e seu isolamento deve suportar duas vezes a tensão nominal.

A incidência da tensão de modo comum sobre o motor não reflete necessariamente em falha imediata, mas reduz muito sua vida útil. A isolação será degradada pelo ozônio gerado pelo efeito corona, que por sua vez é causado pelo aumento da tensão aplicada.

O reator de linha reduz a distorção harmônica produzida pelo atuador, mas não é efetivo sobre a tensão de modo comum.

UPS (*Uninterruptible Power Supplies*)

UPS é uma fonte de alimentação que utiliza baterias para manter o fornecimento de energia mesmo quando ocorre uma falha na rede elétrica.

Além disso, pode também ter as funções de filtro de linha e estabilizador. Normalmente, o UPS é apresentado como um equipamento externo, ao qual se ligam equipamentos eletrônicos. Em certos casos, o UPS pode ser a própria fonte de alimentação do equipamento eletrônico.

A finalidade básica do UPS não é substituir a rede elétrica, e sim manter os equipamentos funcionando por um tempo determinado quando ocorre falta da energia elétrica convencional.

Os sistemas UPS também são conhecidos, no Brasil, por Nobreak. Existem dois modelos de UPS: off-line e on-line.

UPS off-line

Em operação normal, a energia elétrica alimenta diretamente a carga e o retificador/carregador de baterias. Quando essa energia falha, o inversor supre a carga, alimentado pelo banco de baterias.

A conexão é realizada através da chave de transferência com tempo de chaveamento de 1,5 a 4,0 ms, após a tensão de entrada cair abaixo de um valor limite de tolerância.

Há dois tipos de UPS *off-line*: *standby* e interativo de linha (*line interactive*). No UPS *standby*, quando há queda na rede elétrica, as baterias entram em ação, fornecendo energia ao inversor.

O UPS linha-interativo utiliza um inversor bidirecional, banco de baterias, condicionador de energia e processador interno. O inversor bidirecional está sempre em operação, fornecendo CA para o condicionador e carregando as baterias. O processador interno controla a quantidade de carga suportada pelo inversor. Quando ocorre uma interrupção na energia convencional, o inversor alimenta a carga através do banco de baterias.

O custo de aquisição é moderado. A forma de onda na saída é senoidal. O tempo de transferência, quando ocorre a interrupção de energia, é de 2 ms a 5 ms. Não fornece isolamento entre as tensões de entrada e de saída. A regulação de tensão é limitada. Não há proteção contra harmônicas.

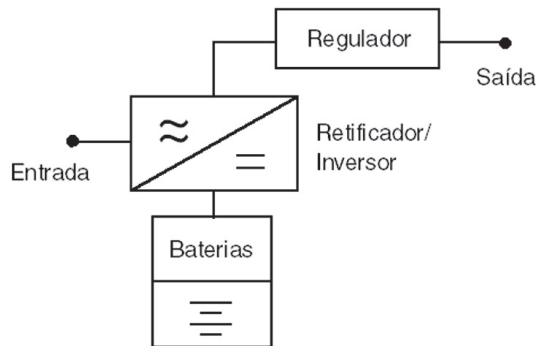


Figura 4.8 - Esquema básico do UPS linha-interativo

Distúrbios elétricos que são problemáticos para o UPS de linha-interativo:

- Forma de onda com fator de potência corrigido;
- Sag momentâneo seguido por sobretensão;
- Distorção harmônica;
- Desvio de frequência decorrente de flutuações na velocidade de gerador diesel.

O UPS não realiza condicionamento da energia elétrica quando em operação (a forma de onda na saída do inversor é quadrada). É aplicado, normalmente, em cargas até 1,5 kVA. O tempo de operação (suporte da carga) varia de 5 a 15 minutos e o usuário é alertado sobre a falta de energia e que a carga está sendo alimentada por bateria.

O UPS off-line não protege contra transientes, sags (dips), surges (swells) ou outros distúrbios de energia. A eficiência em plena carga é de 95%. O índice de defeito nas baterias é elevado. O custo de aquisição é baixo.

Principais considerações sobre a aplicação de UPS:

- O tempo de suporte à carga e o tempo de recarga das baterias devem ser analisados;
- O tempo de transferência do modo de operação normal para o modo de bateria tem de ser compatível com a necessidade da carga;
- A sensibilidade do chaveamento entre os modos de operação do UPS tem que ser ajustado em função da tolerância do equipamento aos dis-

túrbios. Por exemplo, um distúrbio leve (tolerável pelo equipamento) não deve atuar a transferência, porque um evento posterior, mais grave, pode encontrar o UPS inapto (bateria descarregada).

Observações para uso do UPS em computadores pessoais:

- Impressora não deve ser ligada ao UPS, porque a corrente de partida é elevada;
- Alguns tipos de UPS possuem conexão para o computador e um software que permite o seu desligamento correto e automático. Na ocorrência do distúrbio, o PC é comandado para salvar as configurações, finalizar tarefas e aguardar o desligamento seguro.

UPS on-line

Ao contrário do modelo off-line, o UPS on-line não interrompe o fornecimento quando há uma queda de energia. A saída é alimentada constantemente por uma combinação de recursos da rede elétrica ou da bateria.

O UPS on-line é um dispositivo que fornece energia elétrica continuamente para a carga, independente do estado do fornecimento convencional. Os sistemas UPS são encontrados nos mais variados tipos e tamanhos, fornecendo uma energia condicionada para equipamentos eletrônicos críticos. Ele protege esses equipamentos da maioria dos distúrbios elétricos e seu tempo de atuação na falta de energia convencional depende da capacidade do sistema de baterias.

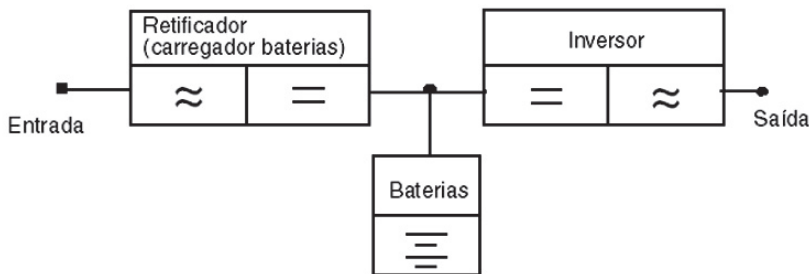


Figura 4.9 - Esquema básico do UPS on-line

O UPS é geralmente usado para proteger sistemas de computadores das interrupções momentâneas, tais como as que ocorrem durante tempestades. A eficiência em plena carga é de 75% devido à conversão CA/CC/CA. A alimentação da carga é sempre feita pelo inversor.

Existem quatro tipos básicos de UPS no mercado: ferroressonante, linha-interativo, conversão dupla e rotativo. Todos os tipos contêm os seguintes módulos:

- Retificador - converte a energia CA do fornecimento convencional em CC. Um dos ramos CC é usado para carga das baterias e o outro alimenta o inversor;
- Inversor - recebe a energia CC do retificador ou baterias, converte em CA e alimenta o sistema de computadores;
- Banco de baterias-alimenta o inversor quando ocorre falha na energia convencional CA.

UPS rotativo

O UPS rotativo utiliza um motor-gerador conjugado com um UPS estático. O motor-gerador providencia isolação total em relação à fonte externa de energia. Sob condições normais, ele supre 100% de energia para a carga.

Quando ocorre uma interrupção, ele continua a girar por um curto período de tempo devido à inércia. Isso fornece um tempo suficiente para o UPS assumir a alimentação elétrica do motor-gerador. O UPS rotativo oferece o mais alto nível de proteção, mas é o mais caro.

UPS de conversão dupla

O UPS de dupla conversão utiliza retificador, banco de baterias e inversor. O inversor está sempre em operação e suporta 100% da carga. Em operação normal, o inversor é alimentado pelo retificador.

Quando ocorre uma interrupção da energia convencional, o inversor é alimentado pelo banco de baterias.

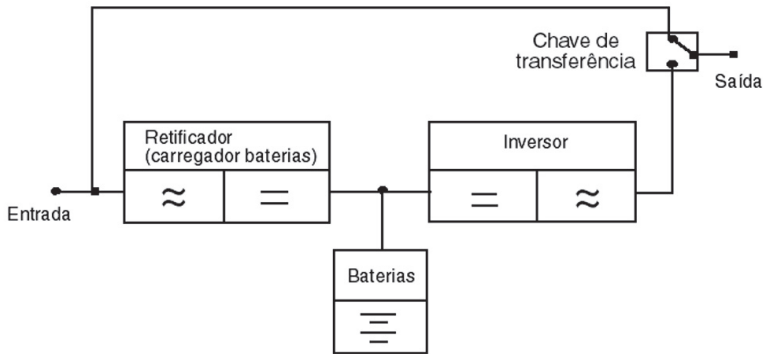


Figura 4.10 - Esquema básico do UPS de conversão dupla

UPS standby-ferro

O UPS standby-ferro, também chamado de ferroressonante, utiliza um transformador ferroressonante para condicionar e regular a energia de fornecimento convencional.

Quando ocorre uma interrupção, o UPS usa a energia armazenada no transformador ferroressonante para suprir energia até que o banco de baterias insira o inversor na linha. Nesse tipo de UPS, o inversor só é inserido quando ocorre interrupção no fornecimento convencional.

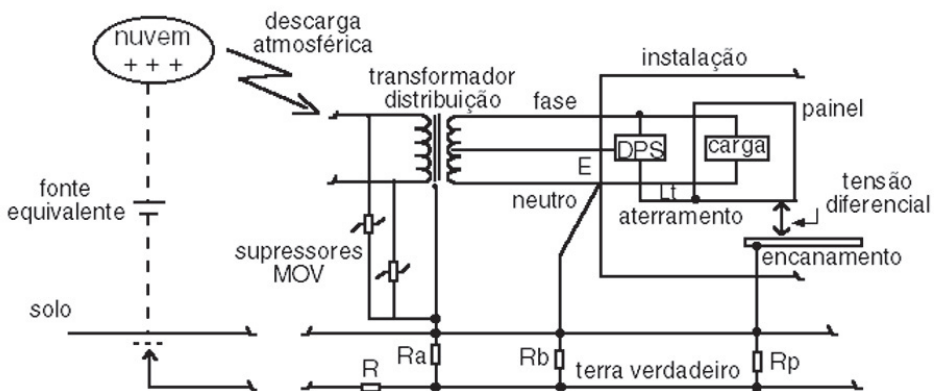


Figura 4.11 - Esquema básico do UPS standby-ferro

UPS delta on-line

Configuração de tecnologia recente, patenteada, disponível para cargas de 5 kVA a 1,6 MW, sem retardo na transferência.

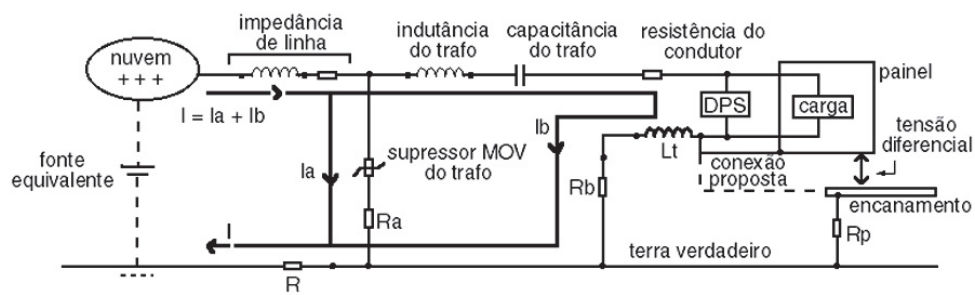


Figura 4.12 - Esquema básico do UPS delta on-line

Sumário de tipos de UPS

A tabela a seguir mostra as principais características de alguns tipos de UPS.

	Potência [kVA]	Custo por VA	Eficiência	Operação permanente inversor	Vantagens adicionais
Standby	< 0,5	Baixo	Muito alta	Não	Baixo custo Compacto
Linha-iterativo	0,5 - 5	Médio	Muito alta	Projeto	Confiabilidade Condicionamento
Ferroressonante	3 - 15	Alto	Baixa	Sim	Confiabilidade Condicionamento
Dupla conversão	5 - 5000	Médio	Baixa	Sim	Condicionamento
Conversão delta	5 - 5000	Médio	Alta	Sim	Condicionamento

Considerações gerais

O formato de onda de saída de um UPS deveria ser o mais aproximado possível de uma senóide fundamental, mas gerar uma onda senoidal a partir de um sinal CC é um procedimento complexo e de custo elevado. Isso fez

9

Ruído em sinais analógicos

A medição de sinais analógicos por um sistema de aquisição de dados necessita que se tenha o conhecimento da natureza da fonte do sinal, a configuração apropriada do sistema de aquisição de dados e um esquema de fiação adequado. O objetivo, nesse caso, é uma medida com imunidade ao ruído.

A figura 9.1 mostra o diagrama em blocos de um sistema de aquisição de dados típico. A integridade dos dados adquiridos depende do caminho do sinal analógico.

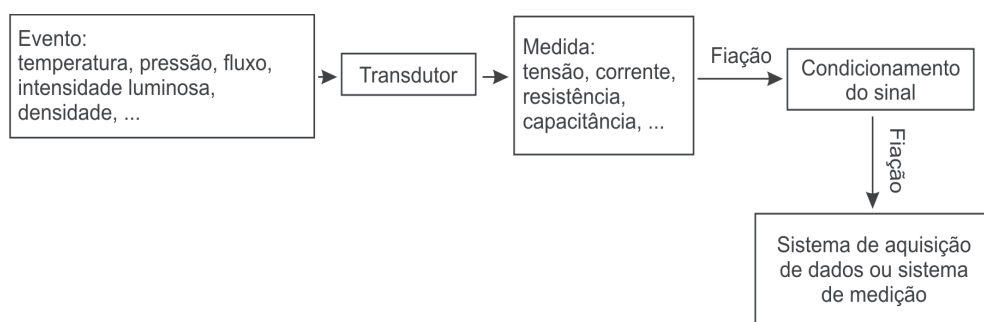


Figura 9.1

Alguns sistemas de aquisição de dados fornecem flexibilidade no estágio de configuração, possibilitando suportar uma grande variedade de aplicações.

O objetivo deste capítulo é apresentar os tipos de configuração disponíveis para o sistema de aquisição de dados, como o usuário deve escolher e usar a configuração apropriada e a redução dos ruídos interferentes (distúrbios) no sistema.

Tipos de sinal e sistemas de medição

O equivalente elétrico mais comum produzido pelo circuito condicionador de sinal associado com transdutores é na forma de tensão. A transformação para outras medidas elétricas, tais como corrente e frequência, é utilizada quando o sinal é transportado sobre cabos com longos percursos sob condições interferentes drásticas. Na maioria dos casos, o sinal transformado é reconvertido para a forma de tensão antes da medição.

Um modelo equivalente do sinal de tensão e sistema de medição é mostrado na figura 9.2.

A fonte de tensão pode ser de dois tipos: aterrada ou não aterrada (flutuante). Da mesma forma, um sistema de medição pode ser de dois tipos: aterrado (referenciado ao terra) ou não aterrado (flutuante).

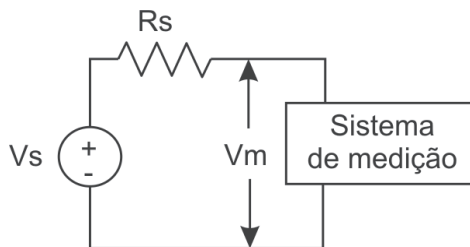


Figura 9.2

Fonte aterrada (referenciada ao terra)

Na fonte aterrada, o sinal de tensão é referenciado ao sistema de aterramento da instalação. Um exemplo de fonte aterrada é o instrumento do

tipo conexão direta (plug-in), cujo sinal de saída não é flutuante. A figura 9.3 mostra uma fonte de sinal aterrada.

Os terras de duas fontes de sinal aterradas não têm, em princípio, o mesmo potencial. A diferença no potencial de terra entre dois instrumentos conectados no mesmo sistema é da ordem de 10 mV a 200 mV (se os circuitos de distribuição não estão conectados apropriadamente, a diferença pode ser maior).

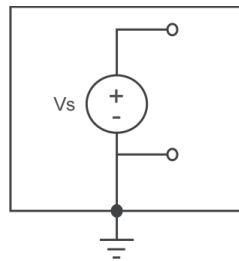


Figura 9.3

Fonte não aterrada (flutuante)

Na fonte não aterrada, o sinal de tensão não é referenciado ao terra. Alguns exemplos de fonte de sinal flutuante são os sistemas de baterias, termocopladores, transformadores, amplificadores de isolamento e qualquer instrumento com saída flutuante. A figura 9.4 mostra uma fonte de sinal não aterrada.

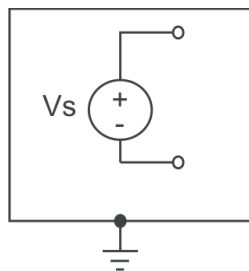


Figura 9.4

Sistema de medição não referenciado ao terra (diferencial)

No sistema de medição não referenciado ao terra, ou diferencial, nenhuma das entradas é conectada a qualquer referência de terra. Instrumentos portáteis alimentados por bateria e sistemas de aquisição de dados com amplificadores de sinal são exemplos de sistema de medição não referenciado ao terra.

A figura 9.5 mostra o esquema de um sistema de medição diferencial de oito canais. Multiplexadores analógicos são usados no caminho do sinal para aumentar o número de canais de medição utilizando um amplificador de sinal. No esquema, o sinal “AIGND” é a entrada analógica do terra do sistema de medição.

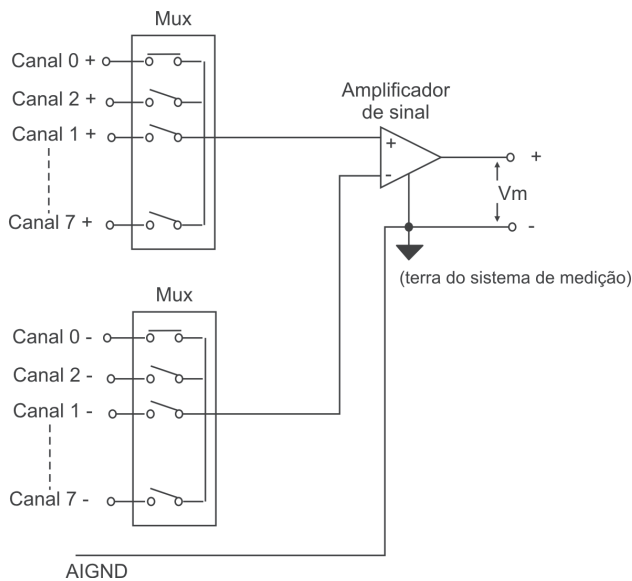


Figura 9.5

Um sistema de medição diferencial ideal responde somente para a diferença de potencial entre seus dois terminais de entrada, positivo e negativo. Qualquer medida na entrada do amplificador de sinal é referida como uma tensão de modo comum. A tensão de modo comum é bloqueada (não é medida) por um sistema de medição diferencial ideal.

Essa característica é usada na rejeição de ruído, tal como o produzido através da fiação do sistema por tensão de modo comum. Entretanto, um sistema de medição prático tem várias limitações. As principais limitações são: a faixa de variação da tensão de modo comum e a razão de rejeição de modo comum (CMRR), que limitam a capacidade de rejeição.

A tensão de modo comum V_{cm} é definida como:

$$V_{cm} = (V(+)) + V(-)) / 2$$

$V(+)$: tensão no terminal não inversor do sistema de medição referenciado ao terra.

$V(-)$: tensão no terminal inversor do sistema de medição referenciado ao terra.

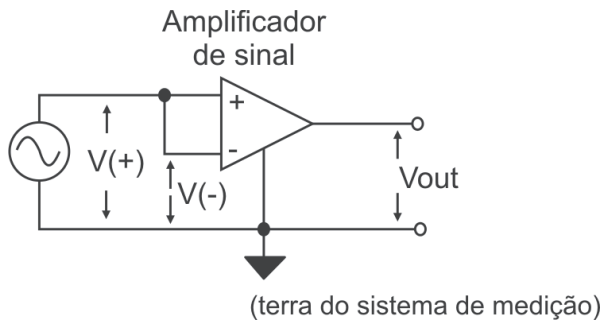


Figura 9.6

No circuito da figura 9.6, $CMRR \text{ (dB)} = 20 \log (V_{cm} / V_o)$ e $V_{cm} = V(+)) = V(-)$.

CMRR em decibel (dB) é definida como:

$$CMRR \text{ (dB)} = 20 \log (\text{ganho diferencial} / \text{ganho de modo comum})$$

A faixa de variação da tensão de modo comum limita o balanceamento de tensão de cada entrada em relação ao terra do sistema de medição. Contrariar esse princípio conduz a erros de medição e possibilidade de danos aos componentes do sistema de medição. O CMRR quantifica a capacidade de um sistema de medição diferencial em rejeitar o sinal de tensão de modo comum e é função da frequência. A maioria dos sistemas de aquisição de dados especifica o CMRR em 60 Hz, a frequência da rede elétrica convencional.

Sistema de medição referenciado ao terra

O sistema de medição referenciado ao terra, também chamado de sistema de medição aterrado, é similar a uma fonte de alimentação aterrada na qual a medição é efetuada em relação ao terra.

O esquema mostrado na figura 9.7, chamado de sistema de medição com terminação simples (GRSE – *Ground Referenced Single Ended*), mostra um sistema de medição aterrado de oito canais.

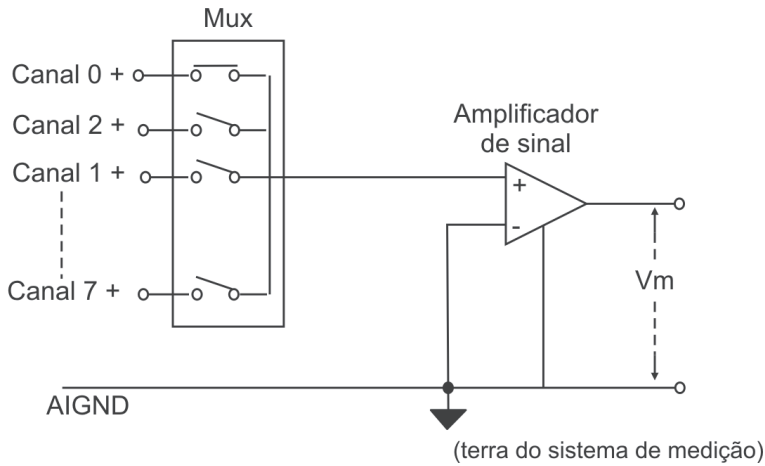


Figura 9.7

Uma variante da técnica de terminação simples, conhecida como terminação simples não referenciada (NRSE – *Non Referenced Single Ended*) ou medição pseudodiferencial, é utilizada em muitos sistemas de aquisição de dados. A figura 9.8 mostra essa variante.

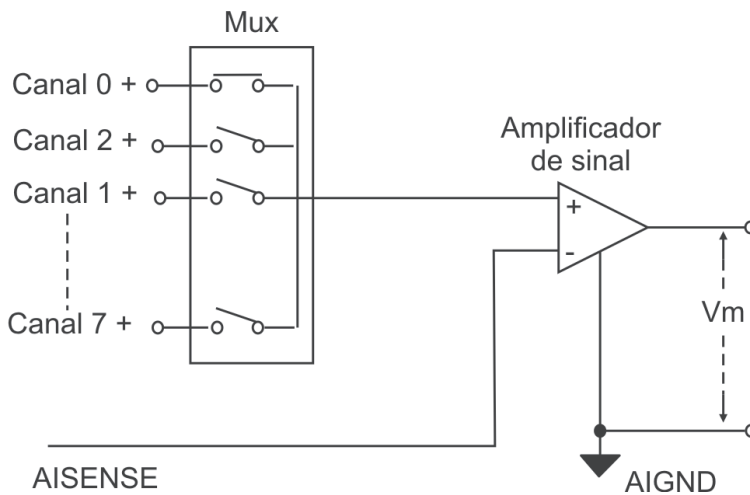


Figura 9.8

No sistema de medição NRSE, todas as medidas são referenciadas à entrada analógica de detecção (AISENSE). O potencial neste ponto pode variar em relação ao terra do sistema de medição AIGND.

Depois de identificados os diferentes tipos de fonte de sinal e sistemas de medição, é apresentada a relação adequada entre o sistema de medição e o tipo de fonte do sinal.

Medição de fonte de sinal aterrada

A melhor medição para uma fonte de sinal aterrada é o sistema de medição diferencial (não referenciado).

A figura 9.9 mostra o problema causado pela utilização de um sistema de medição aterrado (referenciado ao terra) na medição de uma fonte de sinal aterrada. No caso, a tensão medida V_m é a soma da tensão da fonte V_s e a diferença de potencial ΔV_g , que existe entre o terra da fonte de sinal e o terra do sistema de medição.

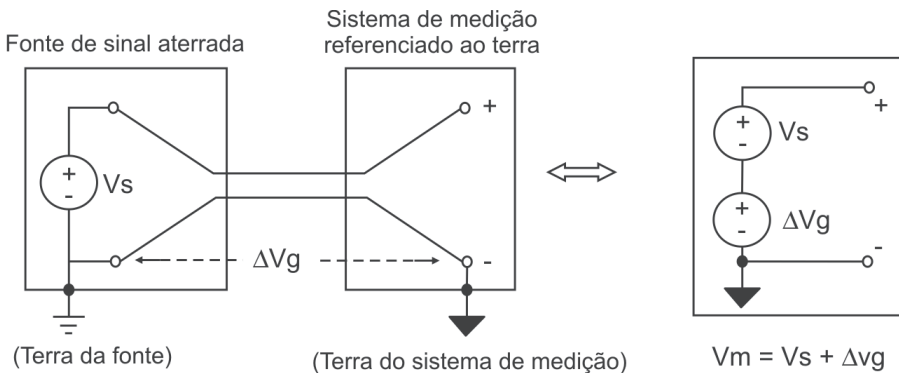


Figura 9.9

A diferença de potencial ΔV_g não é um nível CC e resulta em ruído no sistema de medição, geralmente contendo componentes da frequência da rede (60 Hz).

O *loop* de terra introduzido pode conter componentes CC e CA, causando erros de offset na medição. A diferença de potencial entre os dois terras produz um fluxo de corrente na conexão entre a fonte e o sistema de medição, a corrente *loop* de terra.

A configuração descrita pode ser utilizada se os níveis de tensão do sinal são altos e se a fiação de conexão entre a fonte e o sistema de medição tem baixa impedância. O sinal da medição é degradado, mas com intensidade tolerável.

No sistema de aquisição de dados típico, uma medição diferencial é fornecida para as configurações diferencial (DIFF) e NRSE. Com essas configurações, qualquer diferença de potencial entre as referências de terra da fonte e do sistema de medição aparece como tensão de modo comum para o sistema de medição, a qual é subtraída do sinal medido.

A figura 9.10 mostra o esquema dessa configuração.

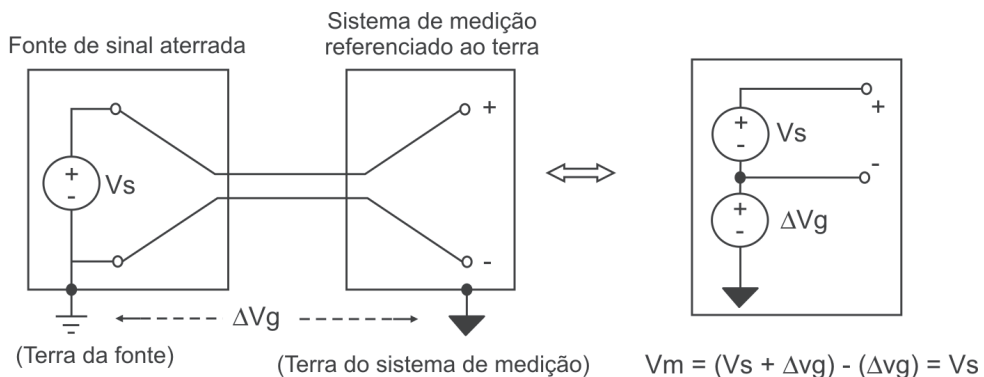


Figura 9.10

Medição de fonte de sinal não aterrada (flutuante)

A medição da fonte de sinal não aterrada (flutuante) pode ser efetuada com os sistemas de medição do tipo diferencial e com terminação simples. No sistema de medição diferencial, deve ser assegurado que o nível de tensão de modo comum em relação ao terra permaneça dentro da faixa de medição de modo comum do dispositivo.

Alguns fenômenos, tal como a polarização da corrente de entrada do amplificador de sinal, podem levar o nível de tensão da fonte flutuante a extrapolar os limites de entrada do sistema de aquisição de dados.

Para ancorar o nível de tensão a alguma referência, podem ser utili-

zados resistores. Estes resistores, chamados de resistores de polarização, fornecem um caminho CC da entrada do amplificador de sinal para o seu terra. Os resistores devem ter valor alto o suficiente para permitir que a fonte flutue em relação à referência de medição (AIGND) e não carregar a fonte de sinal, mas não tão alto que extrapole o valor permitido para a tensão de entrada do sistema.

Normalmente, resistores com valores entre $10\text{ k}\Omega$ e $100\text{ k}\Omega$ são utilizados em cada entrada.

A figura 9.11 mostra a disposição dos resistores.

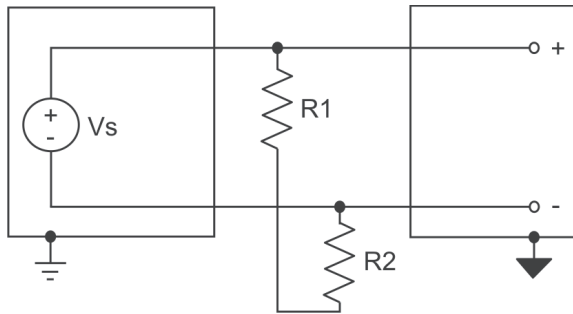


Figura 9.11

Para o acoplamento de fontes CC, somente R_1 é necessário. Para o acoplamento de fontes CA, $R_1 = R_2$.

O sistema GRSE pode ser utilizado para sinal flutuante. Nesse caso, não é criado nenhum *loop* de terra. A figura 9.12 mostra a configuração.

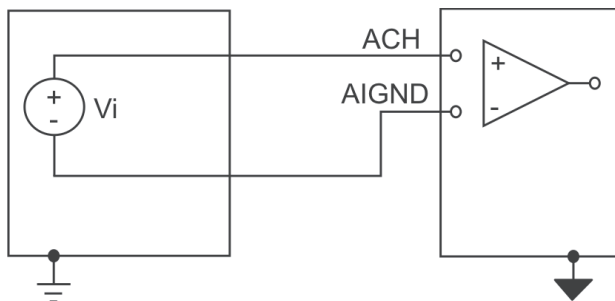


Figura 9.12

O sistema NRSE utilizado para sinal flutuante é o preferencial no aspecto do ruído. São necessários resistores de polarização entre a entrada (AISENSE) e o terra do sistema de medição (AIGND). A figura 9.13 mostra a configuração.

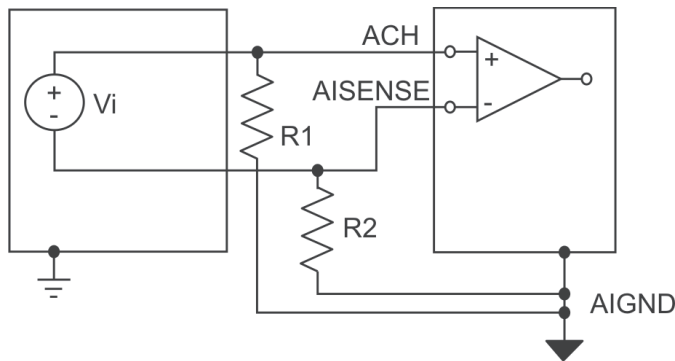


Figura 9.13

Ruído de acoplamento em conexões

Mesmo utilizando técnicas que evitam *loops* de terra e saturação no estágio de entrada, um sistema de medição sempre sofrerá alguma interferência por ruídos ou sinais indesejados. Isto ocorre principalmente para sinais analógicos de baixo nível que são amplificados internamente nos sistemas de aquisição de dados.

Os dados adquiridos são provenientes (geralmente) de conectores I/O e qualquer fluxo de informação digital pode ser uma fonte de ruído. Para minimizar esse ruído de acoplamento, é necessário utilizar um esquema apropriado de cabeamento e blindagem.

Não existe solução simples para o problema do ruído de acoplamento e, uma solução inadequada pode piorar o problema.

O diagrama em blocos da figura 9.14 representa o problema do ruído de acoplamento.

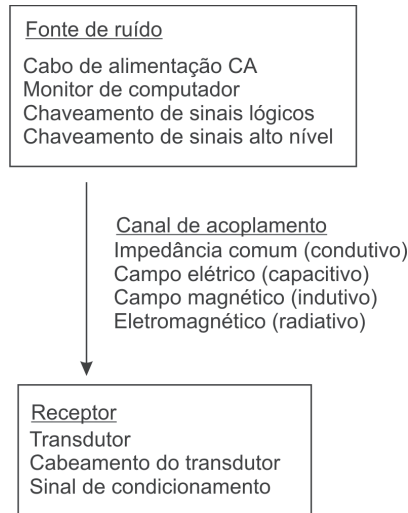


Figura 9.14

Ruído acoplado condutivo

O ruído acoplado condutivo existe porque os condutores da fiação têm um valor de impedância.

O efeito dessa impedância deve ser considerado no projeto do esquema da fiação. O acoplamento condutivo pode ser eliminado ou minimizado pela quebra dos *loops* de terra (se houver) e pelo fornecimento de terras separados para os sinais de baixo nível e alto nível.

A figura 9.15 mostra um esquema de conexão de terra resultando em acoplamento condutivo.

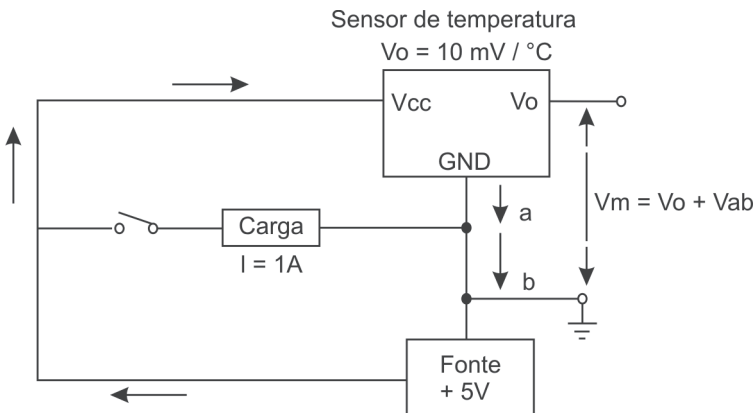


Figura 9.15

Se a resistência do condutor de retorno comum a - b é de $0,1 \, \Omega$, a tensão medida no sensor de temperatura pode sofrer uma variação de $100 \, \text{mV}$ ($0,1 \, \Omega \times 1 \text{A}$), dependendo da posição da chave. Isso causará um erro de $10 \, ^\circ\text{C}$ na medição da temperatura.

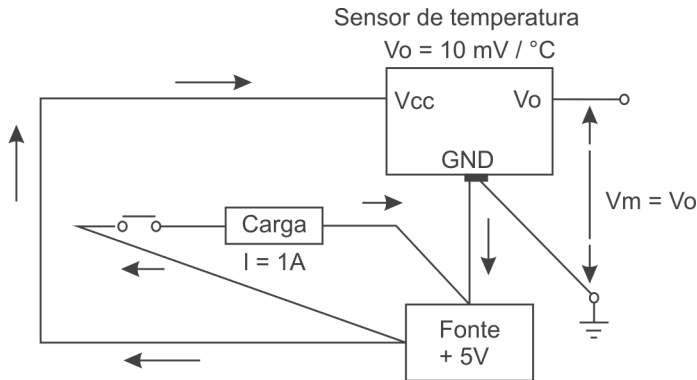


Figura 9.16

A figura 9.16 mostra o esquema dos circuitos de terra separados. Desta forma, a saída do sensor de temperatura não varia em função da corrente.

Acoplamento capacitivo e indutivo

A interação dos campos elétricos e magnéticos entre sinal e ruído é descrita matematicamente pelas complexas equações de Maxwell. Entretanto, os circuitos equivalentes podem ser utilizados para um entendimento intuitivo e qualitativo.

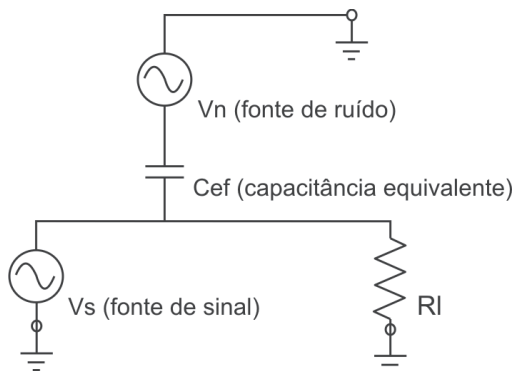


Figura 9.17

A figura 9.17 mostra o circuito equivalente do acoplamento capacitivo entre o sinal e o ruído.

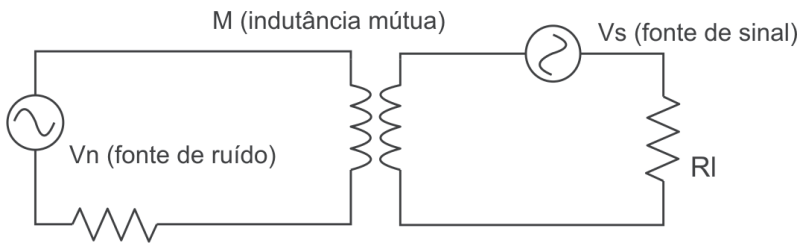


Figura 9.18

A figura 9.18 mostra o circuito equivalente do acoplamento indutivo entre o sinal e o ruído.

A representação dos circuitos equivalentes contraria duas regras básicas na análise de circuitos elétricos: o confinamento dos campos elétricos no interior de capacitores e campos magnéticos no interior de indutores.

Acoplamento capacitivo

O campo elétrico é modelado como uma capacitância entre os circuitos de sinal e ruído. A capacitância equivalente C_{ef} é diretamente proporcional à área de sobreposição e inversamente proporcional à distância entre os circuitos de sinal e ruído. Desta forma, o aumento da distância ou a diminuição da sobreposição entre os circuitos minimizam C_{ef} .

O nível do acoplamento capacitivo é diretamente proporcional à frequência e amplitude da fonte de ruído e à impedância do circuito receptor. Então, o acoplamento capacitivo pode ser minimizado através da redução de tensão ou frequência na fonte de ruído ou reduzindo a impedância do circuito do sinal.

A blindagem capacitiva também reduz a capacitância C_{ef} , desviando ou fornecendo outro caminho para a corrente induzida no circuito do sinal. A blindagem deve ser colocada entre os condutores acoplados capacitivamente e conectada ao terra somente no lado da fonte do sinal. O aterramento em ambas as terminações da blindagem causa o fluxo de *loops* de terra.

A figura 9.19 mostra a forma imprópria de aterramento na blindagem e a figura 9.20 mostra a forma correta de aterramento na blindagem.

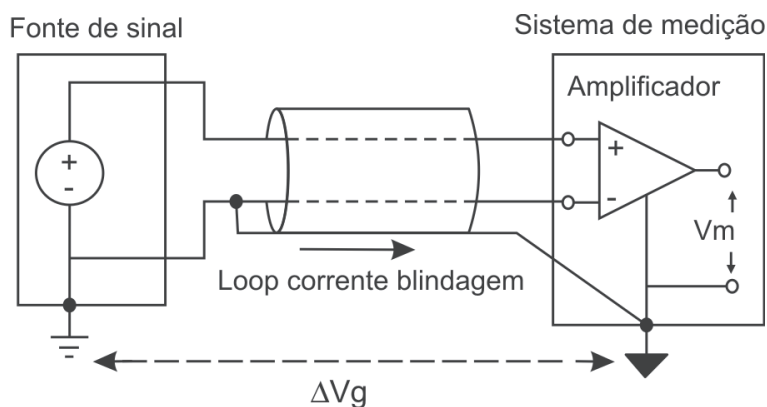


Figura 9.19

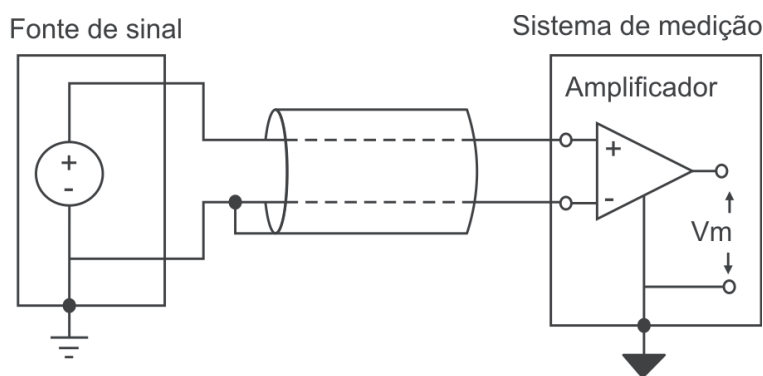


Figura 9.20

Acoplamento indutivo

O acoplamento indutivo resulta da variação no tempo dos campos magnéticos na área de abrangência do circuito do sinal. Esses campos magnéticos são gerados pelas correntes no circuito do ruído.

A tensão induzida V_n no circuito do sinal é fornecida pela fórmula:

$$V_n = 2 \Pi f B A \cos \phi$$

f : frequência da densidade de fluxo variável;

B : valor *rms* da densidade de fluxo;

A : área do loop no circuito do sinal;

ϕ : ângulo entre B e A .

Em termos da indutância mútua M , V_n é fornecida pela fórmula:

$$V_n = 2 \pi f M I_n$$

I_n : valor *rms* da corrente senoidal no circuito do ruído;

f : frequência de I_n .

A indutância mútua M é diretamente proporcional à área do *loop* no circuito receptor e inversamente proporcional à distância entre o circuito fonte do ruído e o circuito do sinal. Desta forma, o aumento na separação entre os circuitos ou a redução da área do *loop* no circuito do sinal minimizará o acoplamento indutivo.

A redução da corrente I_n no circuito do ruído reduz o acoplamento indutivo. A densidade de fluxo no circuito do ruído é minimizada com a utilização de fiação trançada no circuito do ruído.

O acoplamento indutivo é minimizado com a utilização de blindagem magnética.

A blindagem contra campos magnéticos de baixa frequência não é tão simples quanto a blindagem contra campos elétricos. A eficiência da blindagem magnética depende do tipo de material (permeabilidade magnética e espessura) e da frequência.

O aço é mais eficiente do que o alumínio e o cobre na blindagem magnética em baixas frequências. Em altas frequências, o alumínio e o cobre são mais eficientes.

Acoplamento radiativo

O acoplamento radiativo de fontes radiantes, tais como estações de rádio e TV, é considerado fonte de interferência para sistemas de medição em

baixa frequência (< 100 kHz). O ruído de alta frequência pode ser retificado e introduzido em circuitos de baixa frequência através de um processo chamado de retificação de áudio. O processo resulta de junções não lineares de circuitos integrados atuando como retificadores.

A retificação de áudio pode ser minimizada com a utilização de filtros passa-baixo passivos.

Sistemas balanceados

Um circuito balanceado compreende os seguintes critérios:

- A ponte é balanceada – os terminais da fonte (sinal alto e sinal comum) têm impedância igual em relação ao terra;
- O cabo é balanceado – ambos os condutores têm a mesma impedância para terra;
- O receptor é balanceado – ambos os terminais do sistema de medição têm a mesma impedância para terra.

Em um circuito balanceado, o acoplamento capacitivo é minimizado porque a tensão induzida de ruído é a mesma em ambos os condutores (impedâncias iguais para terra e fonte do ruído).

A figura 9.21 mostra o modelo do circuito de ruído por acoplamento capacitivo.

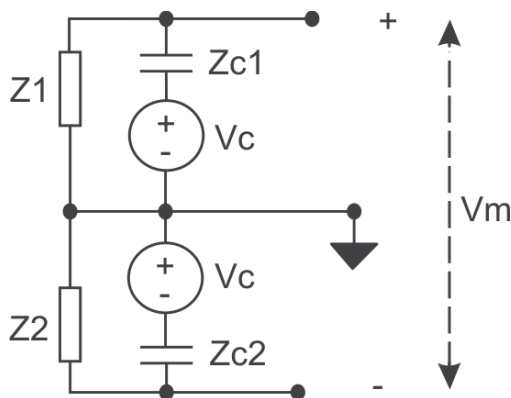


Figura 9.21

Para um sistema balanceado, as seguintes condições são aplicadas ao modelo:

$$Z1 = Z2 \text{ e } Zc1 = Zc2$$

Para o caso de $V(+) = V(-)$, a tensão V_c aparece como um sinal de modo comum. Se o sistema for desbalanceado ($Z1 \neq Z2$ e $Zc1 \neq Zc2$), a tensão V_c aparece como um sinal diferencial [$V(+) \neq V(-)$].

Um amplificador de instrumentação (amplificador de sinal) não pode rejeitar esse sinal. Quanto maior o desbalanço no sistema ou o descasamento de impedância para terra, maior será o componente diferencial do ruído acoplado capacitivamente.

Condutores de pares trançados ou pares trançados blindados são exemplos de cabos balanceados. O cabo coaxial não é balanceado porque os dois condutores têm diferentes capacitâncias para terra.

Cabeamento para sistemas de medição

Os cabos fornecidos com a maioria dos sistemas de aquisição de dados são do tipo flat (feixe plano), com um condutor para cada pino do conector I/O de dados. Esses cabos não têm condutores de retorno separado para cada sinal, causando interferência devido ao acoplamento indutivo e capacitivo. O cabo flat é utilizado para conectar sinais de baixa impedância em entradas diferenciais e pequenas distâncias ($\approx 0,5$ m).

O projeto de cabeamento para sistemas de medição com minimização das interferências por ruído compreende:

- Utilizar par trançado blindado para cada entrada analógica assumindo que a configuração de entrada diferencial é utilizada. A blindagem em cada par do sinal deve estar conectada ao referencial de terra na fonte. Observar que a frequência operacional desse cabo é até 100 kHz; A capacitância do cabo não deve ser desprezada em circuitos de alta impedância. O cabo coaxial possui menor capacitância e impedância característica mais uniforme, tornando-o preferencial para o uso em frequência superior a 100 kHz;

- Providenciar (se possível) um retorno separado para cada sinal;
- Rotear separadamente o sinal analógico e as linhas de retorno de qualquer controle digital ou linhas de estado. Utilizar cabecamentos separados para sinais digitais e analógicos. Se for usado um cabo flat para ambos os tipos de sinais, dividir simetricamente por tipo;
- Separar retornos de terra de circuitos ruidosos de alta potência (chaveamento, motor, relê) de retornos de terra de sinais baixo nível;

Outros aspectos que devem ser considerados:

- Os cabos de sinais não devem ser instalados junto aos cabos de alimentação CA ou de potência;
- Os campos magnéticos e elétricos causados por motores elétricos, equipamentos de solda, disjuntores e transformadores, são eliminados quando os condutores do sinal estão instalados em conduítes de metal.
- A blindagem comum envolvendo sinais analógicos e digitais deve ser evitada em sistemas desbalanceados porque o ruído de acoplamento capacitivo não está na forma de tensão de modo comum. A blindagem comum pode ser utilizada em sistemas balanceados porque o ruído de acoplamento capacitivo aparece na forma de tensão de modo comum. A blindagem deve ser conectada ao terra somente em uma terminação. Deixar a blindagem flutuante (nenhuma conexão ao terra) é pior do que utilizar cabos comuns (sem blindagem).

Os espaçadores podem ser utilizados para manter separação mínima entre cabos paralelos.

- A redução de impedâncias para sinais de tensão minimiza o acoplamento capacitivo.

Solução de problemas causados por ruído em sistemas de medição

A solução de problemas por ruído em sistemas de medição deve iniciar pela localização da causa da interferência. O próprio sistema de aquisição de

dados deve ser verificado quanto à presença de baixas frequências e nível do ruído. Isso pode ser feito curto-circuitando os sinais de nível alto e nível baixo para a entrada analógica de terra, preferencialmente no conector I/O do sistema de aquisição de dados.

Se o nível do ruído medido for superior ao conjunto do sistema (aquisição de dados + cabeamento + fontes de sinal), então o próprio sistema de aquisição de dados é o responsável pela geração de ruído.

Monitores de computador são sempre suspeitos de gerar ruído. Para medição de sinal em baixo nível, o monitor deve estar o mais afastado possível do cabeamento de sinal e do computador.

Técnicas de processamento de sinal para redução do ruído

As técnicas de processamento de sinal não são substitutas de um sistema de interconexão apropriado, mas podem ser aplicadas para a redução de ruído. Todas essas técnicas conduzem para a melhoria da relação sinal-ruído. Em termos gerais, podem ser classificadas como medidas de pré-aquisição e pós-aquisição. Exemplos de técnicas de pré-aquisição são os vários tipos de filtragem (passa-baixo, passa-alto ou passa-banda) para reduzir o ruído extra no sinal. As técnicas de pós-aquisição são aplicadas como filtragem digital.

Para aqueles que desejarem se aprofundar nas técnicas de processamento de sinal para redução de ruído são indicados os livros de Henry W. Ott e John R. Barnes que fazem parte das referências deste trabalho.

10

Ruído em sinais digitais

Os sinais analógicos podem ter um conjunto infinito de valores num intervalo de tempo qualquer enquanto os sinais digitais possuem apenas um conjunto limitado de valores.

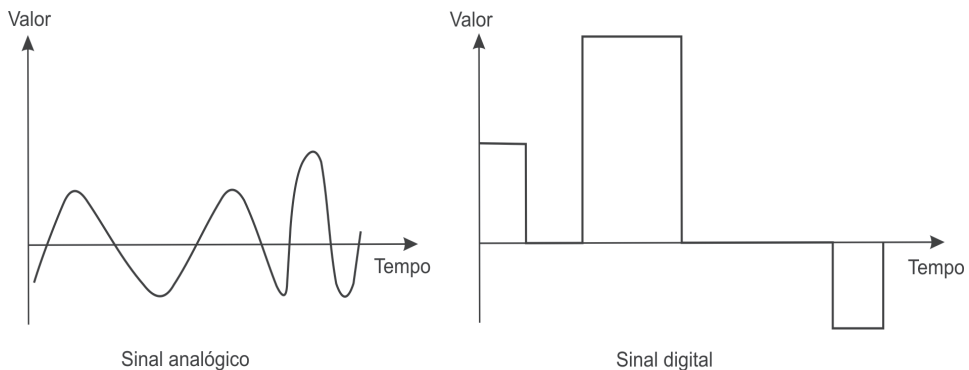


Figura 10.1 - Representação de sinal analógico e sinal digital

Sinais periódicos e não periódicos:

- O sinal periódico completa um padrão dentro de um período de tempo;
- Os sinais analógicos e os sinais digitais podem ser periódicos;

- A comunicação de dados típica utiliza sinais analógicos periódicos e sinais digitais não periódicos.

Sinal analógico composto: de acordo com a análise de Fourier, qualquer sinal composto é uma combinação de ondas senoidais simples de diferentes frequências. A figura a seguir mostra um exemplo de sinal analógico composto periódico.

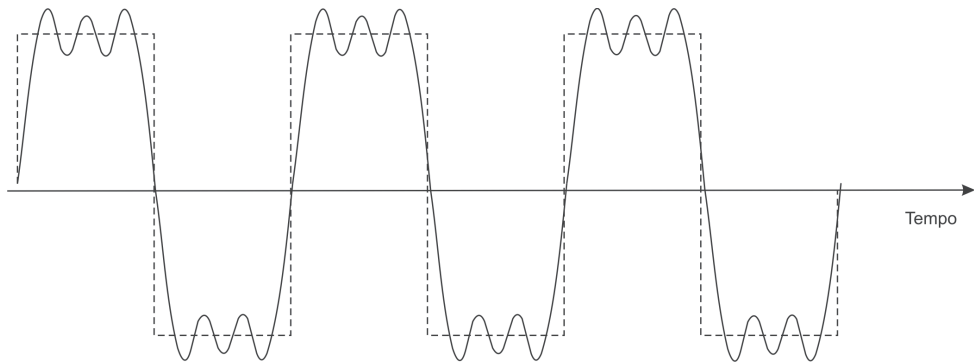


Figura 10.2 - Exemplo de sinal analógico composto periódico

Normalmente a representação de sinais digitais é feita com dois níveis. Entretanto, os sinais digitais podem conter uma quantidade de níveis (desde que seja finita). Um exemplo é a modulação por código de pulso (PCM).

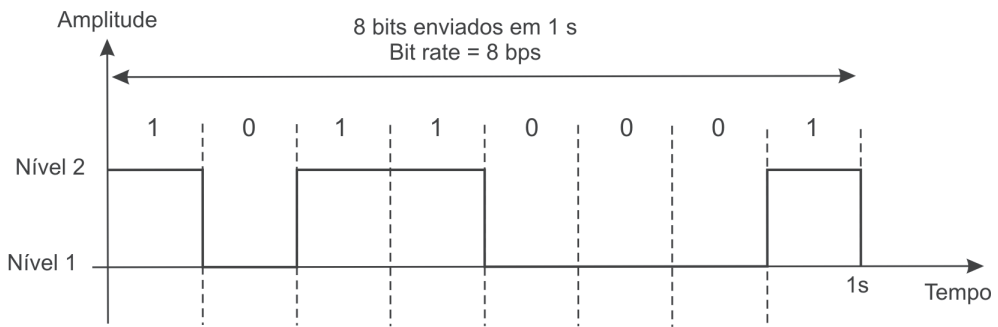


Figura 10.3 - Sinal digital com dois níveis

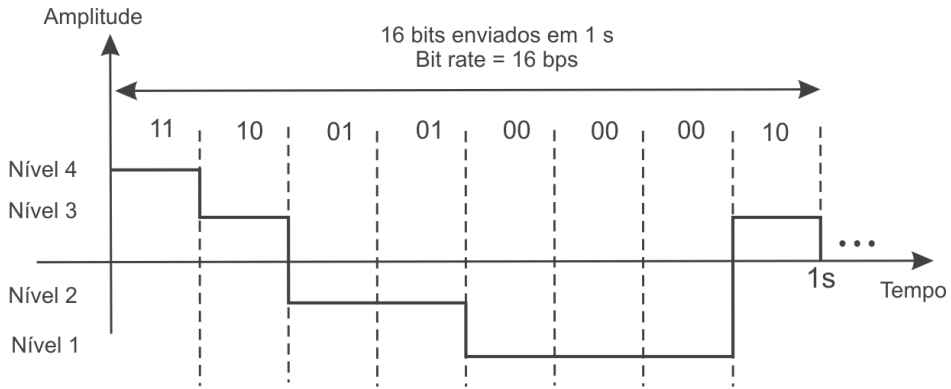


Figura 10.4 - Sinal digital com quatro níveis

Causas da perda na transmissão:

- Atenuação- sinal perde energia, mas não existe deformação; em cabos metálicos é decorrente da perda por calor;
- Distorção- significa que o sinal muda de forma ou formato; pode ocorrer num sinal composto com diversas frequências;
- Ruído- afeta geralmente o meio de transmissão; existem vários tipos de ruído.

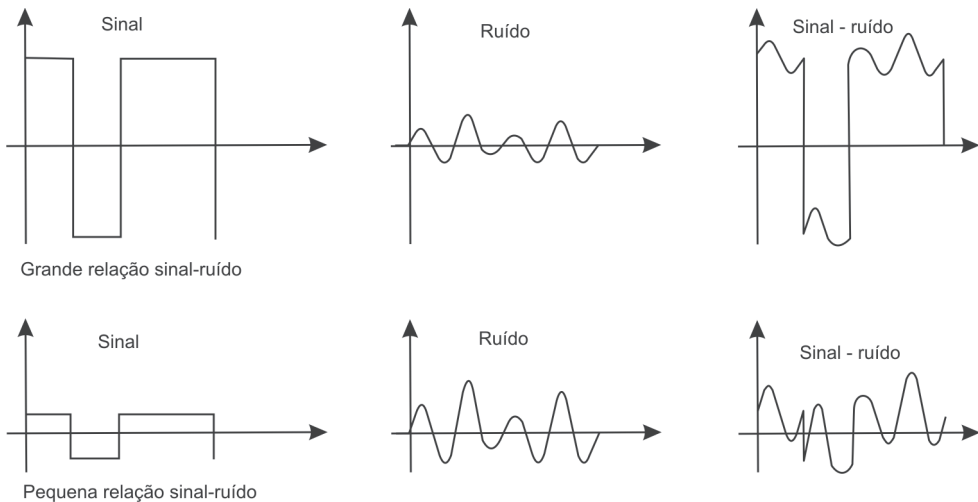


Figura 10.5 - Ruído em sinal digital

Taxa de transmissão de dados

A taxa de transmissão de dados considera o canal sem ruído – fórmula de Nyquist: $Tf = 2 \times \text{largura de banda} \times \text{quantidade de bits por nível}$. Ou seja: $Tf \times Tr = 2 \times \text{largura de banda} \times \log_2 \text{Níveis}$.

A taxa de transmissão de dados máxima real considera o canal com ruído – fórmula de Shannon: Capacidade do meio = largura de banda $\times \log_2 (1 + \text{SNR})$. SNR é a relação sinal ruído.

Tipos de transmissão de dados

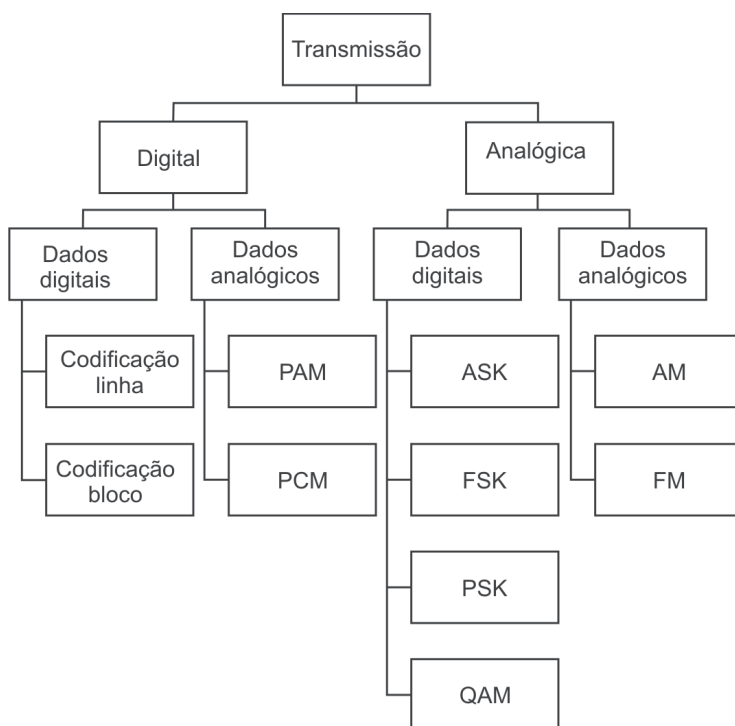


Figura 10.6 - Tipos de transmissão de dados

Características de circuitos digitais

Circuitos integrados (CIs) digitais são conjuntos de resistores, diodos e transistores fabricados em um único pedaço de material semicondutor (geralmente silício), denominado substrato e conhecido como chip. O chip é

confinado em um encapsulamento protetor plástico ou cerâmico, a partir do qual saem pinos para conexão do CI com outros dispositivos.

CIs digitais são muitas vezes classificados de acordo com a complexidade de seus circuitos, que é medida pelo número de portas lógicas equivalentes no seu substrato. Existem atualmente seis níveis de complexidade que são normalmente definidos conforme é mostrado na tabela a seguir.

Complexidade	Portas por chip
Integração em pequena escala (SSI)	Menor do que 12
Integração em média escala (MSI)	12 a 99
Integração em larga escala (LSI)	100 a 9999
Integração em escala muito larga (VLSI)	10 000 a 99 999
Integração em escala ultra (ULSI)	100 000 a 999 999
Integração em escala giga (GSI)	1 000 000 ou mais

Nos sistemas digitais, dispositivos com grau médio de integração (MSI) e com alto grau de integração (LSI, VLSI, ULSI e GSI) realizam a maior parte das funções que antes eram implementadas por várias placas de circuito impresso cheias de dispositivos SSI. Entretanto, os chips SSI ainda são usados como “interface”, ou “ponte” entre os chips mais complexos.

CIs digitais também podem ser classificados de acordo com o principal tipo de componente eletrônico usado nos seus circuitos. CIs bipolares são aqueles fabricados utilizando transistores bipolares de junção (NPN e PNP) como seu principal elemento de circuito. CIs unipolares são aqueles que usam transistores unipolares por efeito de campo (MOSFETs canal P e canal N) como seu elemento principal. A família TTL (lógica transistor-transistor) tem sido a principal família de CIs digitais bipolares nos últimos 40 anos. A série 74 padrão foi a primeira série de CIs TTL. Ela não é mais usada em novos projetos, tendo sido substituída por várias séries TTL de alta performance, mas a configuração básica do seu circuito é a base de todas as séries de CIs TTL. A família CMOS (semicondutor de oxido metálico complementar) faz parte de uma classe de CIs digitais unipolares porque usa MOSFETs canal P e canal N como elemento principal do circuito.

A família lógica TTL consiste de várias subfamílias ou séries. Os CIs têm um número de identificação que inicia com 74. Os CIs que pertencem à série TTL Schottky de baixa potência têm seu número de identificação começando por 74LS. O 74LS02, o 74LS38 e o 74LS123 são exemplos de dispositivos da série 74LS. As diferenças entre as séries TTL consistem nas características elétricas: dissipação de potência e velocidade de chaveamento (comutação). Elas não diferem na disposição dos pinos ou na operação lógica realizada pelo circuito interno. Por exemplo, o 7404, o 74S04, o 74LS04 e o 74ALS04 são todos CIs com seis inversores cada um.

Séries TTL	Prefixo	Exemplo de CI
TTL padrão	74	7404 (inversor sêxtuplo)
TTL Schottky	74S	74S04 (inversor sêxtuplo)
TTL Schottky baixa potência	74LS	74LS04 (inversor sêxtuplo)
TTL Schottky tecnologia avançada	74AS	74AS04 (inversor sêxtuplo)
TTL Schottky tecnologia avançada e baixa potência	74ALS	74ALS04 (inversor sêxtuplo)

Várias séries CMOS disponíveis estão relacionadas na tabela a seguir. A série 4000 é a mais antiga e possui muitas das funções lógicas da família TTL, mas não foi projetada para ser compatível pino a pino com os dispositivos TTL. Por exemplo, o chip quádruplo NOR 4001 contém quatro portas NOR de duas entradas, assim como o chip TTL 7402, mas as entradas e saídas das portas do chip CMOS não têm a mesma pinagem que os sinais correspondentes no chip TTL.

Séries CMOS	Prefixo	Exemplo de CI
CMOS de porta metálica	40	4001 (NOR quádruplo)
CMOS porta metálica; pinagem compatível TTL	74C	74C02 (NOR quádruplo)
CMOS porta silício; alta velocidade; pinagem compatível TTL	74HC	74HC02 (NOR quádruplo)
CMOS porta silício; alta velocidade; pinagem e parâmetros compatíveis TTL	74HCT	74HCT02 (NOR quádruplo)
CMOS de alta performance	74AC	74AC02 (NOR quádruplo)
CMOS de alta performance; pinagem não compatível TTL parâmetros elétricos compatíveis TTL	74ACT	74ACT02 (NOR quádruplo)

As séries 74C, 74HC, 74HCT, 74C e 74CT são as mais recentes das famílias CMOS. As três primeiras são compatíveis pino a pino com os dispositivos TTL de mesma numeração. Por exemplo, o 74C02, o 74HC02 e o 74HCT02 possuem a mesma pinagem que o 7402, 74LS02, e assim por diante. A série 74HCT foi projetada para ser eletricamente compatível com dispositivos TTL; ou seja, um circuito integrado 74HCT pode ser diretamente conectado a dispositivos TTL sem que seja necessário nenhum circuito de interface. As séries 74AC e 74ACT são CIs de altíssimo desempenho. Nenhum deles é compatível pino a pino com TTL. Os dispositivos 74AC são eletricamente compatíveis com TTL.

As conexões mais importantes são as de alimentação CC e terra. O pino de alimentação é denominado V_{CC} para o circuito TTL e V_{DD} para o circuito CMOS. Muitos dos circuitos integrados CMOS recentes, projetados para serem compatíveis com o circuito integrado TTL, também usam a designação V_{CC} para o pino de alimentação. Caso a conexão de alimentação ou GND não seja feita, as portas lógicas no chip não vão responder adequadamente às entradas lógicas, e ele não fornecerá os níveis lógicos de saída esperados.

Para dispositivos TTL, V_{CC} é de +5 V (nominal). Para dispositivos CMOS, V_{DD} pode estar situado na faixa que vai de +3 a +18 V, embora +5 V seja a tensão mais usada, principalmente quando dispositivos CMOS são usados em um mesmo circuito, em conjunto com dispositivos TTL. Para os dispositivos TTL padrão, as faixas de tensão de entrada aceitável para os níveis lógicos 0 e 1 são definidas como mostrado nas figuras a seguir.

Um nível lógico 0 corresponde a qualquer tensão na faixa de 0 a 0,8 V; um nível lógico 1 corresponde a qualquer tensão na faixa de 2 a 5 V. As tensões fora dessas faixas são denominadas indeterminadas e não devem ser usadas como entrada de qualquer dispositivo TTL. Os fabricantes de CIs não garantem como um circuito TTL responderá a nível de tensão de entrada que esteja na faixa indeterminada (entre 0,8 e 2,0 V).

Para que os circuitos integrados CMOS operem com $V_{DD} = +5$ V, tensões entre 0 e 1,5 V são definidas como sendo nível lógico 0 e tensões na faixa de 3,5 V a 5 V como sendo nível lógico 1. A faixa indeterminada inclui as tensões entre 1,5 V e 3,5 V.

Uma entrada desconectada é frequentemente denominada entrada flutuante. As consequências de uma entrada flutuante são diferentes para circuitos TTL e CMOS. Uma entrada flutuante em um circuito TTL funciona exatamente como se estivesse em nível lógico 1. Em outras palavras, o CI responde como se na entrada tivesse sido aplicado um nível lógico alto. Essa característica é usada quando se testa um circuito TTL. Um técnico poderia deixar determinadas entradas desconectadas em vez de conectá-las ao nível lógico alto. Embora isso seja correto do ponto de vista do nível lógico, não é uma prática recomendada, principalmente no projeto final de circuitos, visto que uma entrada flutuante em um circuito TTL é extremamente suscetível a sinal de ruídos que provavelmente afetará de forma adversa o funcionamento do circuito.

Um voltímetro ou um osciloscópio que esteja medindo uma entrada flutuante em um circuito TTL indicará uma tensão entre 1,4 e 1,8 V_{CC} . Embora esse valor esteja na faixa de nível indeterminado para TTL, ele produzirá a mesma resposta que para um nível lógico 1. Lembre-se de que essa característica de entrada TTL flutuante pode ser valiosa quando estiver fazendo análise de defeito em um circuito TTL.

Se uma entrada de um circuito CMOS for deixada flutuante, pode superaquecer e danificar o CI. Por essa razão, todas as entradas de um circuito CMOS devem ser conectadas a um nível lógico (baixo ou alto) ou à saída de outro CI. A tensão medida em uma entrada CMOS flutuante não apresenta um valor específico, mas varia aleatoriamente em função do ruído captado. Uma entrada CMOS flutuante não funciona como um nível lógico 1 ou um nível lógico 0, portanto seu efeito na saída é imprevisível. Algumas vezes a saída oscila como resultado do ruído captado pela entrada flutuante.

A imunidade à ruído de um circuito digital é a capacidade de manter o funcionamento adequadamente mesmo na presença de ruídos em suas entradas e saídas. Se até um determinado nível de ruído V_n , a lógica do circuito não for comprometida, diz-se que o circuito é imune a ruídos de até um nível de V_n volts. Na figura a seguir, a parte sombreada do ruído compromete o funcionamento da porta. Para a determinação da imunidade ao ruído, deve-se considerar o pior caso, ou seja, o menor valor entre $(V_{OHmin} - V_{IHmin})$ e $(V_{ILmax} - V_{OLmax})$.

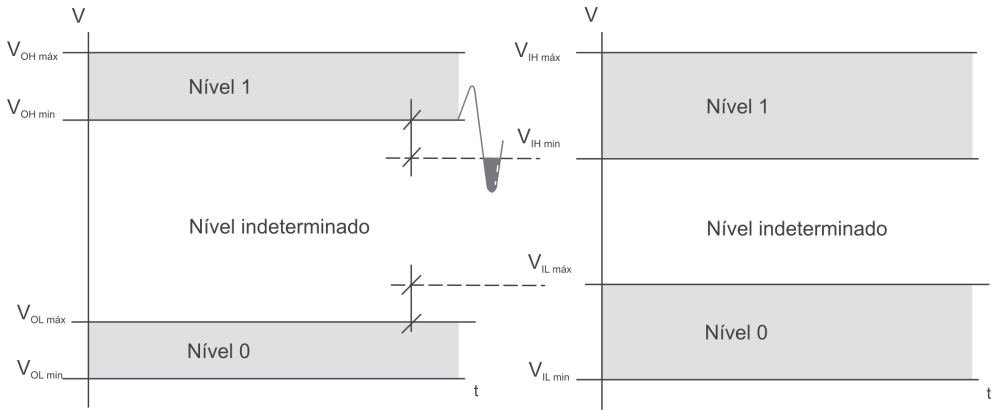


Figura 10.7

Picos de corrente elétrica e campos magnéticos podem induzir tensões nas conexões existentes entre os circuitos lógicos. Tais sinais, indesejados e espúrios, são denominados ruídos. A imunidade ao ruído de um circuito lógico refere-se à capacidade de esse circuito tolerar tensões geradas por ruído em suas entradas, sem alterar o seu funcionamento. A quantidade medida de imunidade ao ruído é denominada margem de ruído. A margem de ruído para o nível alto, V_{NH} , é definida como $V_{NH} = V_{OH} \text{ (mínimo)} - V_{IH} \text{ (mínimo)}$. Para o nível baixo, V_{NL} , é definida como $V_{NL} = V_{IL} \text{ (máximo)} - V_{OL} \text{ (máximo)}$.

Nos circuitos integrados atuais, em que a velocidade de operação é extremamente alta, um pulso de 1ms de duração é considerado longo e pode ser tratado como um pulso CC, levando-se em conta que o circuito responderá normalmente a tal pulso.

Interferência eletromagnética em circuitos digitais

O mecanismo da atuação da interferência eletromagnética (EMI) em sistemas digitais é complexo porque está relacionado com o projeto de integração em larga escala (LSI), projeto da estrutura de pacotes, placa de circuito impresso (PCB), fiação, gabinete e outros fatores. A comutação em LSI é considerada uma fonte intrínseca da EMI. A transmissão de sinal de um chip para outro dentro do mesmo encapsulamento (sistemas integrados) pode ser considerado para excitar dois tipos de fontes de ruído: radiação em modo normal pelo *loop* do sinal de retorno; excitação em modo comum relacionada ao plano terra e provocada pelas correntes de comutação do LSI.

O plano terra opera como uma antena indesejada de frequências ressonantes quando excitado por correntes de comutação. Além disso, outros tipos de ruídos de modo comum são frequentemente produzidos no complexo ambiente de encapsulamento, contribuindo para a radiação eletromagnética.

No caso de um telefone celular, harmônicas de alta frequência são geradas a partir de circuitos integrados digitais. Estas harmônicas são transmitidas através do encapsulamento e PCB. Como resultado, os acoplamentos induzem instabilidade ou degradação de performance no receptor to telefone celular.

Desta forma, é necessário prever a supressão das fontes de EMI durante a fase de projeto dos sistemas integrados, o que pode ser realizado com a separação das fontes de acoplamento. A fonte refere-se à intensidade de ruído que acompanha a operação LSI, enquanto o caminho refere-se aos caminhos de condução e radiação entre sinais ou entre condutores de alimentação.

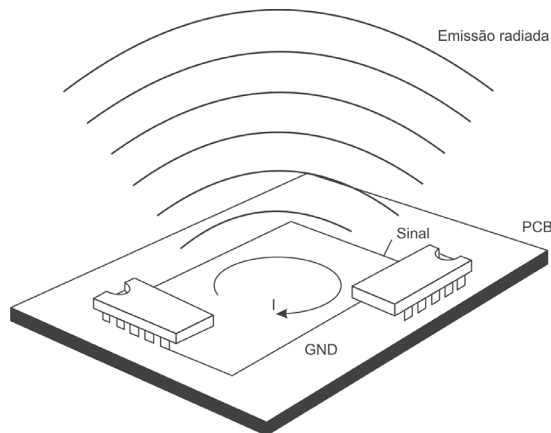


Figura 10.8 - Radiação em modo diferencial na PCB

Regras gerais para a correta implementação de aterramento em sistemas digitais (GND):

- Separar os planos digitais e analógicos. Isso pode ser feito facilmente em placas de circuito impresso com uma ou mais camadas. PCB de simples face possui mais limitações, mas procurar separar a parte analógica da digital;
- Não cruzar o GND analógico com as trilhas de sinais digitais e evitar

cruzar o GND digital com trilhas de sinal analógico. O ideal é que a parte analógica da PCB deve ser totalmente isolada da parte digital em termos de posicionamento;

- Manter planos de terra sólidos. Se a placa possui face dupla ou mais faces, um lado da placa deve ser o polígono de GND. Lembre-se que um fio mais grosso significa menos impedância, implicando em menor radiação devido a quedas de tensão;
- Não alinhar trilhas analógicas com trilhas digitais, pois isso pode gerar fonte de ruído;
- Evitar *loops* de terra. Usar uma conexão de terra comum como estrutura de árvore.

Filtro para supressão de ruídos em alta frequência

O desenvolvimento tecnológico na área dos semicondutores propiciou a utilização de frequências cada vez mais altas nos equipamentos eletrônicos. Frequências maiores do que 500 MHz são típicas em computadores pessoais. No ambiente de operação de alta velocidade, é perfeitamente viável que os pulsos de clock e chaveamentos em circuitos integrados venham a se tornar fontes de ruído. Até mesmo as pistas na placa de circuito impresso podem se comportar como linhas de transmissão devido à indutância parasita induzida. Este tipo de interferência (ruído) pode se propagar por irradiação ou por condução e perturbar outros sistemas eletrônicos.

Para minimizar tais efeitos em equipamentos digitais, duas providências podem ser adotadas: utilização de filtros de EMI para reduzir os ruídos de alta frequência; blindagens para suprimir ruídos de RF. Sabe-se que a geração da EMI em sistemas digitais depende fundamentalmente da disposição dos componentes e do layout da placa, sendo de grande importância o perfeito casamento das características do circuito.

Podemos classificar os circuitos em duas categorias: alta ou baixa impedância. Em circuitos de baixa impedância, o procedimento mais eficiente consiste basicamente em se inserir um indutor ou filtro tipo T em série com a linha. Para circuitos com alta impedância, um capacitor e um filtro em P é o mais indicado.

Outra solução eficiente e de baixo custo é a aplicação de capacitores tipo *feedthrough* (capacitores de passagem). A principal característica das novas gerações de capacitores *feedthrough* é a baixíssima indutância entre a linha de passagem do sinal e o aterramento, que é o fator principal para a efetiva supressão de ruídos na faixa de alta frequência. Os capacitores convencionais multicamadas não são apropriados para esta aplicação, pois apresentam alta indutância parasita induzida no plano terra – até quatro vezes maior que a exibida pelos capacitores *feedthrough* – o que resulta em uma frequência de ressonância série bem menor.

Principais benefícios do capacitor *feedthrough*:

- Habilidade para suprimir ruídos em alta frequência que não podem ser suprimidos por capacitores convencionais;
- Grande atenuação em decorrência da baixa indutância parasita para o terra;
- Excelente coeficiente de temperatura.

Os capacitores *feedthrough* são constituídos por um bloco retangular de dielétrico cerâmico dentro do qual estão inseridos, em camadas entrelaçadas, lâminas de um metal. O objetivo desta estrutura é conferir um alto valor de capacitância por unidade de volume. Estas lâminas internas estão conectadas a duas terminações – banhadas em prata. Externamente uma camada condutora atua como passagem do sinal.

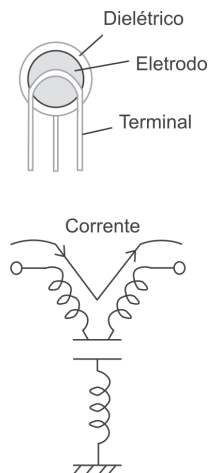
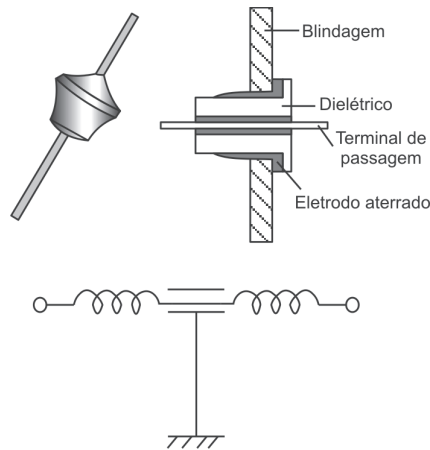


Figura 10.9 - Capacitor de três terminais


 Figura 10.10 - Capacitor *feedthrough* (de passagem)

Redução de ruído em medição

Rejeição de tensão CC em modo comum

Realizar medições precisas implica em leituras diferenciais. Um dispositivo ideal de medições diferenciais lê apenas a diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo do seu amplificador de instrumentação. Entretanto, os dispositivos práticos são limitados na habilidade de rejeitar tensões em modo comum. Tensão em modo comum é a tensão comum a ambos os terminais, positivo e negativo do amplificador de instrumentação.

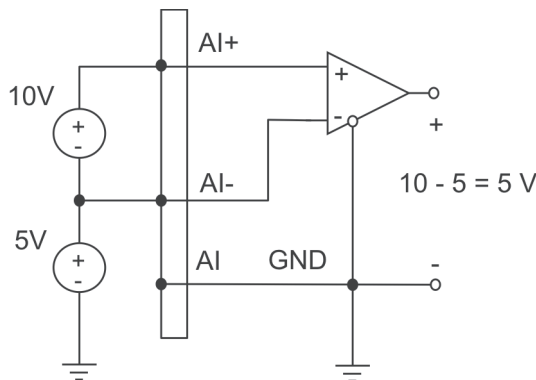


Figura 10.11 - Amplificador de instrumentação ideal rejeita completamente tensões em modo comum

Na figura 10.11 a tensão 5 V é comum para os terminais AI+ e AI-, e o dispositivo ideal indica os 5 V que resultam da diferença entre os dois terminais.

A tensão de trabalho máxima de um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) refere-se ao sinal de tensão somado à tensão em modo comum e especifica o maior potencial que pode existir entre uma entrada e o terra. A tensão de trabalho máxima para a maioria dos dispositivos DAQ é a mesma que a faixa de entrada do amplificador de instrumentação. Por exemplo, dispositivos DAQ de baixo custo têm uma tensão de trabalho máxima de 11 V; nenhum sinal de entrada pode ultrapassar 11 V sem causar dano ao amplificador.

A isolamento pode aumentar drasticamente a tensão de trabalho máxima de um dispositivo DAQ. No contexto de um sistema de medição, “isolação” significa separação física e elétrica de duas partes de um circuito. Um isolador passa dados de uma parte do circuito para a outra sem conduzir eletricidade. Como a corrente não pode fluir através da barreira de isolamento, o nível de referência do dispositivo DAQ pode ser alterado para um nível diferente do terra. Isso desacopla a especificação de tensão máxima de trabalho da faixa de entrada do amplificador.

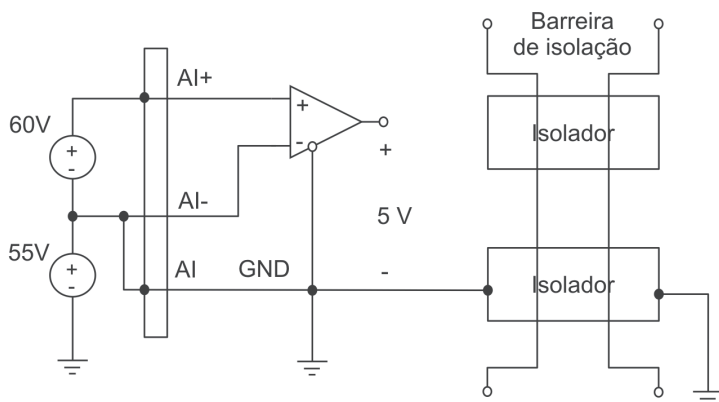


Figura 10.12 - A isolamento separa eletricamente o terra de referência do amplificador de instrumentação do terra geral

Enquanto a faixa de entrada é a mesma que na figura 10.11, a tensão de trabalho foi estendida para 60 V, rejeitando 55 V da tensão de modo comum. A tensão de trabalho máxima é definida pela isolamento do circuito, ao invés da faixa de entrada do amplificador.

O teste de célula de combustível é um exemplo de aplicação que requer rejeição de altas tensões CC em modo comum. Cada célula individualmente pode gerar aproximadamente 1 V, mas uma pilha de células pode produzir vários kV. Para medir com exatidão a tensão de uma única célula de 1 V, o dispositivo de medição deve estar preparado para rejeitar a alta tensão em modo comum gerada pelo restante da pilha.

Rejeição de tensão CA em modo comum

Raramente tensões em modo comum consistem apenas de um nível CC. A maior parte das fontes de tensão em modo comum contém componentes CA somadas ao nível CC. O ruído é inevitavelmente acoplado ao sinal medido por meio do ambiente eletromagnético ao redor. Isto é particularmente problemático para sinais analógicos de nível baixo passando pelo amplificador de instrumentação do dispositivo DAQ.

As fontes de ruído CA podem ser classificadas em geral pelos seus mecanismos de acoplamento – capacitivo, indutivo ou radiado. Acoplamentos capacitivos resultam de uma variação temporal de campos elétricos, como aquelas causadas por aproximação de relés ou outros sinais de medição. Ruídos de acoplamento indutivo ou magnético resultam de uma variação temporal de campos magnéticos, semelhante àquelas causadas por aproximação de máquinas ou motores.

Se a fonte de campo eletromagnético está longe do circuito de medição, como a iluminação fluorescente, o acoplamento dos campos magnético e elétrico é considerado eletromagnético combinado ou acoplamento radiado. Em todos os casos, uma tensão em modo comum variável no tempo é acoplada ao sinal de interesse, na maior parte dos casos na faixa de 60 Hz.

Um circuito de medição ideal tem um caminho perfeitamente balanceado para ambos os terminais, positivo e negativo, do amplificador de instrumentação. Tal sistema rejeitaria completamente qualquer ruído com acoplamento CA. Um dispositivo prático, entretanto, especifica o grau de tensão em modo comum que ele pode rejeitar com uma relação de rejeição de modo comum (CMRR). A CMRR é a razão entre ganho do sinal medido e o ganho do modo comum aplicado ao amplificador, como mostra a seguinte equação:

$$CMR = \frac{Ganho(V_{\text{sinal}})}{Ganho(V_{\text{comum}})}$$