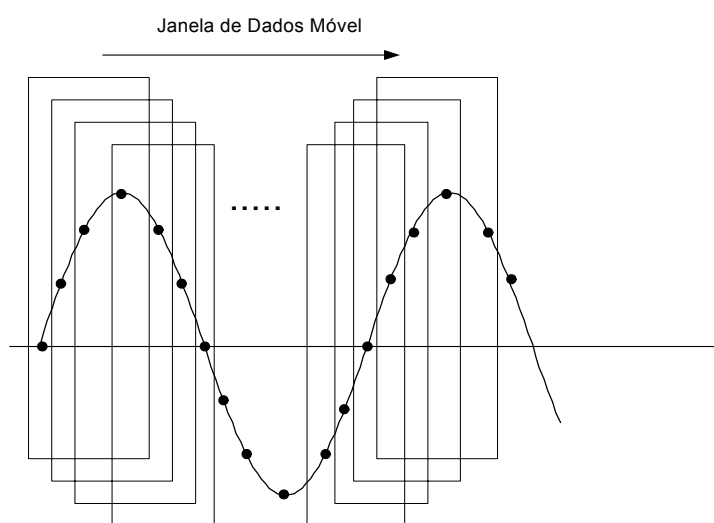




CURSO DE PROTEÇÃO

NOÇÕES DE PROTEÇÃO DIGITAL



Edição 5 - 2008

5	Retirada do anexo – base matemática	30/04/2008	Virtus		P. Maezono
4	Inclusão de exemplo comercial e impactos	22/11/2004	Virtus		P. Maezono
3	Revisão	30/10/2004	Virtus		P. Maezono
2	Correções	01/11/2002	Virtus		P. Maezono
1	Emissão	18/10/2002	Virtus		P. Maezono
Edição	MODIFICAÇÃO	DATA	POR	DATA	APROV.
 <i>Consultoria e Serviços Ltda.</i>		CLIENTE  ENGENHARIA E SISTEMAS			
PROJETO CURSO DE PROTEÇÃO		DETALHE Noções de Proteção Digital			
<i>Direitos Reservados:</i> Virtus Consultoria e Serviços Ltda.		<i>Autor:</i> Paulo Koiti Maezono	<i>Instrutores:</i> Paulo Koiti Maezono	Total de Páginas 93	

SOBRE O AUTOR

Eng. Paulo Koiti Maezono

Formação

Graduado em engenharia elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1969. Mestre em Engenharia em 1978, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, com os créditos obtidos em 1974 através do Power Technology Course do P.T.I – em Schenectady, USA. Estágio em Sistemas Digitais de Supervisão, Controle e Proteção em 1997, na Toshiba Co. e EPDC – Electric Power Development Co. de Tokyo – Japão.

Engenharia Elétrica

Foi empregado da CESP – Companhia Energética de São Paulo no período de 1970 a 1997, com atividades de operação e manutenção nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos, Supervisão e Automação de Subestações, Supervisão e Controle de Centros de Operação e Medição de Controle e Faturamento. Participou de atividades de grupos de trabalho do ex GCOI, na área de proteção, com ênfase em análise de perturbações e metodologias estatísticas de avaliação de desempenho.

Atualmente é consultor e sócio da Virtus Consultoria e Serviços S/C Ltda. em São Paulo – SP. A Virtus tem como clientes empresas concessionárias, empresas projetistas na área de Transmissão de Energia, fabricantes e fornecedores de sistemas de proteção, controle e supervisão, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Instituto Presbiteriano Mackenzie.

Área Acadêmica

Foi professor na Escola de Engenharia e na Faculdade de Tecnologia da Universidade Presbiteriana Mackenzie no período de 1972 a 1987. É colaborador na área de educação continuada da mesma universidade, de 1972 até a presente data.

Foi colaborador do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, desde 1999 até 2002, com participação no atendimento a projetos especiais da Aneel, Eletrobrás e Concessionárias de Serviços de Eletricidade.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	5
2. SITUAÇÃO NO BRASIL	6
3. COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS	9
3.1 TECNOLOGIAS EMPREGADAS EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO	9
3.2 TECNOLOGIA ELETROMECHANICA	9
3.3 TECNOLOGIA MISTA	11
3.4 TECNOLOGIA ESTÁTICA	12
3.5 TECNOLOGIA DIGITAL	14
4. CONFIGURAÇÃO BÁSICA E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	17
4.1 BLOCOS FUNCIONAIS	17
4.2 BLOCO DE CONVERSÃO DE SINAIS ANALÓGICOS EM DADOS DIGITAIS	20
4.2.1 Filtro Anti-Aliasing	21
4.2.2 Circuito Sample & Hold (S/H)	28
4.2.3 Multiplexador	30
4.2.4 Unidade Conversora A/D	31
4.3 BLOCO DE PROCESSAMENTO ARITMÉTICO	38
5. NOÇÕES BÁSICAS DE FILTRAGEM DIGITAL E ALGORITMOS	40
5.1 IDÉIA DA FILTRAGEM DIGITAL	40
5.2 IDÉIA DE ALGORITMOS COM BASE EM SENÓIDES	43
5.2.1 Cálculo de Defasamento	43
5.2.2 Cálculo da Amplitude	44
5.2.3 Cálculo da Diferença de Ângulo de Fase	48
5.2.4 Alguns Algoritmos para Características de Impedâncias	50
6. PROCESSOS DE FILTRAGEM E ALGORITMOS.....	52
6.1 CONCEITOS BÁSICOS	52
6.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	52
6.3 ALGORITMOS DE FOURIER E DERIVADOS	54
6.4 FILTRO DE WALSH	62
6.5 FILTRO KALMAN	63
6.6 TEMPO DE RESPOSTA NUM FILTRO DIGITAL	63
6.7 FILTRAGEM DE COMPONENTE DC	64
6.8 TEMPO DE OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO E A TAXA DE AMOSTRAGEM	66
6.9 ALGORITMOS NÃO FASORIAIS	67
6.9.1 Equações Diferenciais no Domínio do Tempo	67
6.9.2 Ondas Trafegantes	69
7. EXEMPLO DE UM RELÉ DIGITAL COMERCIAL E SEUS RECURSOS	70
7.1 CONVERSÃO A/D	70
7.2 FILTROS DIGITAIS	71
7.3 FILTRAGEM ADAPTATIVA	72
8. IMPACTOS DA TECNOLOGIA DIGITAL EM PROJETOS, INSTALAÇÕES E NA OPERAÇÃO.	73
8.1 INSTALAÇÕES E PROJETOS	73
8.1.1 Substituição de Equipamentos “Stand Alone” por Funções Digitais	73

8.1.2	<i>Sistemas de Comando e Controle por Lógicas Embutidas em Relés ou Outros Dispositivos Eletrônicos Inteligentes</i>	74
8.1.3	<i>Disponibilidade de Novas Funções de Proteção</i>	74
8.1.4	<i>Constatações</i>	75
8.2	OPERAÇÃO	77
8.2.1	<i>Integração com a Supervisão</i>	77
8.2.2	<i>Acesso Remoto</i>	77
8.2.3	<i>Constatação</i>	78
9.	CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO DA PROTEÇÃO DIGITAL	79
9.1	SISTEMAS DE AUTO VERIFICAÇÃO, MONITORAMENTO CONTÍNUO E AUTO-TESTE	79
9.2	CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE RELÉS DIGITAIS	83
9.3	MANUTENÇÃO DE RELÉS DIGITAIS	89
9.4	EXEMPLO DE PERIODICIDADE DE INTERVENÇÃO NA PROTEÇÃO	90
10.	BIBLIOGRAFIA	93

1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 60 tem-se pensado no uso de computadores digitais na proteção de sistemas elétricos de potência. As primeiras funções pensadas para serem executadas através de computadores foram aquelas efetuadas através dos centros de operação como, por exemplo, rejeição de carga e de detecção de oscilação de potência [1]. Na época, toda a pesquisa relativa a proteção através de computadores estava baseada em minicomputadores. A pesquisa relativa a algoritmos de proteção, que já vinha sendo estudada desde os anos 50 pelos primeiros visionários, começou a ter avanço significativo nos anos 70. Salienta-se que nos EUA, o comitê de relés para Sistemas de Potência do IEEE, estabeleceu o “Computer Relaying Subcommittee” no ano de 1971 que trabalhou no período 1971-1978 [1].

No fim dos anos 70, com o relativo avanço dos microprocessadores, já era dominante a idéia de se utilizar sistemas específicos apenas para proteção.

Com o desenvolvimento de microprocessadores de alguma capacidade de processamento e com o barateamento dos mesmos, a área de proteção digital teve avanço significativo no começo dos anos 80, sendo que os primeiros produtos comerciais foram lançados nos meados daquela década.

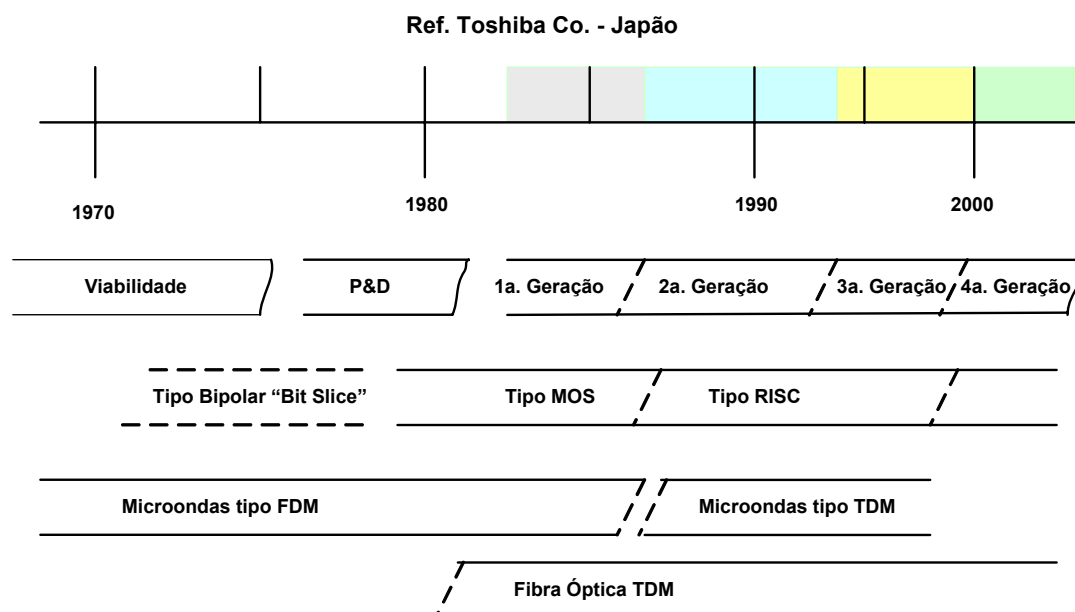


Figura 1.1 – Evolução Histórica segundo Toshiba Co.

Hoje, com o avanço significativo da tecnologia de hardware incluindo processadores confiáveis e rápidos, conversores A/D e memórias e a consolidação de muitos algoritmos já aplicados e melhorados com a experiência, a proteção numérica de tecnologia digital microprocessada é o caminho natural para a área elétrica devido aos aspectos como economia, performance, confiabilidade, flexibilidade e principalmente devido à integração com sistemas de controle e supervisão que permitem a total automação das subestações e centrais de geração de energia elétrica em qualquer nível de tensão e de aplicação.

2. SITUAÇÃO NO BRASIL

Novas Instalações Elétricas

Sistemas de proteção com relés numéricos de tecnologia digital microprocessada já possuem blindagem e proteção adequadas para surtos, bom como condição para operar em altas temperaturas ambientais. Podem, devem e estão sendo aplicados em sistemas industriais, comerciais e em sistemas elétricos de potência (geração, transmissão e distribuição).

Sua principal contribuição funcional é a capacidade de integração com sistemas locais de controle e supervisão, bem como a possibilidade de completo acesso remoto, permitindo instalações não atendidas diretamente pelo ser humano. Os ajustes. Parametrizações e a aquisição de dados podem ser feitos remotamente, inclusive o diagnóstico de falhas internas a esses dispositivos eletrônicos inteligentes (acrônimo “IED” em inglês).

Sua principal contribuição tecnológica sob o ponto de vista de confiabilidade operacional da proteção digital é a possibilidade de autodiagnose das falhas e defeitos internos ao relé, através de processos de monitoramento e verificação automáticos, bem como, em algumas proteções, de funções de auto teste.

Instalações Existentes

Ainda no Brasil a maior parte da proteção e controle é realizada através de dispositivos de tecnologia eletromecânica e/ou eletrônica estática. Na área de geração e transmissão de energia elétrica, menos de 5% (cinco por cento) das instalações possuem proteções numéricas de tecnologia digital (segundo dados do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico em 2001).

As empresas concessionárias de serviços de energia elétrica (principalmente as grandes empresas) estão atualmente na fase de substituir sistemas de proteção antigos por aqueles digitais, dando prioridade à substituição de relés de tecnologia estática que estão no fim da sua vida útil (20 anos no máximo).

Especialistas em Proteção e Procedimentos

É desejável que um profissional da área de Proteção tenha sua formação baseada em conceitos de proteção de equipamentos, instalações e sistemas, independentemente da tecnologia do dispositivo empregado para a proteção. Entretanto, alguns conceitos ou posturas devem ser revistos principalmente nas áreas de:

- **Manutenção da Proteção, quando se envolve dispositivo digital.**

O advento de sistemas de auto verificação, de monitoramento contínuo e eventualmente de auto teste nos modernos dispositivos eletrônicos inteligentes (“IED’s”) fazem com que grande parte da intervenção periódica preventiva para esses dispositivos torne-se desnecessária.

Por outro lado, as instalações externas a esses dispositivos como circuitos de comando e alimentação auxiliar continuam exigindo ensaios funcionais periódicos para garantia da confiabilidade.

A manutenção corretiva também muda de figura. Não se faz mais reparos de cartelas eletrônicas em laboratório próprio ou contratado. Simplesmente se faz a reposição de partes da proteção ou mesmo do relé em si, com o apoio do fabricante. Ter relé de reserva para troca imediata e tempo suficiente para posterior reposição é uma boa política de manutenção.

- **Operação.**

Os ajustes e reajustes das proteções podem ser feitos remotamente, não se exigindo a presença física na subestação do técnico em proteção. Geralmente, excetuando os casos mais complexos, apenas no comissionamento essa presença seria necessária.

Procedimentos de operação podem ser revistos, uma vez que na maior parte dos casos um ajuste ou reajuste da proteção não requer desligamento do terminal ou do equipamento de potência para a execução da atividade. Isso vem de encontro com as novas políticas do Setor Elétrico onde um desligamento (interrupção) pode significar ônus financeiro extra para a Empresa

- **Pós Operação.**

Ainda se depende da recepção de dados de sinalizações dos relés e alarmes nas subestações, além da coleta ou encaminhamento de oscilogramas (papel), para aqueles registradores de perturbações de tecnologia eletromecânica e de tecnologia estática (ainda aplicados no sistema), para posterior análise de desempenho de relés eletromecânicos e estáticos.

Com o advento de registradores de perturbações e relés de proteção digitais, os dados de eventos e oscilografia passaram a ser adquiridos remotamente através de meios de comunicação, reduzindo drasticamente o tempo e a quantidade de H x horas envolvidas.

Para concessionárias de serviços de energia elétrica, mesmo considerando que menos de 5% das instalações têm tecnologia digital, essa facilidade é significativa uma vez que as novas instalações (expansões) e as trocas iniciadas nos sistemas de EAT requerem cada vez mais essa facilidade. Este aspecto torna-se cada vez mais importante devido à redução da quantidade de técnicos especializados em análise e proteção, como se tem observado no país.

- **Projetos Integrados de sistemas de proteção, controle e supervisão.**

Lógicas de controle e comando que eram feitas através de relés e dispositivos eletromecânicos podem agora ser feitos digitalmente, seja através de recursos embutidos nos relés digitais de proteção ou através de módulos de controle digitais integrados a sistemas de supervisão. A quantidade de cabos de controle e de cablagem de painéis pode ser diminuída significativamente.

Os profissionais da área têm a necessidade de se atualizarem quanto a esses recursos, principalmente em prol da economia e da simplicidade dos projetos de controle e supervisão de instalações elétricas.

O técnico especialista em proteção já não pode se ater exclusivamente a itens de proteção, mas deve adquirir e incorporar conhecimentos de controle e supervisão da instalação, uma vez que o relé digital tem parte significativa no todo. O mesmo deve participar da elaboração do projeto elétrico executivo da instalação. Os ajustes da proteção já incorporam aspectos de parametrização que dependem do projeto de controle e supervisão.

- **Especificação de sistemas.**

A especificação de um sistema de proteção já não pode ser feita de modo independente dos sistemas de controle e supervisão, devido à integração entre os mesmos em prol da sinergia que pode ser incorporada, resultando em economia e simplicidade.

Assim, protocolos e dispositivos de comunicação entre os dispositivos eletrônicos de proteção, controle e supervisão devem ser escolhidos de tal modo que se garanta o máximo de integração com o mínimo de custo.

Um grande problema é a compatibilidade entre sistemas de diferentes fornecedores que na maior parte dos casos necessitam ser integrados para uma mesma instalação, quanto a redes e sistemas de comunicação para um sistema de supervisão ou base de dados únicos. Cuidados na especificação de sistemas e previsão de serviços de integração são sempre necessários.

Há uma tendência lenta, mas contínua, no sentido de se ter entendimento entre fabricantes quanto a normas e protocolos comuns, de modo que se possa ter maior facilidade na integração de dispositivos de diferentes origens.

3. COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS

3.1 TECNOLOGIAS EMPREGADAS EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO

O histórico mundial na evolução da tecnologia empregada em relés de proteção pode ser observado na figura a seguir:

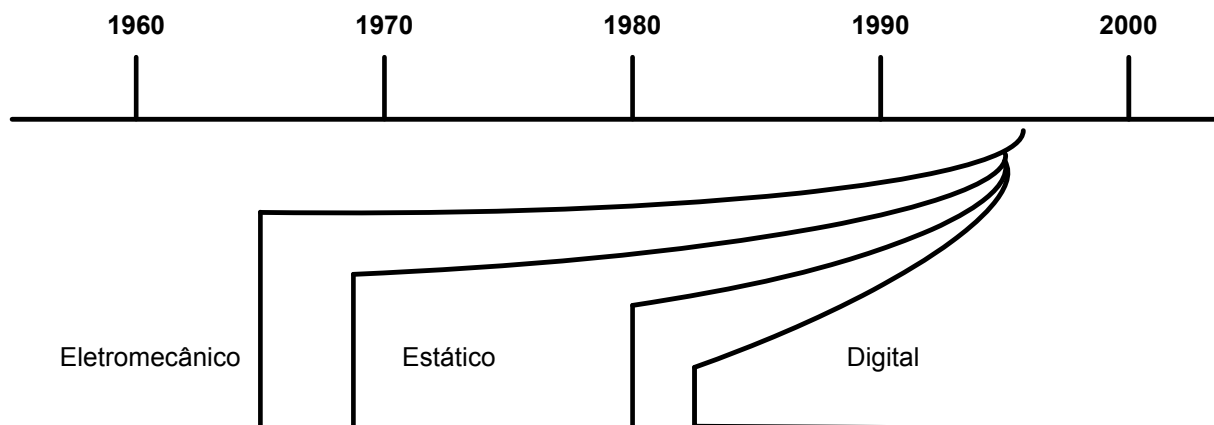


Figura 3.1 – Evolução Tecnológica de Relés de Proteção

Evidentemente, nos países desenvolvidos, o emprego da proteção digital tem ocorrido num ritmo mais acentuado.

E como pano de fundo, tem-se o aumento da complexidade do Sistema de Potência, os requisitos sociais e econômicos para a prestação dos serviços de energia elétrica e, o desenvolvimento, evolução e barateamento das tecnologias associadas à Proteção.

Na área de evolução tecnológica, tem-se:

Componentes

Eletromecânico \Rightarrow Transistor \Rightarrow Microprocessador

Telecomunicações

Carrier \Rightarrow Frequency Divided Modulation \Rightarrow Time Divided Modulation

Analógico \Rightarrow Digital \Rightarrow Fibra Ótica

3.2 TECNOLOGIA ELETROMECAÂNICA

Desde o advento de sistemas elétricos no fim do século passado e até os anos 80, a tecnologia eletromecânica era empregada em grande escala para os relés de proteção.

São dispositivos de medição de módulos e ângulos de grandezas elétricas senoidais e dispositivos de chaveamento, baseados em princípios do eletromagnetismo como:

- Unidades de atração magnética
- Unidades de indução magnética (disco e cilindro magnético)
- Unidades D'Arsonval (bobina móvel)
- Unidades térmicas

A composição dessas unidades, através de circuitos elétricos adequados permite a formação dos chamados dispositivos eletromecânicos nas mais diversas funções, como:

- Comparadores de amplitude
- Comparadores de ângulo de fase
- Unidades auxiliares
- Unidades de temporização
- Elementos térmicos
- Etc.

E a composição desses elementos permite a construção de Relés de Proteção, com funções e aplicações específicas.

Vantagens

Uma proteção eletromecânica apresenta as seguintes características que podem ser consideradas vantajosas:

Durabilidade e Robustez. Com a devida manutenção, um relé eletromecânico pode apresentar tempo de vida útil superior de 40 anos.

Tolerância a Altas Temperaturas de Operação. A temperatura ambiente de instalação da proteção ou a temperatura de operação não são fatores críticos para o bom funcionamento desses relés.

Baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos. Há necessidade de uma energia de surto relativamente grande para danificar um relé eletromecânico. Os surtos normais que ocorrem em uma instalação elétrica, em geral, não afetam as proteções eletromecânicas.

Confiabilidade. Em decorrência do desenvolvimento contínuo da tecnologia de construção desses relés, ao longo de dezenas de anos, têm-se como resultados dispositivos de alta confiabilidade, seja do ponto de vista de segurança contra operações desnecessárias como do ponto de vista de dependabilidade.

Desvantagens

Por outro lado, as seguintes características de um relé eletromecânico podem ser consideradas desvantagens:

Custo. Uma proteção eletromecânica tem um custo que pode ser considerado, hoje, elevado em função da tecnologia que envolve dispositivos de alta precisão, inclusive no aspecto mecânico, que demandam infra-estrutura e mão de obra especializada na sua fabricação. Ainda mais para funcionalidades mais complexas, a composição e o ajuste de elementos eletromecânicos apresenta custos elevados.

Custo da Instalação e Cablagens. O uso de relés eletromecânicos não permite usufruir a maior parte dos recursos hoje existentes de comunicações (digitais, em fibras ópticas), demandando instalações onerosas e pesadas quanto a painéis e cablagens.

Precisão. Quanto mais preciso um dispositivo eletromecânico, maior seu custo, em função dos necessários recursos de eletromagnetismo e de mecânica fina. E há limite para essa precisão em função da própria tecnologia.

Manutenção especializada. A manutenção de relés e dispositivos eletromecânicos exige capacitação específica e muita experiência de campo e de laboratório. Conseqüentemente, pode ser considerada uma manutenção cara. A possibilidade de obsolescência associada a falta de componentes de reposição é muito grande. Os fabricantes das proteções eletromecânicas já não possuem especialistas na manutenção desses relés eletromecânicos.

Limitação de Funcionalidades. Funcionalidades requeridas para redução de custos de manutenção e garantia da confiabilidade não são, na maior parte dos dispositivos eletromecânicos, possíveis de serem implementados. E também quanto às funções de proteção desejadas, quanto mais elaborada a função, mais complexa a proteção eletromecânica. Quanto mais complexa uma proteção eletromecânica, menor a sua confiabilidade ou a sua velocidade.

Considerando as vantagens e desvantagens citadas, ainda podem existir aplicações onde a proteção eletromecânica seria necessária, pelo menos até o presente. São aplicações em ambientes agressivos a componentes eletrônicos, estáticos ou microprocessados, onde o custo da preparação do ambiente para modernas tecnologias exigiria investimento desproporcional ao benefício esperado.

3.3 TECNOLOGIA MISTA

Pouco se utilizou a eletrônica convencional como aplicação maciça, na área de proteção por relés. Esta tecnologia foi utilizada, na maior parte dos casos e a partir dos anos 50, na composição de elementos específicos como as unidades lógicas e elementos direcionais de relés eletromecânicos (tecnologia mista).

Através da utilização de diodos, tiristores, associação de resistores e capacitores, construíram-se dispositivos que propiciaram maior rapidez e precisão nos relés de proteção, menor carga ligada aos TC's e TP's, além de uma maior facilidade de manutenção pela eliminação de muitas partes móveis com tecnologia eletromecânica.

Na realidade, com exceção das proteções mais simples como as de sobrecorrente ou sobretensão, os atuais relés chamados eletromecânicos são, na realidade, proteções com tecnologia mista.

3.4 TECNOLOGIA ESTÁTICA

A partir da segunda metade dos anos 60 e com ênfase nos anos 70, iniciou-se a maciça utilização de tecnologia eletrônica com componentes semicondutores, inclusive com circuitos integrados, na chamada tecnologia estática para confecção de relés de proteção.

Os dispositivos eletromecânicos, nessas proteções, se restringiram a partes muito específicas como os contadores de saída, onde o chaveamento de circuitos exigia algo mais robusto. E mesmo assim, não na totalidade dos casos.

Todas as funções de proteção, das mais simples às composições mais complexas foram concebidas e fabricadas com a tecnologia estática, com maciça utilização de circuitos integrados, acopladores, conversores, fontes DC / DC e filtros. Várias gerações de relés estáticos, cada geração incorporando inovações, se sucederam desde o fim dos anos 60 até os anos 80.

Os chamados relés analógicos são aqueles nos quais as quantidades AC medidas (dos Tp's e Tc's) são manipuladas na forma analógica e subsequente convertidas em ondas quadradas de tensão (binário). Circuitos lógicos e amplificadores operacionais comparam amplitudes e ângulos de fase das ondas quadradas ou sinais retificados, para tomar decisões. São típicos da tecnologia estática.

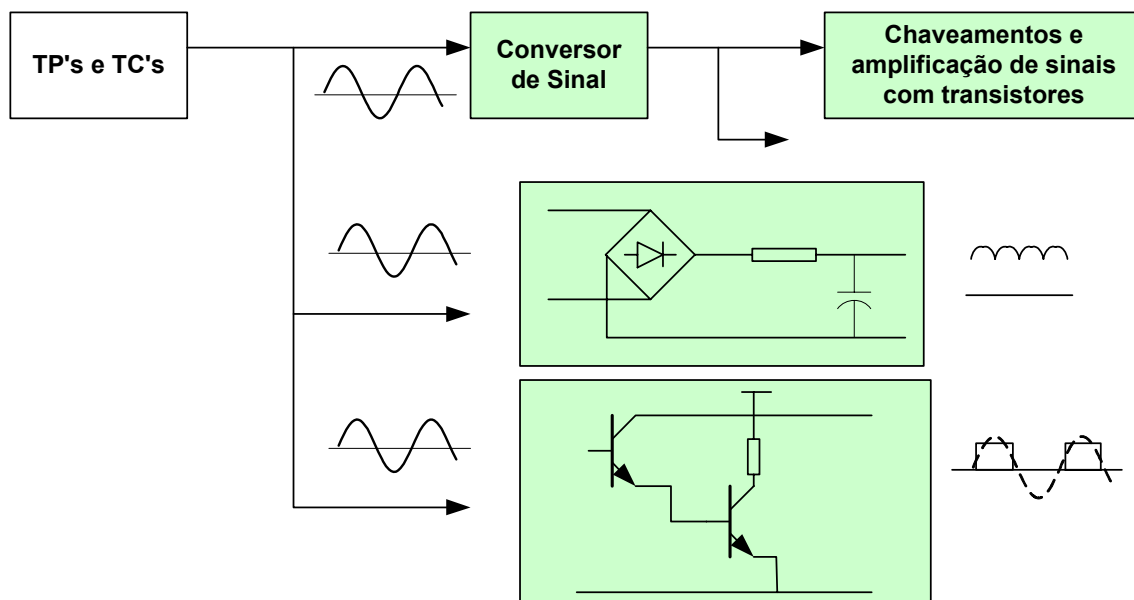


Figura 3.2 – Tecnologia Estática para Relés de Proteção

Vantagens

Entre as vantagens das proteções estáticas, podem ser citadas as seguintes:

Menor Custo. Se comparadas com as eletromecânicas com as mesmas funções.

Maior velocidade. Como consequência direta da tecnologia empregada, foi possível a fabricação de relés muito rápidos, que finalmente chegaram a atender as exigências de determinados sistemas e situações críticas.

Baixo Consumo e Menor Carga. As dificuldades observadas no passado quanto ao consumo de energia das proteções eletromecânicas e quanto à carga imposta nos lados secundários dos transformadores de instrumentos (TP's e TC's) passaram a não mais existir para terminais com proteções de tecnologia estática.

Facilidade de manutenção. A manutenção tornou-se mais simples e direta. Isto se refletiu diretamente nos custos de manutenção. A manutenibilidade foi incrementada com circuitos de autodiagnose naqueles relés de geração mais recente.

Confiabilidade. A experiência no uso de relés estáticos ao longo de 15 a 25 anos, nos Sistemas Interligados Brasileiros, demonstrou que essas proteções eram tão confiáveis quanto as eletromecânicas, porém para uma vida útil bem menor (máximo 20 anos).

Deve-se observar, entretanto, que todas essas vantagens, no caso da experiência brasileira, foram adquiridas gradualmente, ao longo dos anos. Principalmente quanto à confiabilidade dessas proteções, que depende direta e integralmente da sua correta manutenção.

Cerca de 10 anos foram necessários para que as empresas concessionárias de energia elétrica dos Sistemas Interligados pudessem absorver e dominar, totalmente, a manutenção dessas proteções. Ao sair de uma tecnologia eletromecânica convencional, partindo para uma nova tecnologia estática no início dos anos 70, foram necessários anos de experiência e de capacitação e formação de mão de obra especializada para fazer frente aos desafios.

Relés com tecnologia estática estão, hoje, aplicadas na proteção da maior parte das linhas de transmissão de Extra Alta Tensão do nosso País. Para linhas de Alta Tensão, ainda existe uma parte significativa de proteções eletromecânicas (tecnologia mista) instaladas.

Desvantagens

As seguintes desvantagens das proteções estáticas podem ser citadas:

Maior sensibilidade a surtos. Componentes eletrônicos exigem menor energia de surto que os eletromecânicos para se danificarem. Instalações nas subestações e usinas tiveram que ser melhoradas quanto à proteção para surtos desses tipos de relés.

Envelhecimento. Os relés estáticos possuem componentes que perdem suas características num prazo de 8 a 20 anos. Capacitores eletrolíticos têm que ser substituídos a cada 8 anos em média. Circuitos inteiros de medição podem perder sua característica em 20 anos, o que

pode demandar na necessidade de troca da proteção. Para os sistemas brasileiros, este é um aspecto muito sério.

Limitação de Funcionalidades. Funcionalidades requeridas de proteção continuaram difíceis de serem implementadas nos relés estáticos. Basicamente, o uso de componentes e sistemas eletrônicos para a execução da função desejada, se complexa, torna-se difícil e caro.

3.5 TECNOLOGIA DIGITAL

Consequência do uso de recursos que tiveram avanço significativo nos anos 80 e 90, principalmente microprocessadores, memórias e conversores A/D. A consequência imediata do uso dessa moderna tecnologia é o barateamento do custo da proteção, com a redução de circuitos que exigiam engenharia complexa para a sua realização.

Os chamados relés numéricos são, na essência, computadores (inclusive com processamento paralelo) que realizam as diversas funções de proteção. Isto é, passou-se a usar programas computacionais para realizar as funcionalidades desejadas, que antes eram feitos por sistemas eletromecânicos ou circuitos eletrônicos.

São relés nos quais os valores AC medidos são sequencialmente adquiridos por amostragem e convertidos na forma de dados numéricos através de multiplexadores e conversores analógicos / digitais. Microprocessadores executam operações aritméticas e/ou lógicas, com base em algoritmos que emulam funções de proteção (sobrecorrente, sobretensão, impedância, diferencial, etc.).

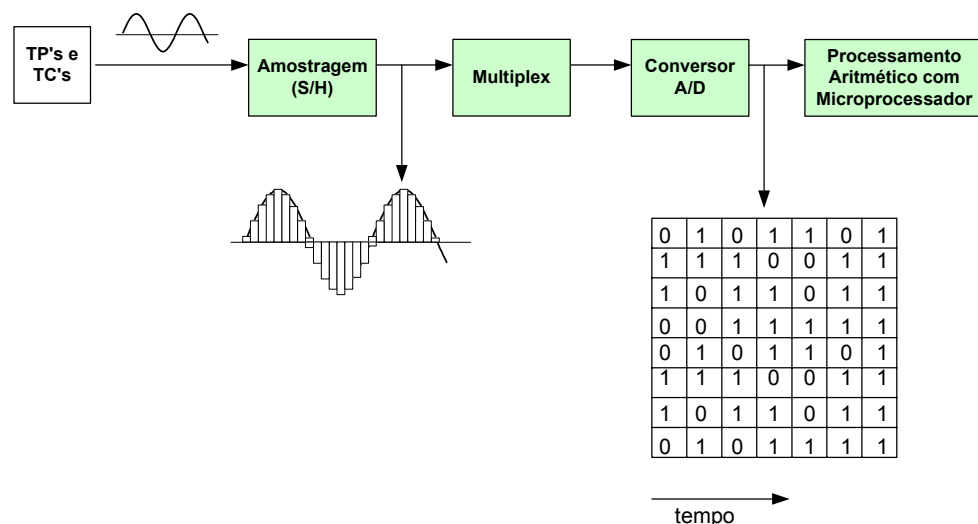


Figura 3.3 – Tecnologia Digital para Relés de Proteção

Vantagens

Hoje são evidentes as seguintes vantagens proporcionadas pela proteção digital, relativamente aos relés de tecnologia eletromecânica ou estática:

Custo. Cada vez menor, inversamente proporcional ao mercado atendido. Sendo que a porção cada vez mais significativa deste custo relaciona-se ao algoritmo emulador da função de proteção. E o fato de se ter várias funcionalidades agregadas em um único dispositivo, o custo global de supervisão, controle e proteção se torna mais baixo.

Funcionalidades agregadas. Uma proteção digital pode agregar um conjunto de outras funções que no passado eram feitas por dispositivos separados. Assim, é muito comum, hoje em dia, ter-se proteção de linha, transformador ou de alimentador com funções de MEDIÇÃO, LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS, OSCILOGRAFIA, REGISTRO DE EVENTOS, MONITORAMENTO DO DISJUNTOR E FALHA DE DISJUNTOR. Para linhas e alimentadores, também se tem agregada a função de RELIGAMENTO AUTOMÁTICO, inclusive com check de sincronismo onde necessário.

Tamanho. Como as funcionalidades são realizadas por software e não por dispositivos eletromagnéticos ou eletrônicos e, também em função da agregação de outras funções numa mesma proteção, já não há necessidade de grandes painéis como aqueles bastante conhecidos nas subestações convencionais. Alguns “racks” substituem vários painéis de proteção, comando, controle e supervisão.

Comunicação. A comunicação de dados em ambiente digital é uma tecnologia já suficientemente evoluída e diretamente aplicável na área de Proteção. Todas as tecnologias hoje disponíveis (sistemas digitais de comunicação, seja com rádios digitais ou com fibras ópticas, processadores de comunicação, rede de fibras, LAN, WAN, etc.) permitem uma integração da proteção com outras funções e permitem facilidades inimagináveis no passado.

Integração com supervisão e controle, com acesso remoto. Em decorrência das funcionalidades agregadas e as facilidades de comunicação, principalmente com o uso de rede de fibras ópticas dentro de uma subestação, tem-se a integração da supervisão, comando, controle e proteção. Esta rede local pode se comunicar com uma rede ampla (WAN), outras redes ou diretamente com qualquer centro ou pessoa através de meios de comunicação. Esse meio pode ser: fibra óptica, rádio digital, rádio analógico, onda portadora, satélite, linha dedicada. Podem-se utilizar canais contratados ou até telefone ou celular automaticamente discado para ligação automática com computador remoto ou acionamento de “pagers”.

Custo da instalação. Para uma nova subestação, observa-se que, com o uso de fibras ópticas, se reduz substancialmente os cabos de comando e controle de cobre. Principalmente se a ARQUITETURA contemplar processamento distribuído, com aquisição de dados e comandos junto aos processos.

Interface Homem x Máquina. Como todo computador, a interação entre o humano e a proteção digital, juntamente com todas as informações agregadas (como a seqüência de eventos, oscilografia, localização de defeitos) e também com supervisão e controle, torna-se rápida e amigável, com facilidades e flexibilidades para ajustes e ensaios impossíveis de serem pensados no passado. Isso pode ser feito **local** ou **remotamente**, para acompanhamento do desempenho, reajustes e outras intervenções.

Flexibilidade e sofisticação a baixo custo. Tudo o que pode ser feito por um computador digital pode ser feito por uma proteção numérica. Assim, funcionalidades de proteção antes impossíveis de serem realizadas a custo razoáveis são possíveis com relés numéricos.

Facilidades para Auto-monitoramento e Auto-verificação. Um computador pode ser programado para monitorar continuamente vários subsistemas do seu “hardware” e “software” e introduzir lógicas e procedimentos para garantir a confiabilidade necessária e desejada para a proteção. Circuitos de autodiagnose implementados em computadores (relés numéricos) são muito mais flexíveis e poderosos que aqueles dedicados, desenvolvidos para relés estáticos dos anos 80.

Confiabilidade. A confiabilidade dos relés digitais é consequência direta da contínua monitoração das próprias condições de funcionamento e também da implementação de circuitos tolerantes a falhas. Há uma redução de atuações não corretas, melhorando seu desempenho operacional.

Cuidados

Sensibilidade a Surtos. Tanto os relés com tecnologia estática como os relés digitais necessitam de proteção especial e blindagem para surtos e interferências eletromagnéticas, tanto nos circuitos que chegam e saem da proteção como para as interferências irradiadas. Surtos ou interferências de baixa energia já são suficientes para danificar os modernos circuitos digitais. Assim, cuidados especiais são tomados para separar a parte “suja” (Cablagens ligadas a TP’s, TC’s, comandos de disjuntores, alimentação CC) que estão sujeitos a surtos, da parte “limpa”.

Sensibilidade a Temperaturas elevadas. Todo dispositivo estático ou digital é sensível a altas temperaturas. Apesar do avanço da tecnologia, apenas os componentes especialmente desenvolvidos para tal suportam temperaturas antes suportadas pelos dispositivos eletromecânicos.

Software não portátil e às vezes não atualizável. Os algoritmos emuladores de funções de proteção são desenvolvidos em linguagem assembler ou, mais recentemente, em linguagem de alto nível como o “C”. Esses códigos são exclusivos para cada tipo de processador e ambiente de processamento e **não são portáteis** (apesar de que está ocorrendo tendência no sentido de se buscar portabilidade). Alguns relés digitais do passado possuem algoritmos não muito adequados e não podem ser alterados.

Entretanto, com a experiência dos fabricantes e a consequente otimização desses algoritmos, esta dificuldade se tornará cada vez menos relevante. Não se cogita, para o usuário, a possibilidade de alterar ou efetuar manutenção do software (algoritmos e funções) de proteção.

Tecnologia relativamente nova na área de Proteção. Como toda nova tecnologia, a sua absorção e repasse pelos usuários envolvem um processo demorado e custoso. E o novo enfoque de utilização de computador para emular relê ou função de Proteção, que requer novas posturas de operação e de manutenção, implica em mudança cultural de absorção lenta. Esta tendência, entretanto, de uso de relés numéricos é inexorável e inevitável.

4. CONFIGURAÇÃO BÁSICA E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

4.1 BLOCOS FUNCIONAIS

A figura a seguir mostra os principais blocos funcionais e seu relacionamento com as instalações externas:

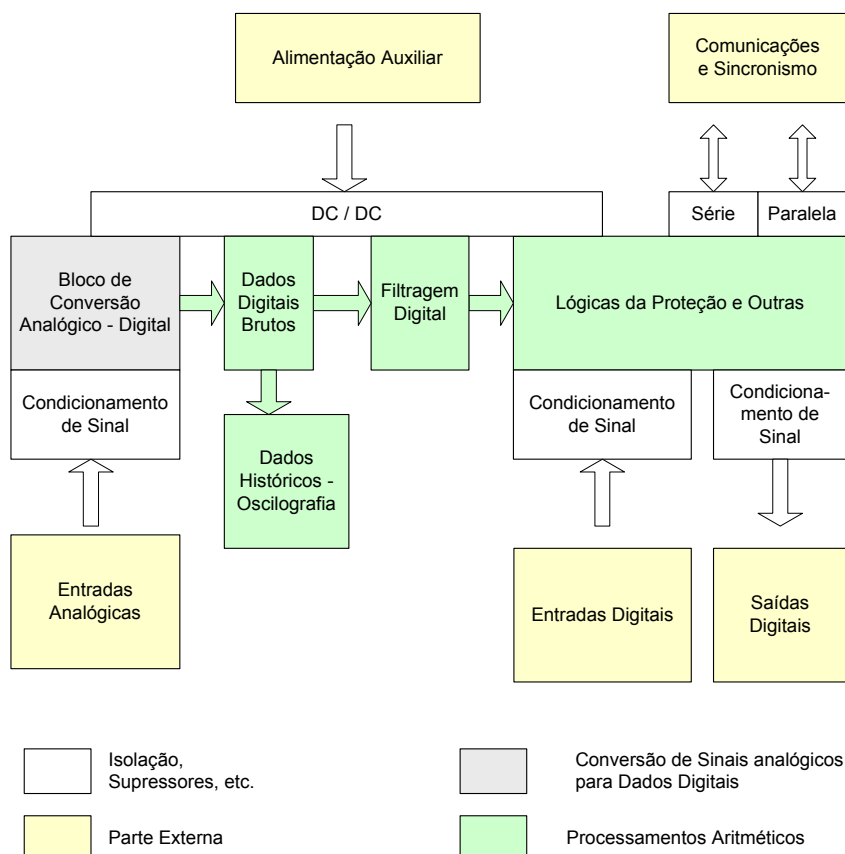


Figura 4.1 – Blocos Funcionais de um Relé Digital Microprocessado

O bloco de conversão analógico / digital tem a finalidade de converter os sinais oriundos dos TP's e TC's em dados digitais processáveis através de microprocessadores.

O bloco de processamento aritmético, que pode ter de um a vários processadores, efetua todas as lógicas, filtragens digitais, cálculos de algoritmos, supervisão e gerenciamento interno da proteção digital.

Esses blocos são detalhados, posteriormente, neste mesmo documento.

O condicionamento dos sinais que entram e saem do relé é muito importante considerando que uma proteção digital executa operações aritméticas de alta velocidade (inferior a 0,3 microssegundo) usando sinais de nível relativamente baixo (2 a 5 Volts).

Considerando que o relé estará instalado em um ambiente hostil de alta ou extra alta tensão, sujeito a surtos e interferências eletromagnéticas de vários tipos e intensidades, ele deve ser dotado de blindagem, supressores de surtos e isolações em um nível mais intenso que aquele que era adotado para relés analógicos (estáticos).

Os surtos e ruídos incluem:

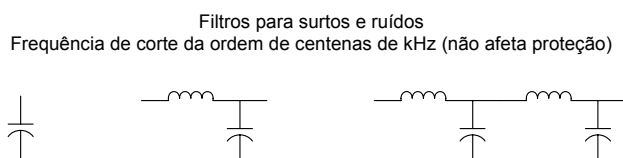
- Aqueles que ocorrem no lado da alta tensão, como surtos de chaveamento de equipamentos de manobra, curtos-circuitos e descargas atmosféricas.
- Ruídos induzidos de outros equipamentos da mesma estação, como o chaveamento de circuito DC.
- Ruídos que ocorrem na proteção em si, como chaveamento de relés auxiliares.
- Interferência eletromagnética irradiada por diversas fontes.

Os caminhos pelos quais esses surtos e ruídos chegam à proteção incluem:

- TC's e TP's e respectivos circuitos secundários.
- Sistema de serviço auxiliar.
- Circuitos de entrada e saída do relé.
- Pelo ar.

As seguintes medidas são, portanto, tomadas para condicionamento dos sinais que entram e saem do relé e para os sinais internos ao relé:

- 1) Capacitores de “bypass” (para drenagem de surtos) e/ou filtro de linha são utilizados nos circuitos de entrada de TC's, TP's e Alimentação auxiliar.



Também são utilizados VARISTORES para supressão de surtos

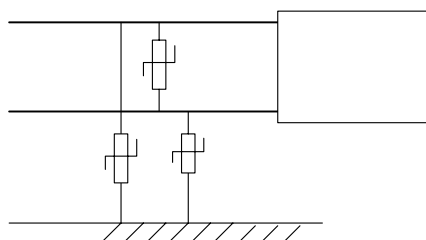


Figura 4.2 – Filtros de linha e Varistores para Surtos

Deve-se salientar que os níveis de proteção para surtos e ruídos estão normalizados:

1. IEEE – Standard C37.90A
2. IEC – Standard 255-4
- 2) Transformadores (circuito de TP's e TC's) e fotoacopladores (entradas digitais) são usados para isolar circuitos internos dos externos. Para a alimentação auxiliar, o próprio conversor DC / DC proporciona separação.
- 3) São feitas blindagens de toda a proteção com material condutivo, para interferências irradiadas.
- 4) A fiação interna é separada em grupos: de circuitos de alta potência e de baixa potência. Cada grupo de fios juntados de modo a evitar transferência de ruído dos circuitos de alta potência para os de baixa potência.
- 5) Para sinais de importância especial, cabos trançados ou blindados são utilizados.
- 6) O projeto do circuito é feito de modo que os circuitos de suprimento de energia e de aterramento sejam reforçados.
- 7) Capacitores de “bypass” são instalados em pontos importantes dos circuitos internos.
- 8) Circuitos são blindados quando necessários.

A figura a seguir mostra parte do condicionamento citado:

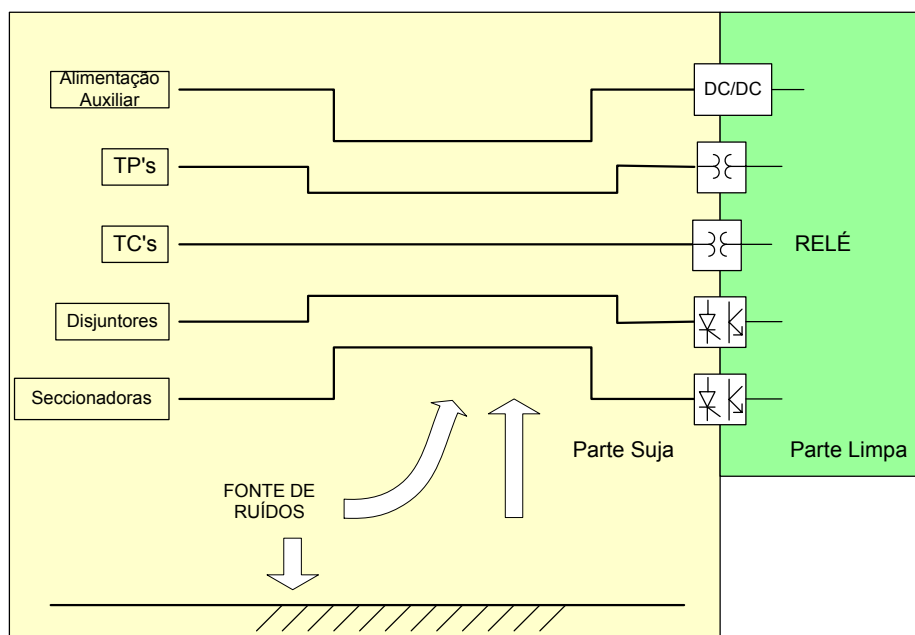


Figura 4.3 – Separação entre as partes “sujas” e “limpas”

4.2 BLOCO DE CONVERSÃO DE SINAIS ANALÓGICOS EM DADOS DIGITAIS

Os sinais analógicos provenientes da medição de grandezas elétricas do sistema elétrico protegido variam continuamente de magnitude no decorrer do tempo. Por outro lado, no bloco de processamento aritmético que executa os cálculos, as quantidades digitais têm sua magnitude variada discretamente no tempo.

Assim o bloco de conversão de sinais analógicos em dados digitais tem a finalidade de efetuar essa conversão de modo mais preciso possível, dadas as limitações de tecnologia e os requisitos de proteção do sistema, sem esquecer o aspecto econômico / comercial de uma proteção digital num mercado altamente competitivo.

A figura a seguir mostra os principais componentes desse bloco:

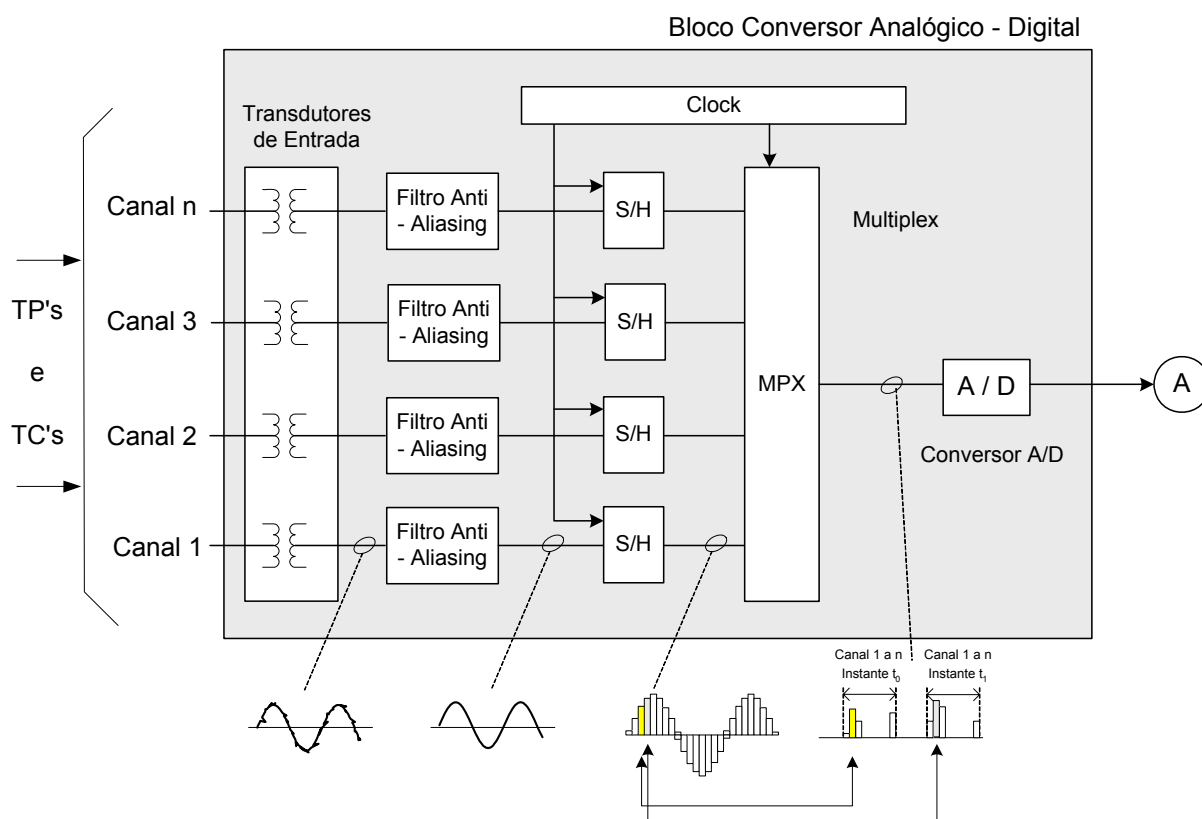


Figura 4.4 – Configuração do Conversor Analógico - Digital

4.2.1 Filtro Anti-Aliasing

Erro de Aliasing

Um filtro “Anti-Aliasing” é usado para evitar possíveis erros na reconstrução digital dos dados de entrada, após o bloco de conversão Analógico / Digital mostrado na figura anterior, quando se usa a técnica de amostragem e retenção S/H – “Sample and Hold”. O resultado da digitalização do sinal pode incorporar erros chamados de erros de “aliasing”.

Basicamente é um erro de magnitude do sinal à frequência FUNDAMENTAL, para mais ou para menos.

Qualquer sinal de entrada amostrada a $N \times 60$ Hz (Brasil, EUA) ou $N \times 50$ Hz (Europa, Paraguai) pode apresentar o chamado “aliasing” se o sinal de entrada contém harmônicas da ordem $N \pm 1$, $2.(N \pm 1)$, $x.(N \pm 1)$.

Para se compreender esse tipo de erro, apresenta-se na figura a seguir um exemplo de um sinal composto de uma senóide fundamental (60 Hz) e uma senóide de 11ª. Harmônica entrando na proteção para taxa de amostragem de 12 por ciclo, isto é, harmônica (N-1):

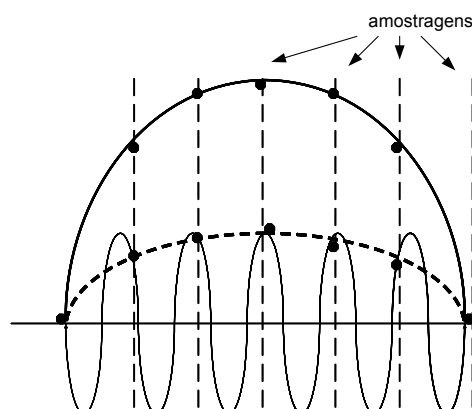


Figura 4.5 – Exemplo de erro de Aliasing no processo S/H

Observa-se que a resultante da digitalização resultará na senóide fundamental somado a um aparente sinal de 60 Hz (mostrado em tracejado na figura), proporcionando um erro de magnitude para mais em 60 Hz.

O exemplo a seguir mostra um sinal composto de uma senóide fundamental (60 Hz) e uma senóide de 7ª. Harmônica entrando na proteção para taxa de amostragem de 8 por ciclo, isto é, harmônica (N-1):

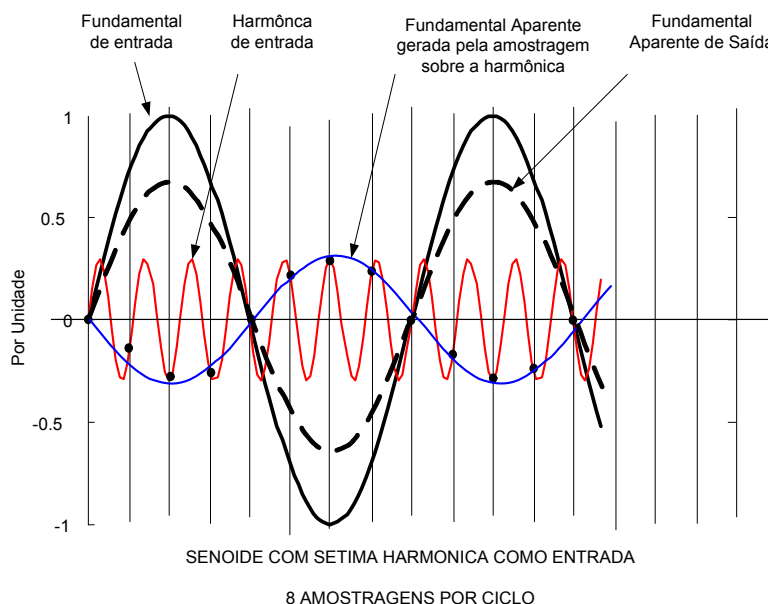


Figura 4.6 – Exemplo de erro de Aliasing no processo S/H

Observa-se que a resultante da digitalização resultará na senóide fundamental somado a um aparente sinal de 60 Hz (mostrado em tracejado na figura), proporcionando um erro de magnitude para menos em 60 Hz.

Daí se verifica a obrigatoriedade de um filtro analógico de entrada, para evitar erros de medição que afetam a FUNDAMENTAL.

Outra Função do Filtro Analógico de Entrada

Rejeitar (atenuar) as frequências não utilizadas para a proteção, como a componente DC e outras de alta frequência. Entretanto, deve-se observar que:

- Há filtragem digital numa etapa posterior, antes do processamento propriamente dito, que pode eliminar componente DC e outras frequências.

Pode-se dizer que, para cada aplicação de proteção (funções predominantes de proteção), o filtro deve se adequar aos algoritmos e filtros digitais para a redução desse erro ao mínimo aceitável.

Taxa de Amostragem e o Erro de Aliasing

Considerando o domínio de frequências de 60 Hz e as frequências normalmente geradas no sistema elétrico, pode-se dizer que o erro de aliasing ocorre basicamente devido às baixas taxas de amostragem para a conversão A/D.

Critério de Nyquist

O chamado critério de Nyquist preconiza que, para evitar o erro de “aliasing”, todo sinal cuja frequência seja superior à metade (1/2) da frequência de amostragem precisa ser filtrada (atenuada). Isto é, a frequência de corte seria fixada para metade da frequência de amostragem.

Esse critério deriva do “Teorema de Amostragem de Nyquist” que postula que se um sinal contém somente as frequências menores que a frequência de corte f_c , então todas as informações no sinal podem ser capturadas com uma taxa de amostragem de $2 \times f_c$,

Assim, para um relé com 12 amostragens por ciclo (720 Hz) deverá haver filtro analógico para atenuar todo sinal superior a 360 Hz (6ª. Harmônica).

Na prática, entretanto, pode haver filtros para atenuação de sinais com frequência superior a (1/3) da frequência de amostragem. Entretanto, esse estreitamento pode introduzir problemas, conforme comentado posteriormente.

Filtros Analógicos [1]

Há diversos tipos de filtros que, de um modo geral, podem ser classificados em:

- Filtro passa baixa.
- Filtro passa alta.
- Filtro passa banda.

O filtro **passa baixa** deve atenuar todo sinal superior a uma dada frequência, conforme mostra a figura teórica (ideal) a seguir sobreposta à curva real (tracejada). Por outro lado, o filtro **passa alta** deve atenuar todo sinal inferior a uma dada frequência. O filtro **passa banda** faz com que se tenha atenuação para valores inferiores e superiores a uma banda de frequências:

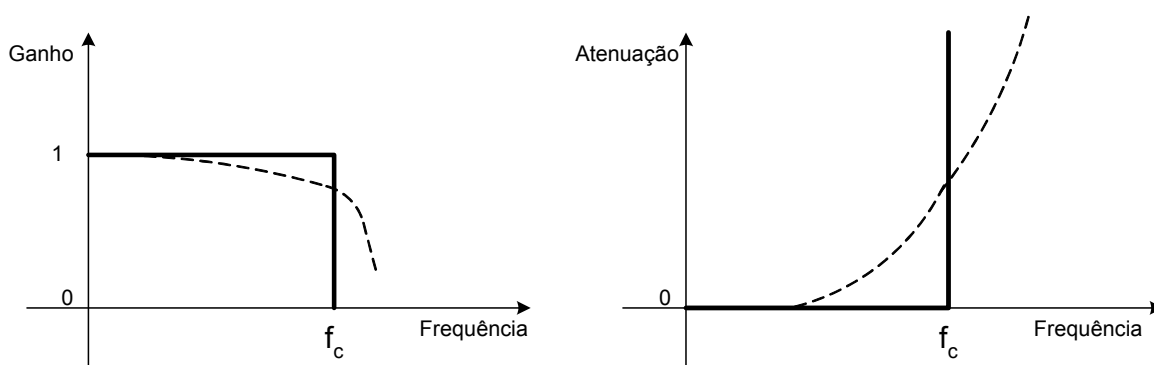


Figura 4.7 – Filtro passa baixa

O filtro **passa baixa** é mostrado na figura anterior é muito utilizado. Em tracejado, a característica de um filtro real, enquanto que em linha cheia tem-se a característica ideal. Ganho 0 (zero) significa atenuação “infinita” (ou bloqueio de sinal) para aquela frequência. Ganho 1 (um) significa atenuação “zero” (ou passagem livre do sinal) para aquela frequência.

Nesse caso, a componente DC do sinal de entrada (frequência 0) é filtrado posteriormente (filtro digital).

Na figura a seguir mostra-se o filtro **passa alta**:

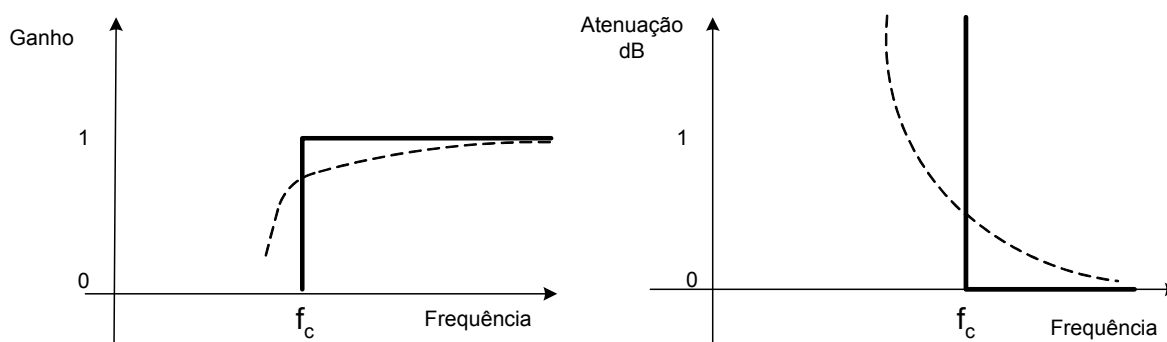


Figura 4.8 – Filtro passa alta

Observa-se que esse filtro atenua as frequências abaixo da frequência de corte.

Para se ter um filtro passa banda, se faz uma associação dos dois anteriores, conforme mostrado na figura a seguir.

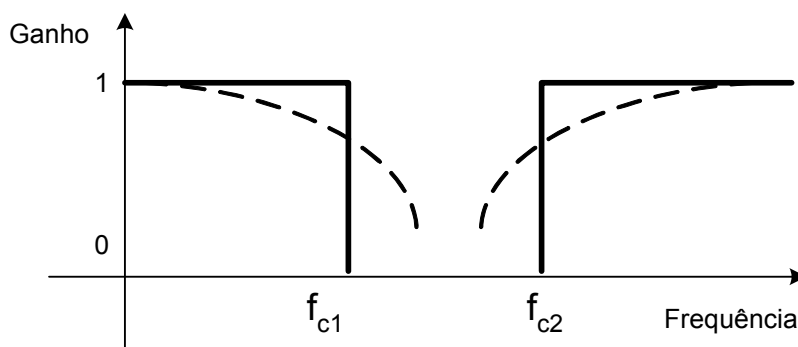


Figura 4.9 – Filtro passa banda

Filtros Ativos e Passivos

Filtros passivos são aqueles que usam componentes que não geram tensões, como resistores, indutores, capacitores e transformadores.

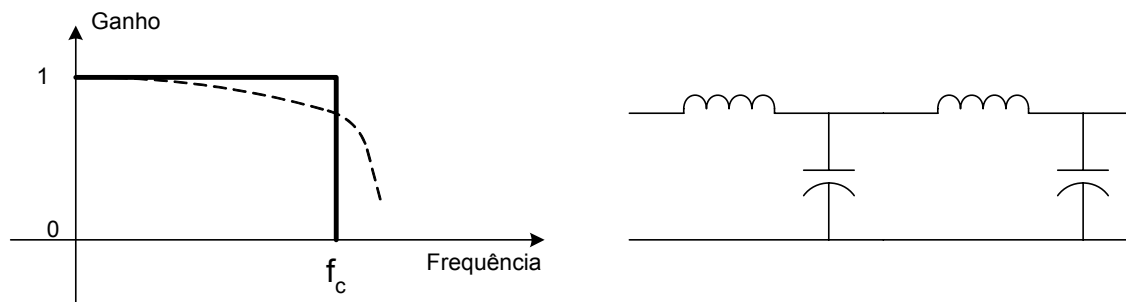


Figura 4.10 – Exemplo de Filtro Passivo (passa baixa)

Para se conseguir boas características de filtragem, um filtro analógico pode ser **ativo**, isto é, conter amplificador operacional associado a componentes passivos (R, C). Os tipos de filtros utilizados na prática têm o nome dos idealizadores das funções de transferência adotados no projeto do filtro (Butterworth, Chebyshev e Bessel).

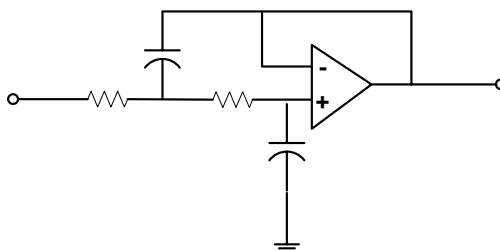


Figura 4.11 – Filtro Ativo Butterworth para 360 Hz [9]

A figura a seguir mostra a característica do filtro anti-aliasing de um relé da Toshiba Co. de terceira geração (1995 – 1997):

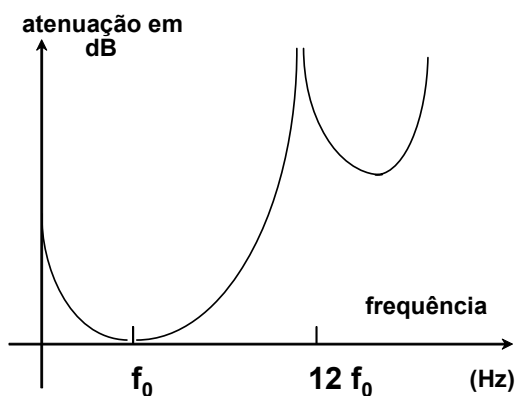


Figura 4.12 – Filtro ativo, passa banda

Trata-se de um filtro passa banda de dois estágios, com amplificadores operacionais associados a resistores e capacitores para relé de 12 amostragens por ciclo. Observa-se que esse filtro atenua também a componente DC que eventualmente se sobrepõe à senóide (frequência 0).

Características Dinâmicas do Filtro

Adicionalmente à característica em regime do filtro analógico, há de se considerar a resposta dinâmica do filtro, para qualquer aplicação.

Os aspectos mais importantes dessa característica dinâmica são: o tempo de elevação (“**rise time**”), o qual indica quanto tempo um filtro passa baixa leva para atingir o seu valor final para um degrau introduzido na entrada; e o “**overshoot**” que indica o nível acima do valor final que resposta atinge, transitoriamente, em resposta a um degrau na entrada.

Na prática seria a introdução de defasamento entre os sinais de entrada e de saída do filtro, que corresponde um atraso no tempo no fluxo de informações, o que implica numa fase posterior de processamento em tempo maior na operação da Proteção.

Um aspecto importante a observar é que, quanto mais a frequência de corte do filtro se aproxima da frequência fundamental, o mencionado defasamento aumenta.

E quando se deseja uma resposta em frequência o mais próximo do ideal, piora a resposta dinâmica no tempo, com “overshoot”. A figura a seguir [9] ilustra o citado atraso de tempo e o “overshoot”, para dois tipos de respostas em frequência:

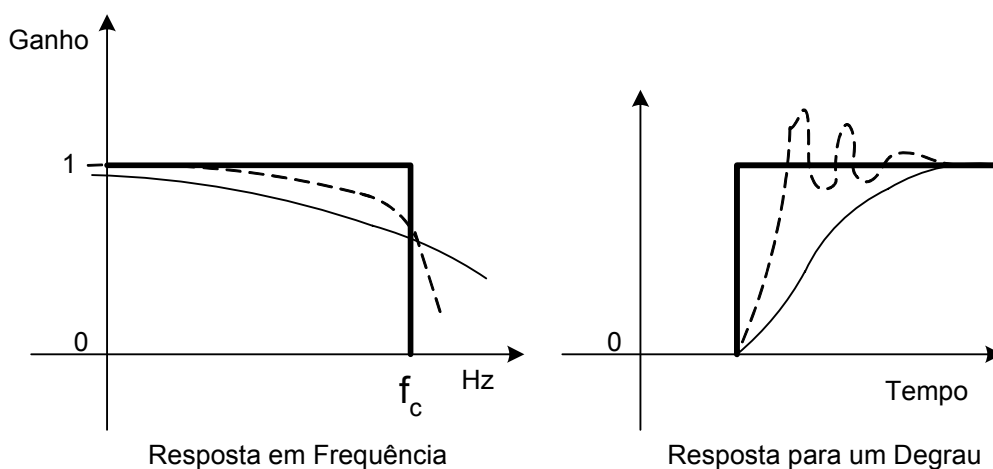


Figura 4.13 – Conflito entre Respostas em Frequência e no Tempo

A figura a seguir mostra um exemplo de filtro passivo projetado para 12 amostragens por ciclo com frequência de corte de 360 Hz, e o “rise time” [9]:

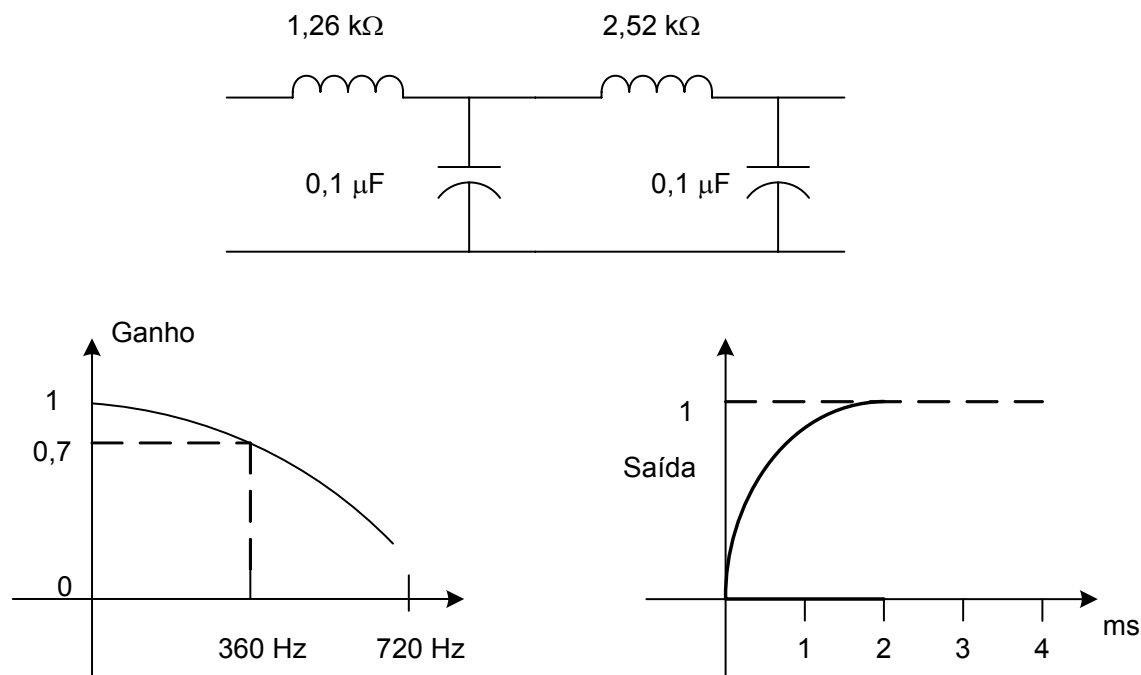


Figura 4.14 – Filtro Passivo Para 12 Amostragens por Ciclo e Característica Dinâmica

Para este exemplo tem-se um valor razoável de saída com cerca de 0,8 ms após a aplicação de um degrau na entrada. Esse atraso corresponderá a um defasamento de cerca de 11 graus para fasor de 60 Hz. Note que o intervalo de amostragem é ($1000 \times 1 / 720 = 1,39 \text{ ms}$).

Um filtro ativo pode influenciar tanto o ganho como esse atraso no tempo, conforme ilustrado na figura a seguir para os chamados filtros Chebyshev, Butterworth comparados com o filtro passivo RC mostrado [9]:

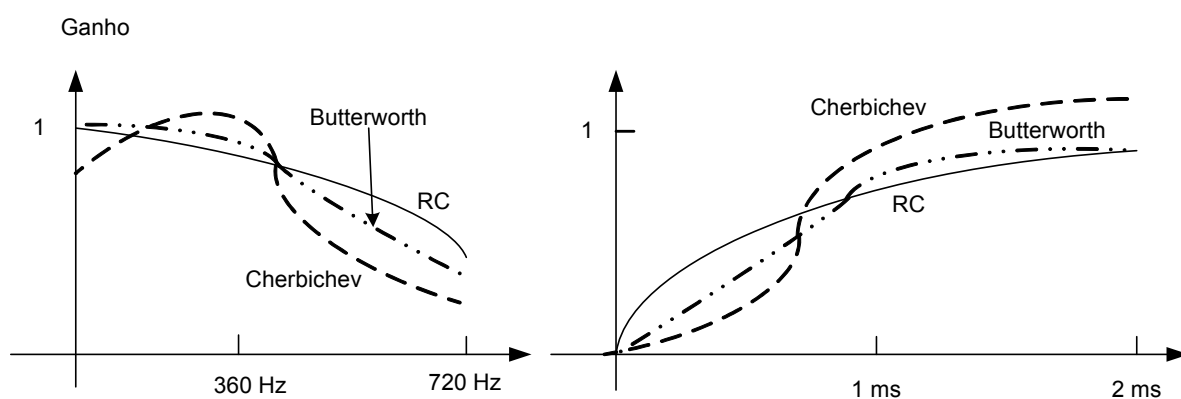


Figura 4.15 – Comparação dos filtros Chebyshev e Butterworth com Filtro RC para 360 Hz

Características desejáveis para um filtro

- Tempo de resposta rápido, com pouco defasamento (largura de banda razoável).
- Comportamento transitório aceitável.
- Simples para projetar, construir e fabricar em série (manufatura).

Em conjunto com a filtragem digital que será visto posteriormente, deve apresentar as seguintes características:

- Resposta tipo “passa banda” sobre a fundamental, pois os demais componentes não são de interesse para as funções de proteção.
- Rejeição de componentes DC exponenciais e de Rampa.
- Atenuação de harmônicas ou rejeição para limitar os efeitos das não linearidades.

4.2.2 Circuito Sample & Hold (S/H)

O circuito efetua amostragem de uma grandeza analógica a intervalos pré determinados (taxa de amostragem) e efetua a retenção do sinal amostrado até que se complete a etapa seguinte de conversão A/D. É feita amostragem simultânea para todos os canais, a cada intervalo de amostragem

O circuito consiste basicamente de um capacitor e uma chave eletrônica usando FET – “Field Effect Transistor”, como ilustrado na figura a seguir:

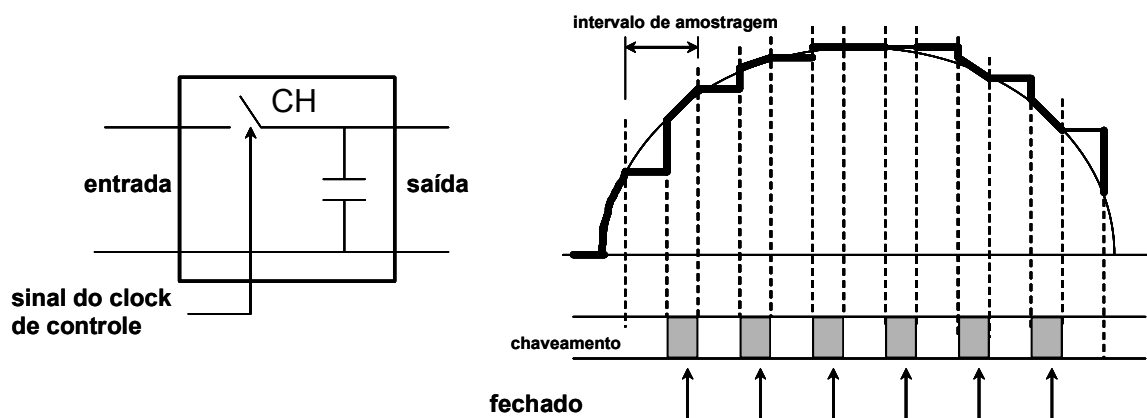


Figura 4.16 – Princípio de um circuito Sample & Hold

Fechando-se a chave CH tem-se através do capacitor uma tensão igual ao do sinal de entrada naquele instante. Abrindo a chave, permanece no capacitor a tensão que havia no sinal amostrado imediatamente antes da abertura.

Repetindo ciclos de abertura e fechamento é possível obter sinais amostrados por faixa de tempo, com intervalo pré-determinado conforme é mostrado na figura a seguir:

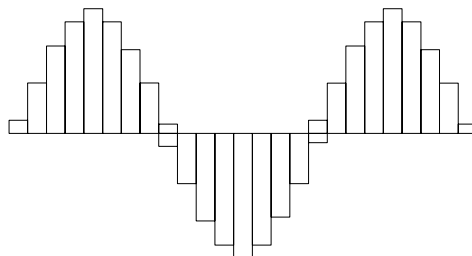


Figura 4.17 – Sinais Analógicos Amostrados

A cada amostragem se tem nova medição, porém retendo as medições anteriores (“buffer”). Isto é, a cada nova amostragem, aquela mais antiga é descartada. Pode-se observar o princípio através das “janelas de dados” se movendo ao longo do tempo, conforme mostrado na figura a seguir.

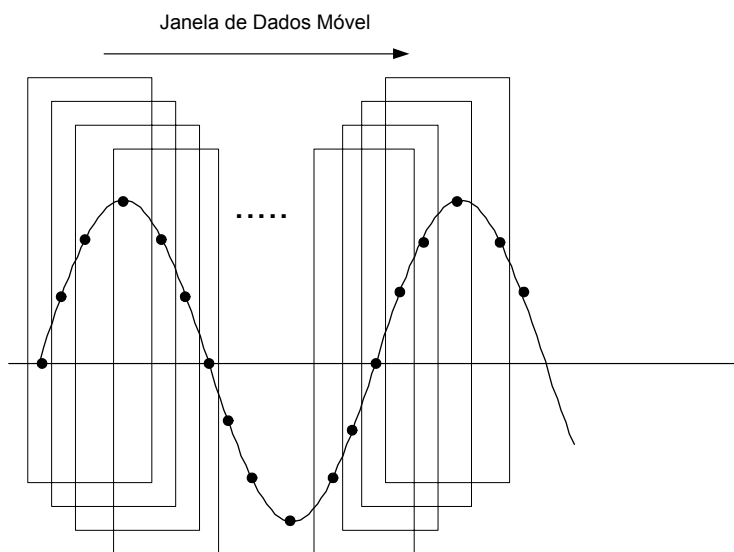


Figura 4.18 – Janela de Dados para Amostragem

Características da Taxa de Amostragem

- A taxa de amostragem deve levar em conta os harmônicos eventualmente desejáveis para cálculos nas funções de proteção (dependendo da função de proteção).
- É desejável que o intervalo de amostragem corresponda a ângulo elétrico que facilite a aplicação de algoritmos de cálculo, reduzindo sua complexidade. Também o tempo de

atuação da função de proteção está estreitamente ligado aos algoritmos utilizados e a taxa de amostragem.

- A maior parte dos cálculos importantes das funções de proteção são efetuadas a intervalo de amostragem. Assim, uma taxa muito alta com cálculos intensivos pode esbarrar na capacidade e velocidade de processamento dos microprocessadores empregados.
- A taxa de amostragem deve estar em harmonia com a tecnologia disponível e com as características do sistema de comunicações empregadas para a proteção (se empregadas).

Por exemplo, a taxa de amostragem não deve ser superior a um determinado valor que supere a capacidade de conversão A/D da etapa posterior ao multiplexador.

4.2.3 Multiplexador

Um multiplexador é uma chave eletrônica que permite que **um único conversor A/D** faça a medição de **vários canais de entrada**, eliminando o alto custo de se ter vários conversores.

Sua função é colocar os sinais analógicos amostrados e retidos nos vários canais agrupados para cada intervalo de amostragem, conforme mostra a figura a seguir:

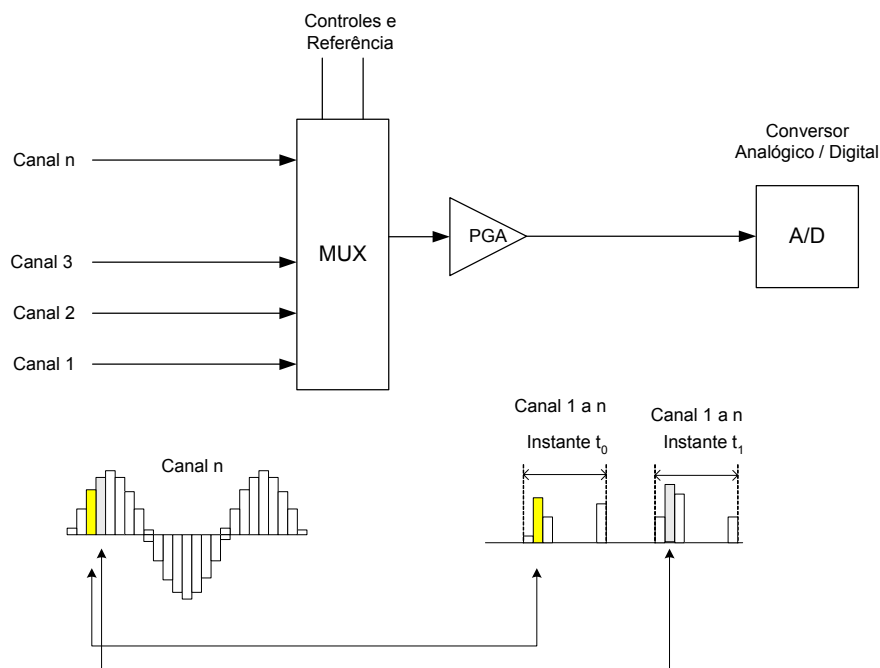


Figura 4.19 – Multiplexação para permitir o uso de um único A/D

O amplificador de ganho programável (PGA) permite que, para cada canal de entrada do MUX se tenha diferentes ganhos e faixas de variação, uma vez que vários canais são varridos seqüencialmente.

O uso de um A/D com multiplexador limita a taxa de amostragem do bloco de conversão analógico – digital. Por exemplo, um A/D que poderia amostrar a 10 kHz para um único canal seria limitado a $(10/12 = 830 \text{ Hz})$ por canal, para um conjunto de 12 canais. Isto é, as características do A/D dependem da quantidade de canais multiplexados e da taxa de amostragem e vice-versa.

4.2.4 Unidade Conversora A/D

Um conversor A/C (**ADC** em inglês) tem a finalidade de efetuar a conversão de grandezas analógicas em digitais (binários) para uso subsequente de processadores aritméticos. O número digital representa a grandeza de entrada para aquela amostra daquele canal com resolução finita.

Resolução

A resolução do ADC é representada pelo número de bits que compõem o número digital. Um ADC de **n bits** tem uma resolução de 1 parte em 2^n . Por exemplo:

Conversor de **12 bits**: tem resolução de $1 / 2^{12} = 1$ para 4.096

Isto corresponde a 2,44 mV para 10 V.

Conversor de **16 bits**: tem resolução de $1 / 2^{16} = 1$ para 65.536

Isto corresponde a 0,153 mV para 10 V.

Tipos de ADC

Muitos tipos de ADC estão disponíveis. Diferem entre si quanto à resolução, precisão e velocidade. Os mais populares tipos de ADC são:

- Conversor Paralelo (“Flash”)
- Conversor de Aproximações Sucessivas
- Tipo Tensão para Frequência
- Tipo Integrador

Conversor Paralelo

É o mais simples dos conversores A/D. Ele usa uma tensão de referência correspondente à escala plena do sinal de entrada. Possui divisor de tensão composto de $(2^n + 1)$ resistores em série, sendo n a resolução do ADC em bits.

O valor da tensão de entrada é determinado utilizando um comparador para cada um dos (2^n) tensões de referência criadas no divisor de tensão. A figura a seguir mostra um exemplo de ADC do tipo Conversor Paralelo de 2 bits.

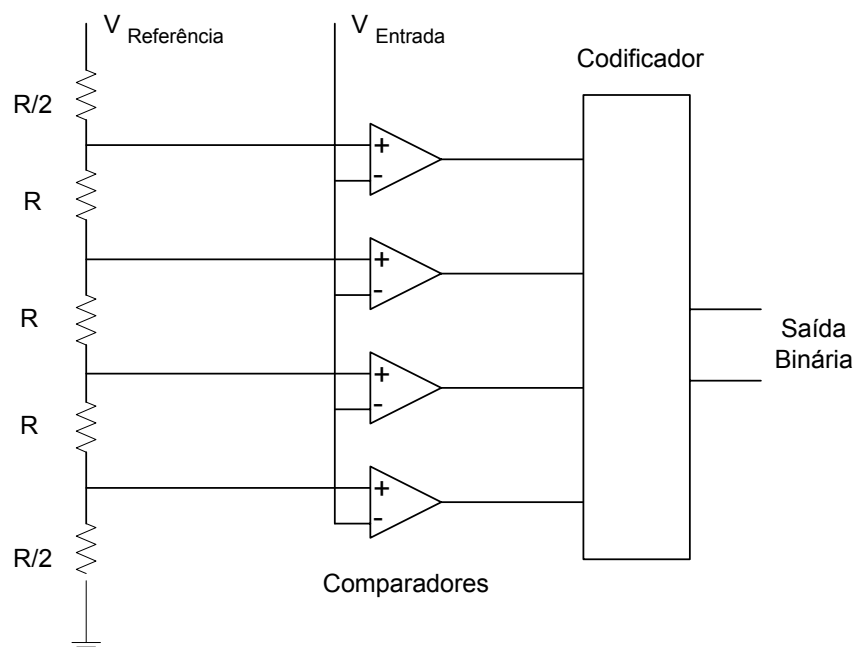


Figura 4.20 – Esquema de ADC do tipo Conversor Paralelo, para 2 bits.

Este tipo de conversor é muito rápido (até 500 MHz) devido aos bits serem determinados em paralelo. O método requer uma grande quantidade de comparadores, portanto geralmente limitando a resolução a 8 bits (256 comparadores). São geralmente encontrados em osciloscópios digitais e digitalizadores de transitórios.

Conversor de Aproximações Sucessivas

Esta unidade A/D utiliza um Conversor **Digital para Analógico** (DAC em inglês) e um comparador. Ela faz a chamada “busca binomial” iniciando com um valor de saída 0 (zero).

Ela ajusta provisoriamente cada bit do DAC, começando pelo bit mais significativo. A busca efetua a comparação da saída analógica do DAC com a tensão que está sendo medida. Se o ajuste do bit para “1” causa uma saída do DAC maior do que a tensão de entrada, então esse bit é ajustado para “0”. Caso contrário, é mantido em “1”. Passa-se para o bit seguinte e assim sucessivamente.

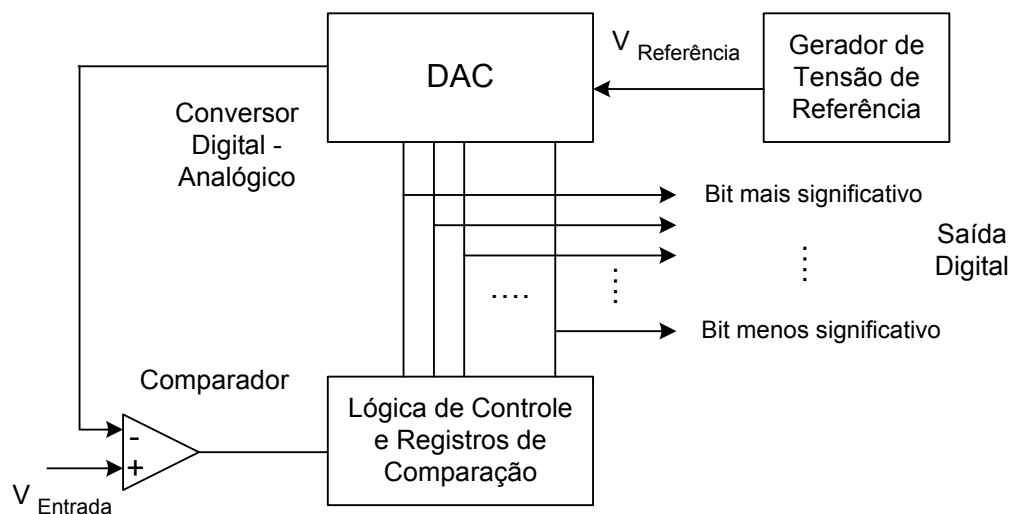


Figura 4.21 – Esquema de ADC do tipo Conversor de Aproximações Sucessivas

Este tipo de conversor é mais lento que o do tipo Paralelo, pois as comparações são feitas em série, sucessivamente, com tempo adicional para ajustar cada bit. Entretanto podem ser encontrados esses tipos de ADC para taxas de conversão até 200 kHz.

Este tipo de ADC é relativamente barato para implementar resoluções de 12 e 16 bits. Por consequência é o ADC mais comumente utilizado e pode ser encontrado em muitos sistemas de aquisição de dados baseados em PC's.

Conversor do Tipo Tensão para Freqüência

A figura a seguir mostra o princípio do ADC Tensão para Freqüência. Ele converte a tensão de entrada em um trem de pulsos digitais com a freqüência proporcional à tensão de entrada.

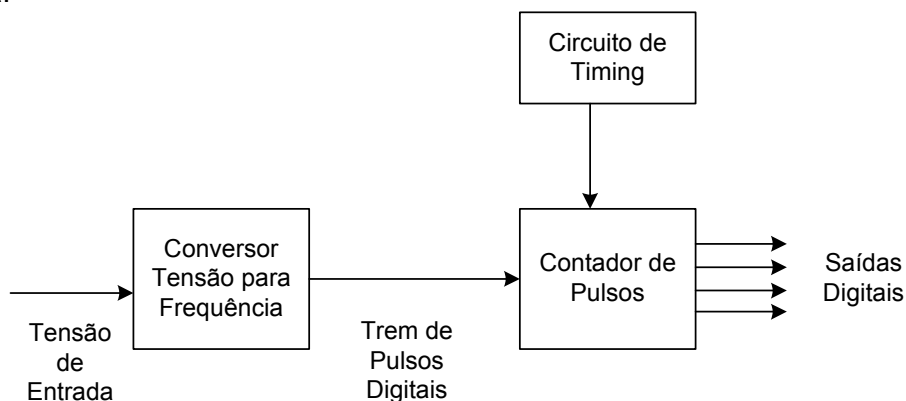


Figura 4.22– Esquema de ADC do tipo Tensão para Freqüência

A freqüência é determinada efetuando-se a contagem dos pulsos para um determinado intervalo de tempo e a tensão é inferida através de uma relação conhecida.

A conversão Tensão para Frequência tem um alto grau de rejeição a ruídos pelo fato da tensão de entrada ser efetivamente integrada no período de contagem. Este tipo de ADC é utilizado para conversão de sinais lentos e ruidosos. Ele é útil para aquisição remota de sinais em ambientes ruidosos. O trem de pulsos digitais é transmitido através de um par de fios até o contador. Isso elimina o ruído que poderia ser introduzido na transmissão de um sinal analógico.

Conversor do Tipo Integração

Este tipo de ADC usa a técnica de integração, que mede o tempo para carga e descarga de um capacitor para determinar a tensão de entrada. A figura a seguir mostra a chamada integração “Dual-slope”, que é uma técnica muito utilizada.

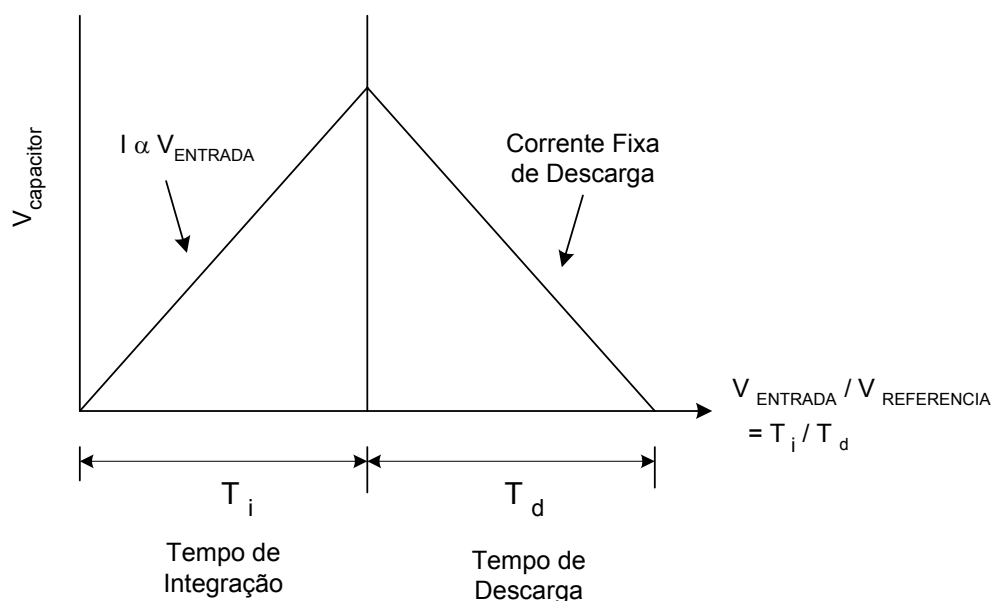


Figura 4.23– Integração e Descarga em Conversor do tipo Integração

Usando uma corrente que é proporcional à tensão de entrada, um capacitor é carregado por um intervalo de tempo definido. A tensão média de entrada é determinada medindo-se o tempo para descarga do capacitor usando uma corrente constante.

Com a integração da entrada por um determinado período de tempo reduz-se a influência dos ruídos na tensão de entrada, desde que o tempo de integração seja ajustado para um valor múltiplo do período ($1/f$) da tensão de entrada.

Este tipo de ADC é utilizado para multímetro digital de precisão e indicadores digitais de painel. Pode haver resolução de 20 bits. A desvantagem é a taxa de conversão relativamente lenta (60 Hz no máximo).

Sumário para os Tipos de Conversores ADC

Tipo de ADC	Resolução Típica	Velocidade Típica
Paralelo	4 – 8 bits	100 kHz – 500 MHz
Aproximações Sucessivas	8 – 16 bits	10 kHz – 1 MHz
Tensão para Frequência	8 – 12 bits	1 – 60 Hz
Integração	12 – 24 bits	1 – 60 Hz

Precisão e Resolução

A precisão é um fator importante quando se seleciona um ADC pra uso em aplicações que envolvam testes e medições. O erro de resolução de um ADC é chamado de:

- Erro de quantização

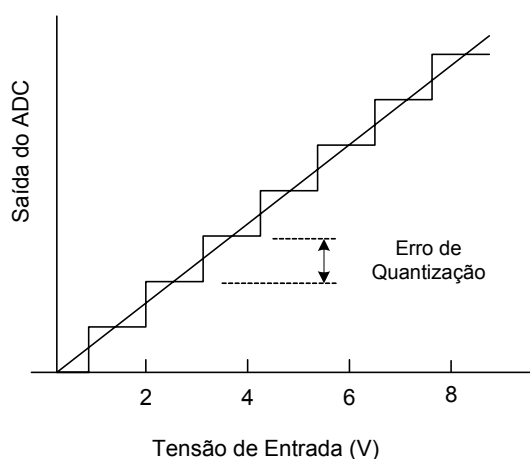


Figura 4.24– ADC Ideal, com apenas erro de quantização

Mas não é a única fonte de erros de um ADC. Há também:

- Erro de offset
- Erro de ganho
- Erro de linearidade
- Erro de sinal perdido

Mas um bom ADC se aproxima ao “erro de quantização” (proveniente da resolução). Esses erros podem decorrer de alguns parâmetros ambientais como:

- Ruído
- Variação de Temperatura.

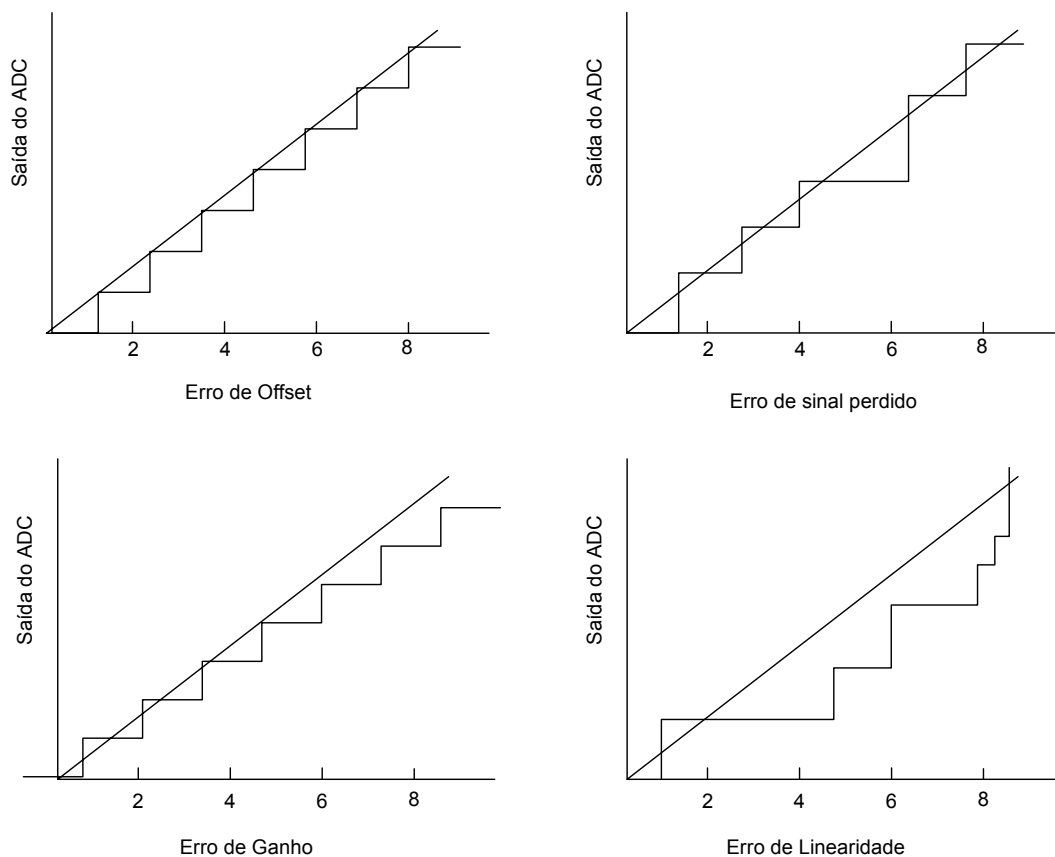


Figura 4.25– Tipos de Erros num ADC

Deve-se observar, também, que o erro de quantização é tanto maior quanto maior for a escala adotada (“full scale”) para a faixa de grandeza que se quer medir (por exemplo, uma faixa de 0 a 100 x In). Assim, deve-se adotar uma escala máxima que não introduza erros significativos na conversão A/D.

Exemplo de ADC de Aproximações Sucessivas para Relé de Proteção

O tempo que se leva para se efetuar uma conversão (por aproximações sucessivas) deve ser compatível com a taxa de amostragem e quantidade de canais, como mostram as figuras a seguir para um relé da Toshiba (ADC de 12 bits, geração 1995-1997):

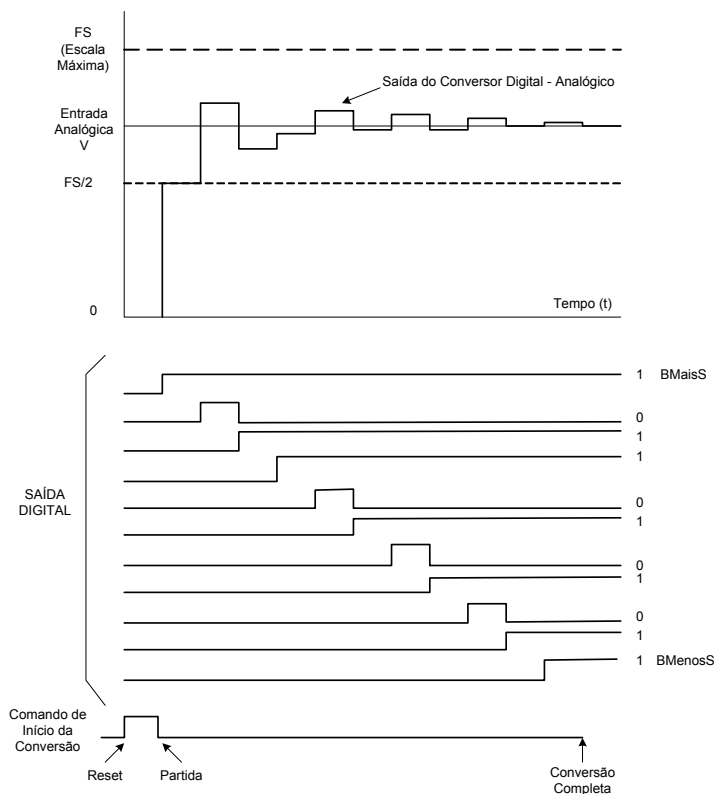


Figura 4.26– Ação de um ADC de 12 bits por Aproximações Sucessivas

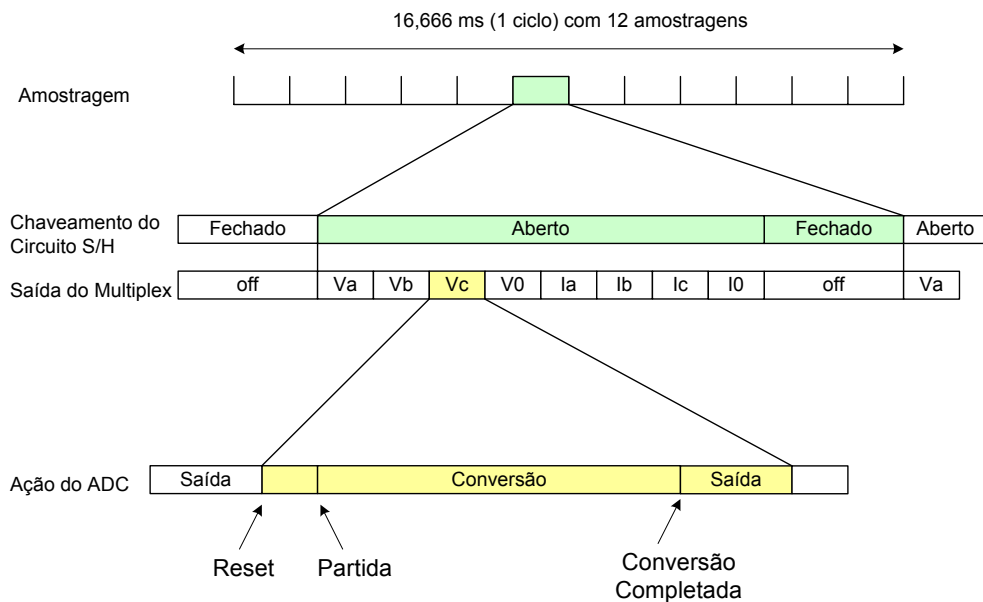


Figura 4.27– Timing para Amostragem, S/H, Multiplexação e A/D

4.3 BLOCO DE PROCESSAMENTO ARITMÉTICO

O bloco de processamento aritmético tem a responsabilidade de executar dos programas das funções de proteção, manutenção das várias funções envolvendo gerenciamentos diversos, temporizações, comunicação com subsistemas periféricos, etc. A figura a seguir mostra um esquema básico do bloco de processamento:

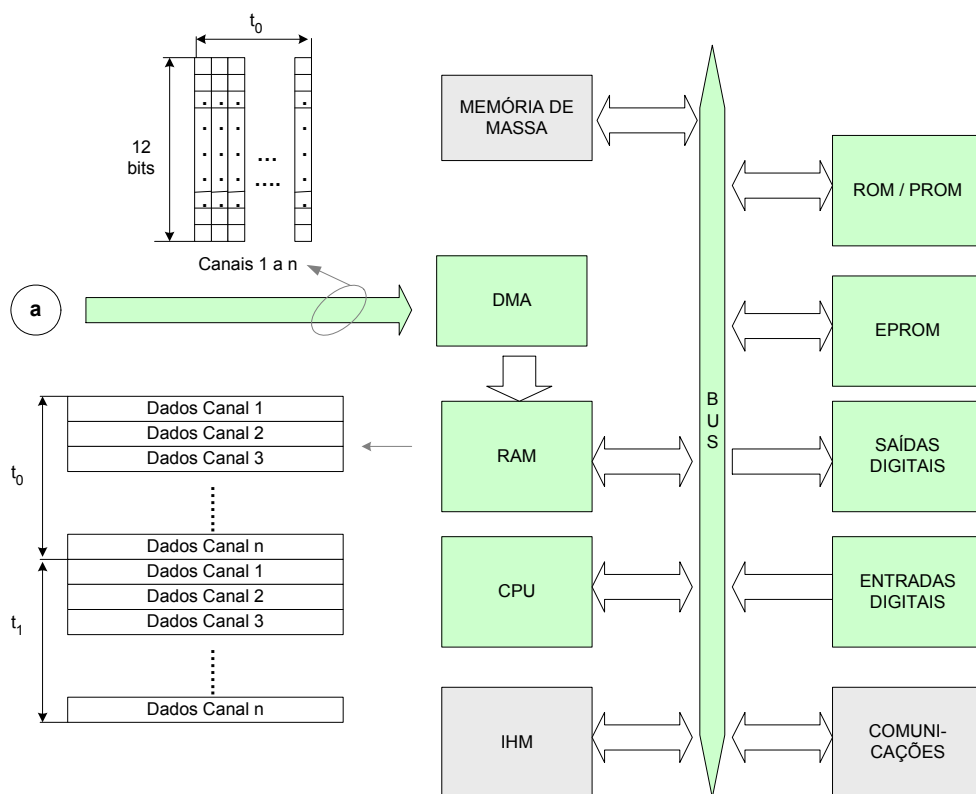


Figura 4.28– Bloco de Processamento Aritmético. Esquema Básico

A função DMA (Direct Memory Access) que permite transferência de dados diretamente para a memória RAM sem passar pelo processador (CPU) aliviando esse último. Geralmente esta função é utilizada quando há transferência de grande quantidade de dados entre a unidade processamento de dados e dispositivos externos.

As transferências de dados regulares entre dispositivos de entrada e saída e a memória é efetuadas através da CPU. Geralmente em relés digitais a função DMA é utilizada para escrever na RAM os valores digitalizados de tensão e corrente adquiridos pela conversão Analógica – Digital.

A memória RAM (Random Access Memory) segura os dados de entrada enquanto processados. Ela também pode ser usada para acumular dados ("buffer") para posterior

transferência a meios de armazenamento maiores (memória de massa). Adicionalmente a RAM é utilizada como área “rascunho” para cálculos envolvendo algoritmos diversos.

A memória apenas de leitura ROM (“Read Only Memory”) ou a memória programada apenas de leitura PROM (Programmable Read Only Memory) é usada para armazenamento permanente dos programas. Em alguns casos os programas podem ser executados diretamente da ROM [9] se o tempo de leitura é pequeno o suficiente. Se esse não for o caso, os programas são copiados da ROM para a RAM durante a fase de inicialização da proteção e, em tempo real, são executados através da RAM.

A memória “apagável” EPROM (“Erasable PROM”) é necessária para armazenar parâmetros e ajustes da proteção que podem ser alterados a qualquer hora, pelo usuário. Essa memória precisa manter os seus dados mesmo que o relé seja desligado da sua fonte de alimentação. Diversas tecnologias e esquemas são utilizadas para garantir essa característica.

A entrada digital é utilizada para adquirir informações externas como estados de contatos para o Bloco de Processamento Aritmético. A saída digital é utilizada para exteriorizar sinais de “trip”, alarmes e condições lógicas, além dos resultados do auto monitoramento e auto verificação, etc.

NOTA:

Um processador de 16 bits é adequado para conversor A/D de 12 bits. Porém, quando o conversor A/D é de 16 bits, exige-se processador de 32 bits.

As vezes deseja-se que o registrador oscilográfico de perturbações embutido no relé de proteção tenha uma resolução maior (maior taxa de amostragem). Neste caso, faz-se conversão A/D numa taxa superior (por exemplo, 32 amostragens por ciclo). Um processador é utilizado para gerenciar base de dados e registros oscilográficos. Um outro processador é destinado a fazer uma aquisição de dados de 16 amostragens por ciclo, aproveitando os sinais amostrados inicialmente, alternadamente. Nesse segundo processo deve-se emular digitalmente um segundo filtro “anti-aliasing”, agora para 16 amostragens por ciclo.

5. NOÇÕES BÁSICAS DE FILTRAGEM DIGITAL E ALGORITMOS

5.1 IDÉIA DA FILTRAGEM DIGITAL

Requisitos

Uma proteção eletromecânica convencional ou uma proteção eletrônica, analógica, responde a um valor de pico ou a um valor eficaz de uma grandeza elétrica, grandeza essa que considera todos os sinais presentes, harmônicos ou não. Uma proteção digital pode ser feita para atuar apenas para a grandeza fundamental do sinal.

O filtro digital tem a finalidade de remover sinais não desejados que o filtro “anti-aliasing” não removeu, como componente DC, e harmônicos das mais diversas ordens.

Os requisitos para filtragem dependem dos princípios da proteção e da sua aplicação. Por exemplo, para os relés de “ondas trafegantes”, os componentes à frequência industrial (60Hz) seriam “interferências” e os transitórios seriam as “informações”. Por outro lado, os relés de sobrecorrente, distância, etc. tratam de grandezas exclusivamente a 60 Hz.

Entre as exceções existem os relés que usam circuitos de restrição para harmônicas (por exemplo as proteções diferenciais de transformadores de potência) que precisam detectar frequências diferentes da fundamental.

Noção Básica

O presente capítulo tem a finalidade de mostrar, de uma maneira a mais simples possível, a noção de filtragem de sinais diferentes da fundamental numa proteção digital. Apenas nos capítulos seguintes é que se faz um tratamento mais academico para esse assunto.

Há dois tipos de filtros, os chamados “recursivos” e os “não recursivos”. Os filtros recursivos efetuam realimentação dos sinais de saída para a entrada para refinamento dos cálculos. Apenas em aplicações mais específicas, com problemas complexos, se aplicam filtros recursivos. O uso de filtros não recursivos é mais generalizado.

A tabela a seguir mostra exemplos de princípios para filtros não recursivos:

	Equação de Princípio para 12 amostragens por ciclo	Harmônicas e Componente DC removidos
1	$y_m = (x_m + x_{m-2})$	3, 9, ...
2	$y_m = (x_m - x_{m-2})$	DC, 6, 12, ...
3	$y_m = (x_m - x_{m-3})$	DC, 4, 8, ...
4	$y_m = (x_m - x_{m-4})$	DC, 3, 6, ...
5	$y_m = (x_m - x_{m-6})$	DC, 2, 4, ...
6	$y_m = x_m + \sqrt{3} \cdot x_{m-1} + x_{m-2}$	5, 7,

Vamos supor que uma onda periódica é amostrada 12 vezes por ciclo. Chamando de “m” uma determinada amostragem:

m-1 = uma amostragem anterior (30 graus antes).

m-2 = segunda amostragem anterior (60 graus antes)

.....

m-6 = sexta amostragem anterior (180 graus antes)

Vamos analisar então a seguinte equação de princípio de filtragem:

$$y_m = (x_m + x_{m-2})$$

O valor y_m resulta de uma composição de leituras. A figura a seguir mostra o princípio:

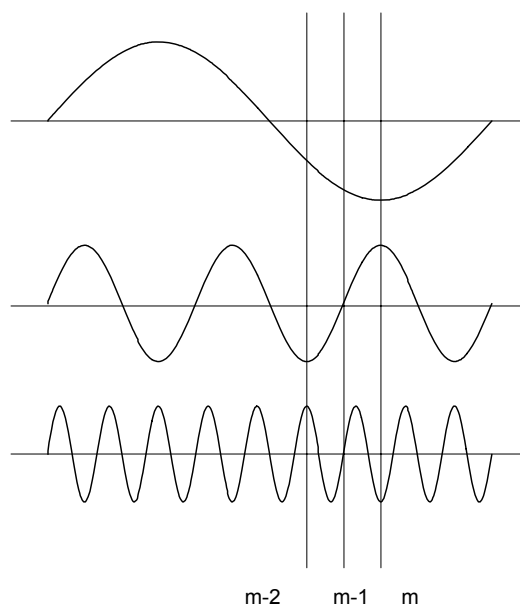


Figura 5.1 – Princípio de Filtragem de Terceira, Nona, Décima Quinta..

Observa-se que para a terceira e nona harmônicas da figura acima, o valor V_m é zero, isto é, há ganho zero para essas frequências. A característica de frequência desse filtro é mostrada na figura a seguir:

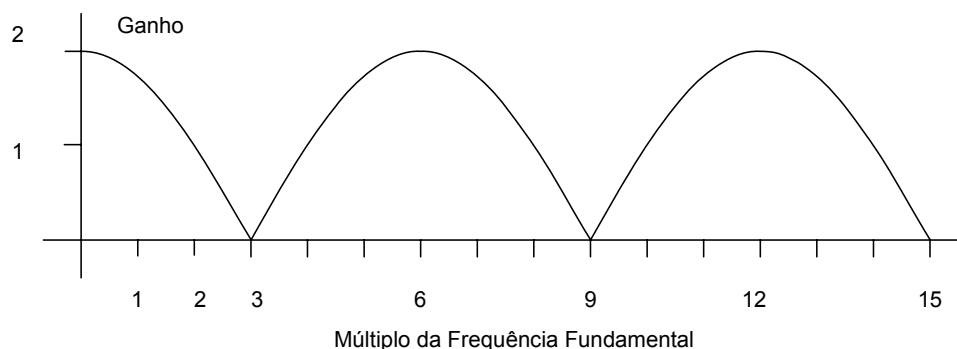


Figura 5.2 – Resposta em Frequência do Filtro

Considerando agora a seguinte equação de princípio de filtragem:

$$y_m = (x_m - x_{m-6}) / 2$$

O valor de y_m resulta de uma composição de leituras e a figura a seguir mostra o princípio:

SINAL COMPOSTO DE FUNDAMENTAL,
SEGUNDA HARMÔNICA E COMPONENTE DC

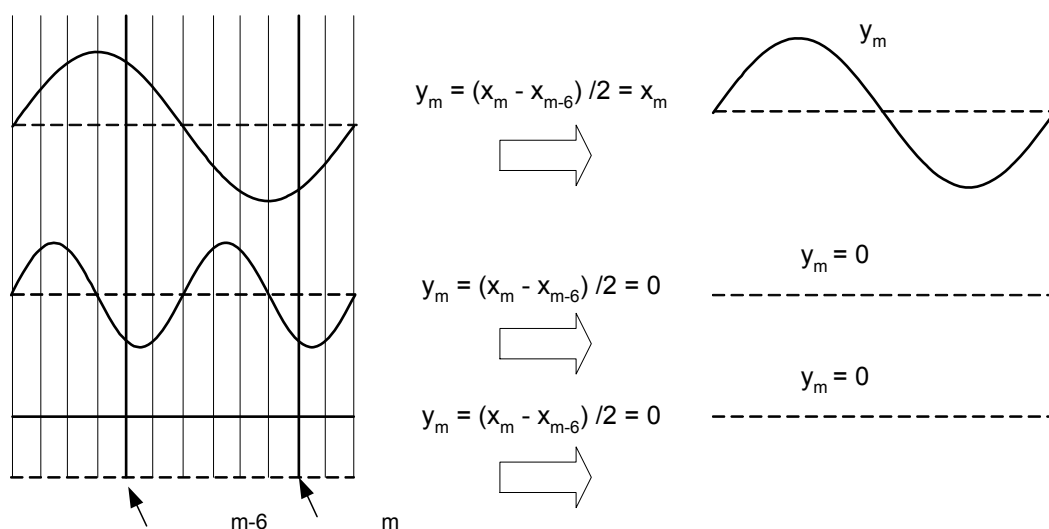


Figura 5.3 – Princípio de Filtragem de Componente DC, Segunda, Quarta, etc.

Observa-se que, ao se aplicar a fórmula de composição de leituras, filtra-se as harmônicas de ordem 2, 4... e a componente DC.

Na prática, considerando que há uma variação exponencial da componente DC, sobra ainda alguma parcela não filtrada.

A figura a seguir mostra a resposta em frequência deste filtro:

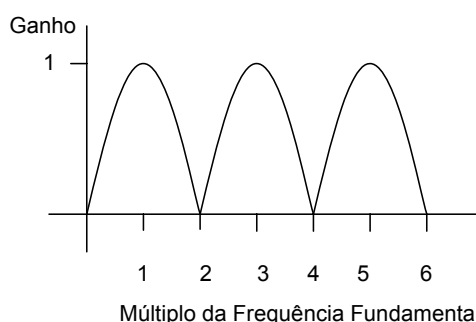


Figura 5.4 – Resposta em Frequência do Filtro

5.2 IDÉIA DE ALGORITMOS COM BASE EM SENÓIDES

Este capítulo procura mostrar princípios de algoritmos para relés digitais, sem entrar em maiores detalhes de tratamento matemático, já considerando que os sinais amostrados estejam livres de harmônicos e de componente DC,

5.2.1 Cálculo de Defasamento

Em relés analógicos, a combinação e defasamento de vetores de entrada eram realizados através do uso de capacitores, resistores, indutores e amplificadores operacionais. Em relés digitais o defasamento angular de um vetor (fasor) pode ser facilmente feito armazenando temporariamente os valores amostrados.

A figura a seguir mostra como os fasores de entrada são amostrados a um intervalo de tempo de 30 graus (12 amostragens por ciclo). Quando se deseja um atraso de 60 graus, o vetor de duas amostragens anteriores é utilizado. Quando se desejar um avanço de 120 graus, o vetor - V_{m-4} é utilizado:

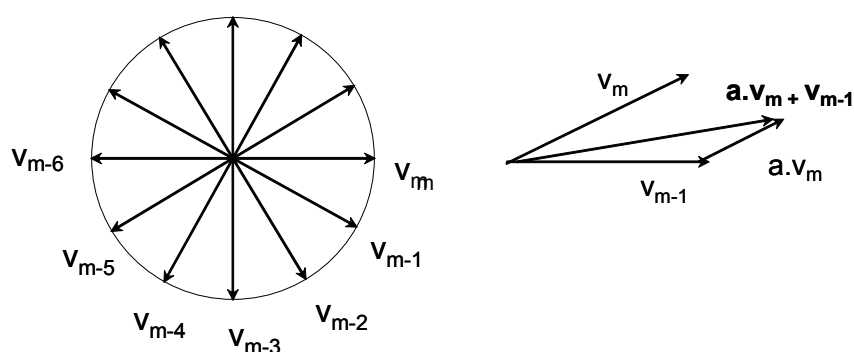


Figura 5.5– Princípio para Defasamento de um Vetor

Qualquer ângulo intermediário que não seja múltiplo de 30 graus no exemplo acima, pode ser determinado. O vetor composto $a.V_m + V_{m-1}$ da figura está θ graus adiantado com relação a V_{m-1} . Esse ângulo é:

$$\theta = \text{ArcTan} \frac{a \cdot \sin 30}{1 + a \cdot \cos 30}$$

Isto é, escolhendo o valor apropriado de a , qualquer ângulo pode ser obtido.

5.2.2 Cálculo da Amplitude

O algoritmo básico para o cálculo da amplitude de um sinal AC de entrada pode ser classificado em dois tipos: Tipo Adição e Tipo Multiplicação. Esses dois tipos podem ser subdivididos em:

Tipo adição

- a) Método da Área
- b) Método de Adição de Dois Valores
- c) Método do Quadrado da Amplitude

Tipo Multiplicação

- d) Método de Cálculo de 2 amostras consecutivas
- e) Método de Cálculo de 3 amostras consecutivas

As explicações a seguir referem-se ao Tipo Adição.

Método da Área

Baseia-se no princípio de que a área calculada de uma senóide em um intervalo de tempo é proporcional à sua amplitude.

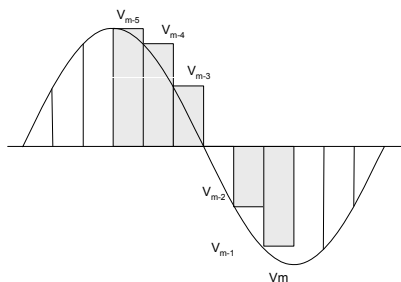


Figura 5.6 – Princípio para Cálculo de Amplitude. Método da Área

$$k|V| = \sum_{t=0}^5 |V_{m-t}|$$

O cálculo é simples. Como a operação consiste apenas de soma, o resultado obtido é de primeiro grau. No processamento digital, o tempo requerido para adição é menor do que aquele para multiplicação ou divisão.

O erro de cálculo é relativamente grande, estimado em $\pm 1,6\%$ para 12 amostragens por ciclo. Esse erro depende do ângulo em que é feita a amostragem.

O número de dados requeridos para cálculo é relativamente grande e isso afeta o tempo de operação da proteção.

Efeito Filtragem

Por outro lado, um efeito de filtragem está incorporado. As figuras a seguir mostram formas de onda com harmônicas de ordem 3 e 5. Nessas figuras as flechas indicam as diferenças decorrentes das harmônicas. Como se vê, quase todos os efeitos das harmônicas são canceladas entre si quando se somam dados para meio ciclo.

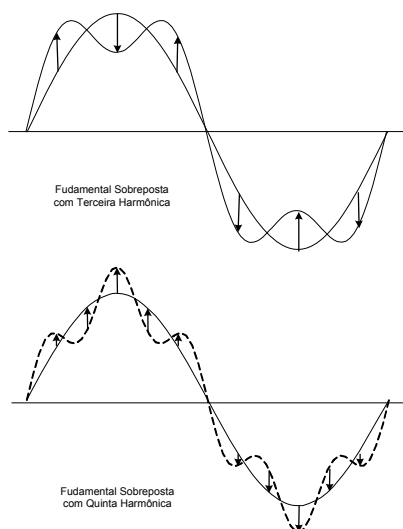


Figura 5.7 – Valores Amostrados Com Harmônicas.

Isto é, o método da área não elimina totalmente os efeitos das harmônicas mas alivia. O efeito da filtragem é grande para harmônicas de ordem ímpar, como mostra a figura a seguir.

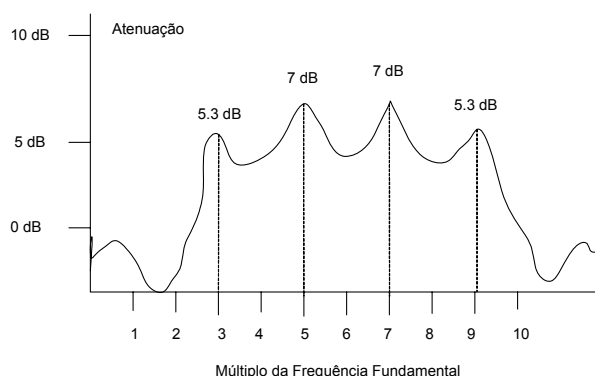


Figura 5.8 – Método da Área. Efeito Filtragem.

Método de Adição de Dois Valores

Como mencionado, o método da área tem a desvantagem de apresentar erro relativamente grande. Um método efetivo para minimizar esse erro é o método da adição de dois valores:

$$V_m = |v_m| + |v_{m-3}| + K \cdot [|v_m| - |v_{m-3}|]$$

A equação acima mostra que o erro é corrigido efetuando a soma absoluta de dois valores v_m e v_{m-3} , 90 graus defasados entre si, e corrigindo tal soma pelo valor absoluto da diferença entre dois valores.

A figura a seguir ilustra o princípio:

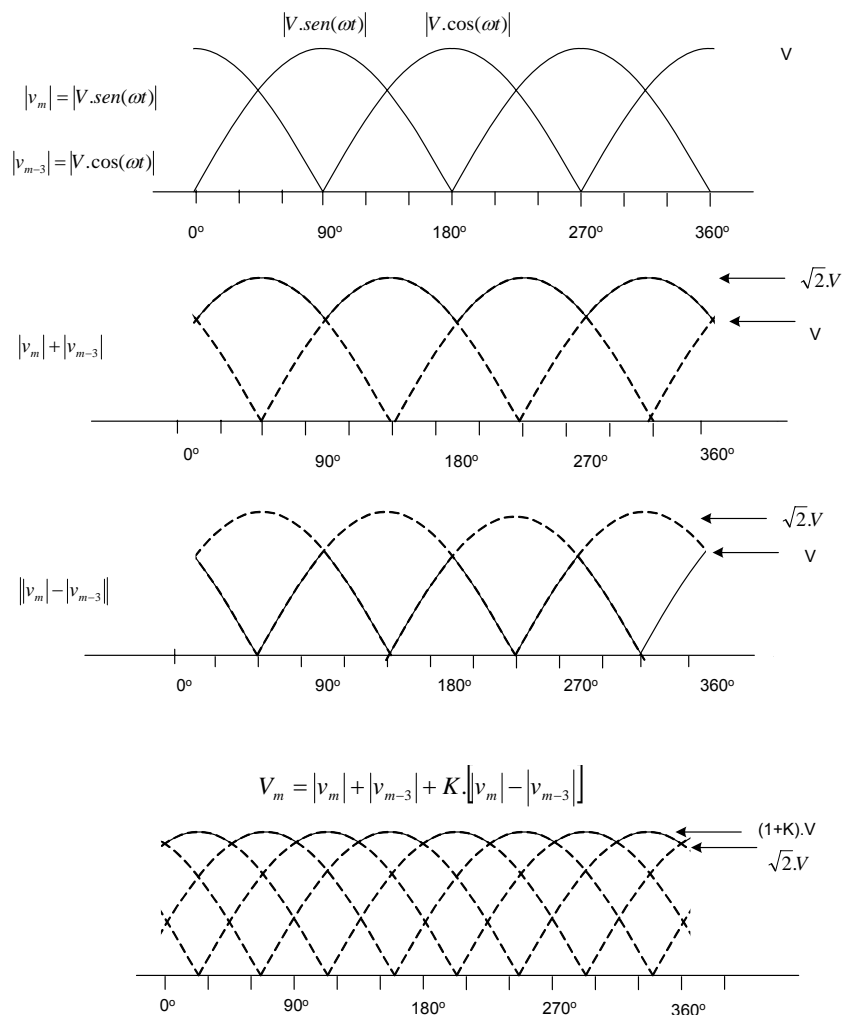


Figura 5.9 – Princípio do método da adição de dois valores.

Em suma este método tem as seguintes características:

- Como o resultado decorre de somas, ele é de primeiro grau, o que traz vantagens no tempo de cálculo.
- O erro devido à variação da fase de amostragem é muito pequeno ($\pm 0,6\%$).
- Um grande efeito de filtragem é obtido. Para a terceira harmônica, por exemplo, o nível de atenuação é maior que o do método da área por um montante que chega a 8 dB.

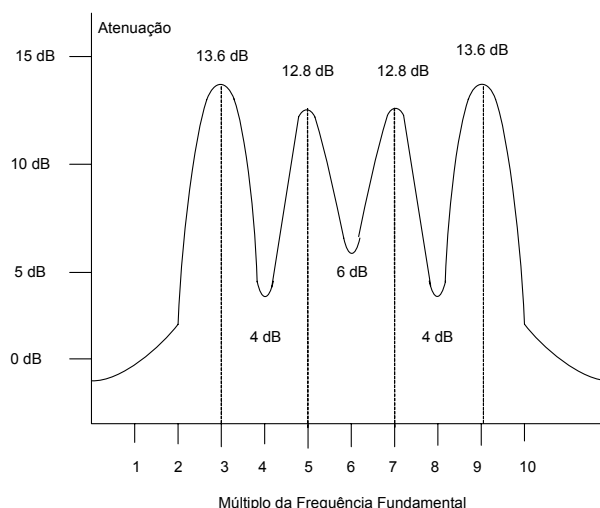


Figura 5.10 – Resposta em Frequência do Método da adição de dois valores.

Método do Quadrado da Amplitude

O método do Quadrado da Amplitude consiste, principalmente, de operações de multiplicação para calcular o quadrado de uma amplitude.

O método utiliza dois dados defasados em 90 graus como mostrado na figura a seguir.

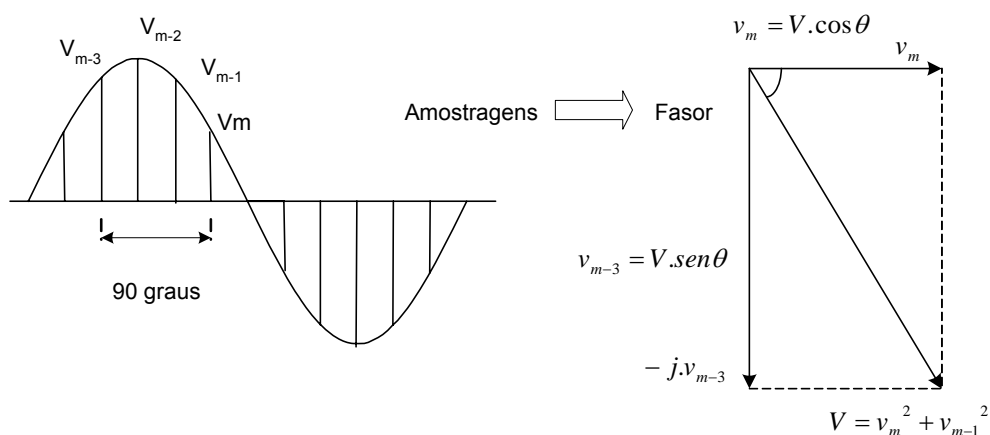


Figura 5.11 – Princípio do Método do Quadrado da Amplitude.

O método tem as seguintes características:

- a) Em princípio, não há erro introduzido no cálculo.
- b) A resultante é obtida de dois dados, que é a quantidade mínima de dados requerida para cálculo da amplitude. Isso contribui para a velocidade do cálculo.
- c) As operações aritméticas envolvidas são multiplicações na sua maior parte, o que contribui no sentido de diminuir a velocidade de cálculo. Como o resultado é dado na forma de quadrado, pode haver restrição para algum tipo de aplicação.
- d) Nenhum efeito de filtragem é esperado para este método.

5.2.3 Cálculo da Diferença de Ângulo de Fase

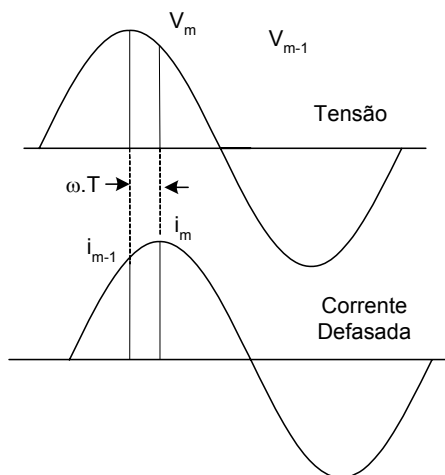
Para relés digitais o cálculo para se obter a diferença de ângulo de fase entre duas quantidades AC é essencial para determinar as características das funções de proteção que dependem desse ângulo.

É mais simples obter diferença de ângulo de fase através de relações trigonométricas usando seno e cosseno. Esses cálculos envolvem algoritmos do tipo multiplicação, que podem ser classificados como:

- a) Método de duas amostras consecutivas.
- b) Método de três amostras consecutivas.
- c) Método de duas amostras ortogonais (perpendiculares).

Os dois primeiros métodos, como mostram as figuras a seguir, exigem muitas operações de multiplicação e divisão.

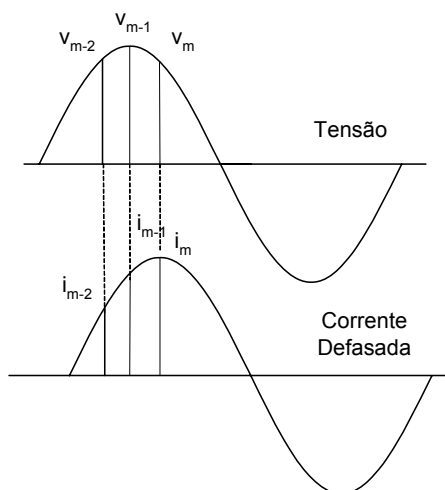
O terceiro método é mais usado.



Método das Duas Amostras Consecutivas

$$|V||I|\cos\theta = \{v_m i_m + v_{m-1} i_{m-1} - (v_{m-1} i_m + v_m i_{m-1}) \cos \omega T\} / \sin^2 \omega T$$

$$|V||I|\sin\theta = (v_m i_{m-1} - v_{m-1} i_m) / \sin \omega T$$

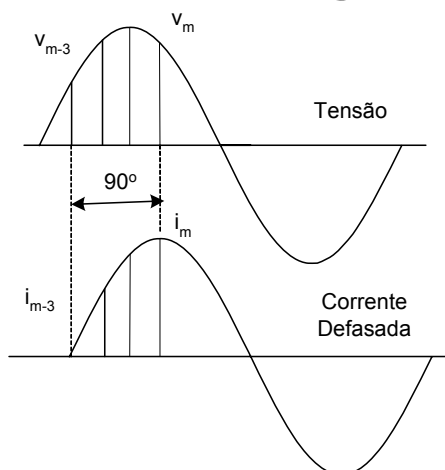


Método das Três Amostras Consecutivas

$$k|V||I|\cos\theta = v_m i_m - K v_{m-1} i_{m-1} + v_{m-2} i_{m-2}$$

Para 12 amostragens por ciclo em 60 Hz
(intervalo de 30 graus entre amostras):

$$k = 1/2 \quad \text{e} \quad K = 1$$



Método das Duas Amostras Ortogonais

$$|V||I|\cos\theta = v_m i_m + v_{m-3} i_{m-3}$$

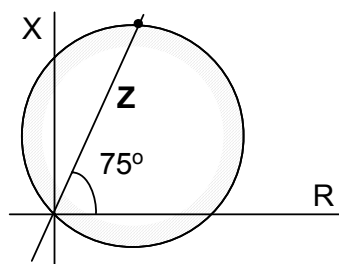
$$|V||I|\sin\theta = v_m i_{m-3} - v_{m-3} i_m$$

Figura 5.12 – Princípios para Cálculo da Diferença de Ângulo de Fase

5.2.4 Alguns Algoritmos para Características de Impedâncias

Com base num relé com 12 amostragens por ciclo, são apresentados a seguir alguns algoritmos para características de proteção de distância.

Característica Mho

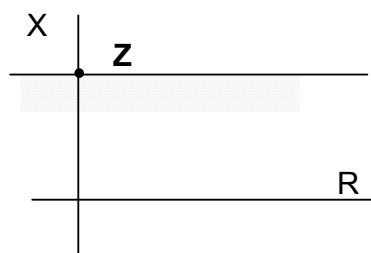


$$Z.I.V.\cos(\theta-75) - V^2 \geq K_0$$

$$Z' \cdot \{(i_m + i_{m-1})v_m + (i_{m-3} + i_{m-4})v_{m-3}\} - (V_m^2 - V_{m-3}^2) \geq K_0'$$

Figura 5.13 – Princípios para Cálculo de Característica Mho

Característica de Reatância

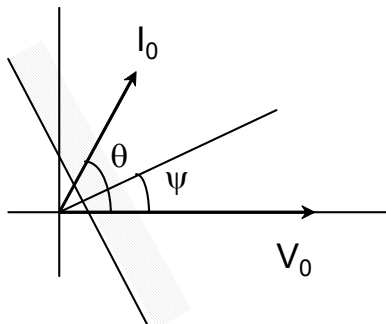


$$Z \cdot I^2 - V.I.\sin(\theta) \geq K_0$$

$$Z' \cdot (i_m^2 + i_{m-3}^2) - (i_m \cdot V_{m-3} - i_{m-3} \cdot v_m) \geq K_0'$$

Figura 5.14– Princípios para Cálculo de Característica de Reatância

Elemento Direcional de Terra



$$I_0 \cdot V_0 \cdot \cos(\theta - \psi) \geq K_0$$

$$i_{0m}(a \cdot v_{0m+1} + v_{0m}) + i_{0m-3}(a \cdot v_{0m-2} + v_{0m-3}) \geq K_0'$$

Figura 5.15– Princípios para Cálculo de Característica Direcional

6. PROCESSOS DE FILTRAGEM E ALGORITMOS

6.1 CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo tem a finalidade de apresentar itens básicos e comuns a muitos algoritmos que serão apresentados.

Terminologia

$y(t)$ = O valor instantâneo de uma forma de onda AC, seja uma tensão ou uma corrente.

y_k = A amostra k ésima da forma de onda $y(t)$.

ω_0 = A frequência fundamental do sistema elétrico em radianos por segundo.

Δt = O intervalo de tempo fixo entre duas amostragens consecutivas.

$$y_k = y(k.\Delta t)$$

θ = Ângulo à frequência fundamental entre duas amostragens: $\theta = \omega_0 \Delta t$

O valor de $y(t)$ pode assumir a forma: $y(t) = Y_c . \cos \omega_0 t + Y_s . \sen \omega_0 t$

Onde Y_c e Y_s são números reais. Mais genericamente, considerando fontes de erros no Sistema Elétrico (transitórios, saturações, etc.) e erros no próprio sistema de amostragem, a expressão poderia ser escrita como:

$$y(t) = Y_c \cos \omega_0 t + Y_s \sen \omega_0 t + \varepsilon(t)$$

6.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

A expressão anterior pode ser escrita de um modo mais amplo como:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N Y_n S_n(t) + \varepsilon(t)$$

Onde Y_n são os coeficientes, $S_n(t)$ são os sinais amostrados (S de “sample”) e $\varepsilon(t)$ representando matriz de erros, com:

$$S_1(t) = \cos(\omega_0 t)$$

$$S_2(t) = \sen(\omega_0 t)$$

$$S_3(t) = \cos(2\omega_0 t)$$

$$S_4(t) = \sen(2\omega_0 t)$$

.....

$$S_{N-1}(t) = \cos(N/2.\omega_0 t)$$

$$S_{N-1}(t) = \sen(N/2.\omega_0 t)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(\Delta t) & S_2(\Delta t) & \dots & S_N(\Delta t) \\ S_1(2\Delta t) & S_2(2\Delta t) & \dots & S_N(2\Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1(K\Delta t) & S_2(K\Delta t) & \dots & S_N(K\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_K \end{bmatrix}$$

K = número de Amostras

Δt = intervalo entre 2 amostras subsequentes

$K \geq N$

Ou: $[y] = [S].[Y] + [\varepsilon]$

NOTA: O Anexo a este documento fornece uma Base Matemática para o Método dos Mínimos Quadrados.

Da teoria da Probabilidade e Processos Randômicos [9], assumindo que a matriz de erros tem média zero e a matriz de covariância:

$$E\{\varepsilon.\varepsilon^T\} = W$$

A solução para a expressão matricial $[y] = [S].[Y] + [\varepsilon]$ pela técnica dos MÍNIMOS QUADRADOS (PONDERADA) será:

$$Y = (S^T.W^{-1}.S)^{-1}S^T.W^{-1}.y$$

Quando se conhece W (dados estatísticos de erros estimados numericamente), se aplica esta expressão.

A técnica dos MÍNIMOS QUADRADOS (Não Ponderada) assume que os erros não são correlacionados e são independentes entre si (na matriz de erros) e têm uma covariância do tipo DIAGONAL. Assim, W será múltiplo de uma matriz unitária. Consequentemente a solução MINIMA QUADRADA será:

$$Y = (S^T.S)^{-1}.S^T.y$$

Substituindo as expressões ortogonais de seno e cosseno nesta expressão, o valor ij ésimo da matriz $S^T.S$ será:

$$(S^T.S)_{ij} = \sum_{k=1}^K S_i(k\Delta t).S_j(k\Delta t)$$

$$= \begin{cases} K/2 & \text{para } i = j \\ 0 & \text{para } i \neq j \end{cases}$$

Ajuste com o Método de Mínimos Quadrados (Ponderação)

Pode-se ajustar um filtro de Fourier, Coseno, etc. considerando qualquer tipo de sinal que se possa imaginar que o dado de entrada tenha, através de função de ajuste de W na expressão:

$$Y = (S^T \cdot W^{-1} \cdot S)^{-1} S^T W^{-1} y$$

O problema é saber o tipo e o tamanho do sinal que se quer eliminar [13].

6.3 ALGORITMOS DE FOURIER E DERIVADOS

Muitos métodos de cálculos para relés de proteção são baseados nos componentes à frequência fundamental das correntes e tensões medidas pelo relé. E vários algoritmos usam informações dos FASORES contidas nos sinais de entrada.

Um filtro digital que ao mesmo tempo remova as frequências diferentes da fundamental e também forneça informações fasoriais seria desejável para a implementação da proteção digital. Três desses filtros são vistos neste capítulo:

- Filtro de Fourier
- Filtro Fourier com Mínimo Quadrado
- Filtro Coseno

Um sinal de tensão em regime no domínio do tempo pode ser expresso por:

$$v(t) = V_{Pico} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)$$

Num relé digital este sinal é amostrado N vezes por ciclo. Assim, a entrada é representada por uma série de amostras S_k , com k variando de 1 a N .

O relé digital processa os dados amostrados S_k multiplicando cada amostra por um Coeficiente determinado pelo tipo do filtro digital empregado.

ANÁLISE DE FOURIER

O capítulo 9 deste documento apresenta como Anexo a base matemática da Análise de Fourier, onde se pode ver com mais detalhes a matemática apresentada neste capítulo.

Antes de se partir para detalhes da Transformada, as definições de fasores devem ser estabelecidas. A equação seguinte é para uma tensão senoidal:

$$v(t) = V_{Pico} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)$$

Expandindo essa equação teremos: $v(t) = V_{Pico} \cdot \cos(\theta) \cdot \text{sen}(\omega t) + V_{Pico} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \cos(\omega t)$

Quando $v(t)$ é amostrado, o valor resultante da amostragem é denominado como S_k . Como S_k representa valor amostrado com uma taxa de amostragem de N amostras por ciclo da tensão senoidal, o cálculo da Transformada Discreta de Fourier para os COMPONENTES FUNDAMENTAIS pode ser definido pelas equações seguintes:

$$V_{Real} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N [S_k \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot \frac{k}{N})]$$

$$V_{Imag} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N [S_k \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \frac{k}{N})]$$

Aplicando essas equações à equação original da tensão, temos:

$$V_{Real} = V_{Pico} \cdot \cos(\theta)$$

$$V_{Imag} = V_{Pico} \cdot \text{sen}(\theta)$$

A magnitude (módulo) do fasor de tensão pode ser calculada por:

$$V_{mag} = \sqrt{V_{Real}^2 + V_{Imag}^2}$$

$$V_{mag} = \sqrt{V_{Pico}^2 \cdot (\cos(\theta)^2 + \text{sen}(\theta)^2)} = V_{Pico}$$

$$\text{Angulode}V = \text{ArcTan}\left(\frac{V_{Imag}}{V_{Real}}\right) = \theta$$

Com essas definições, convertem-se os valores amostrados em FASOR usando cálculos da Transformada Discreta de Fourier.

O fasor é representado de duas formas:

- Forma retangular com as partes Real e Imaginária.
- Forma polar, com módulo e ângulo de fase.

O cálculo determina que as partes Real e Imaginária de cada corrente e tensão de entrada usada pelo relé. Isto significa que cada amostra de tensão e corrente é multiplicada por um fator “seno” para se obter as componentes reais, e por um fator “coseno” para se obter as componentes imaginárias. Essas quantidades são somadas sobre N consecutivas amostras para se obter os resultados (fasores).

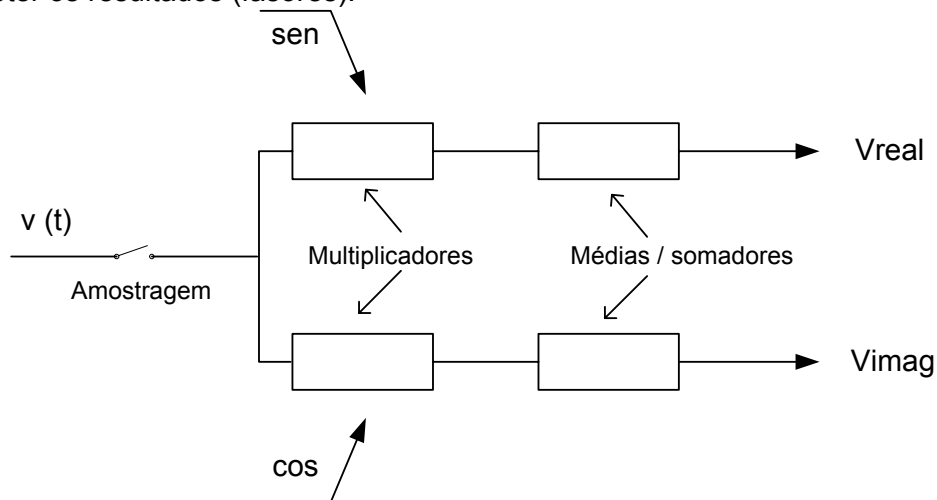


Figura 6.01 – Representação esquemática do algoritmo de Fourier de onda completa

Por exemplo, num relé de 12 amostragens por ciclo, ter-se-ia:

$\cos(2\pi \cdot \frac{k}{N})$	k	$\sin(2\pi \cdot \frac{k}{N})$	k
1	0, 12	0	0, 6, 12
$\sqrt{3}/2$	1, 11	1/2	1, 5
1/2	2, 10	$\sqrt{3}/2$	2, 4
0	3, 9	1	3
$-\sqrt{3}/2$	4, 8	-1/2	7, 11
-1/2	5, 7	$-\sqrt{3}/2$	8, 10
-1	6	-1	9

Resposta em Freqüência

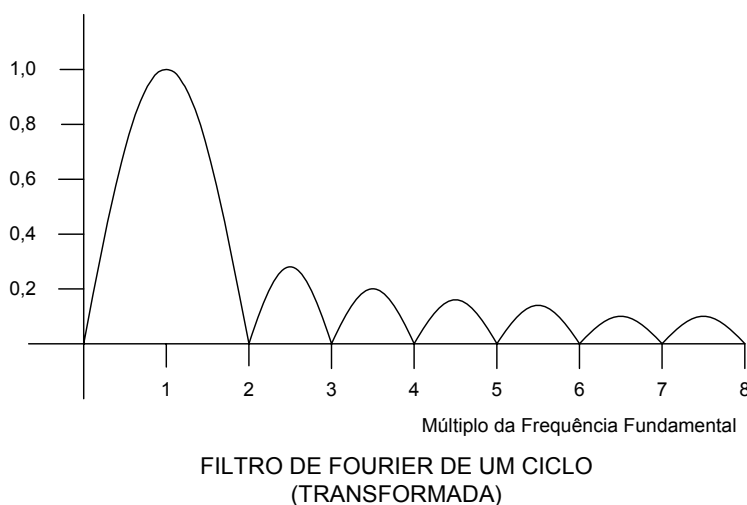


Figura 6.2 – Resposta em Freqüência do Filtro de Fourier de onda completa

A figura acima mostra a resposta em freqüência, para condição em regime:

Observa-se que para o FILTRO DE FOURIER DE UM CICLO (Transformada Discreta de Fourier), há filtragem de componente DC (desde que constante) e de todas as harmônicas a partir da segunda.

Resposta a componente DC

A componente DC não é constante, decaindo exponencialmente com o tempo. Assim sendo o filtro de Fourier não elimina essa componente. A bibliografia [16] mostra que:

- A **componente exponencial DC tem um impacto significativo no algoritmo de Fourier**. No pior caso, pode ocorrer erro da ordem de 20% da magnitude da grandeza.
- Essa influência pode ser minimizada através de algoritmos, dependendo da aplicação desejada.
- Dependendo do fabricante e da aplicação, até componentes de hardware são utilizados para minimizar o impacto da componente DC.

FILTROS RECURSIVOS E NÃO RECURSIVOS

Há dois modos de calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT): Recursivo e Não-Recursivo.

O método **Não-Recursivo** requer que cada ponto de dado amostrado seja salvo na memória (a quantidade de dados salvos depende da “janela de dados”) e que todo o processo de somatória seja efetuada para cada conjunto de dados amostrados. O dado

mais velho torna-se o valor inicial e o dado mais novo torna-se a amostra N-sima. Os termos reais e imaginários precisam ser calculados do início.

O método **Recursivo** requer que o produto dos coeficientes do seno e do cosseno com valores de dados amostrados usados para gerar as somas sejam salvos (a quantidade de dados salvos depende da “janela de dados”) e um processo abreviado de somatória é efetuado. Neste método o produto mais antigo é removido da soma e o produto mais novo é acrescentado à soma. Assim, somente o valor da última amostra é necessário para o cálculo ao invés de se ter de calcular para todas as amostras da “janela”. Isto reduz a quantidade de cálculos efetuados, o que pode permitir que o relé efetue operações adicionais ou que aumente sua taxa de amostragem. Este método, entretanto, requer mais velocidade de computação.

Processo Recursivo para o FILTRO DE FOURIER

No processo recursivo, ao invés de recalcular os fatores seno e cosseno e re-efetuar a somatória para cada amostra, somente os fatores seno e cosseno da nova amostra são calculados. Então os fatores seno e cosseno da amostra mais antiga são removidos da soma e os novos termos adicionados à soma.

$$V_{Real}(k) = V_{Real}(k-1) + S_k \cos() - S_{k-N} \cdot \cos()$$

$$V_{Imag}(k) = V_{Imag}(k-1) + S_k \cdot \sin() - S_{k-N} \cdot \sin()$$

Isso significa que cada produto seno e cosseno sejam salvos até que eles sejam removidos da soma. Adicionalmente, a soma também precisa ser salva até que ambos, soma “k-1” para a amostra anterior e a soma “k” para a amostra presente, sejam usadas no cálculo recursivo. Após o cálculo recursivo efetuado para cada amostra, os valores são atualizados. Isso diminui o tempo necessário para calcular a Transformada Discreta de Fourier.

Geralmente os algoritmos de 01 ciclo para relés digitais, são do tipo recursivo, segundo [9].

FILTRO DE FOURIER COM MÍNIMOS QUADRADOS

É possível o uso de transposição e inversão de matrizes para considerar a minimização / diluição de erros ou mesmo considerar uma matriz de erros (supostos previamente esperados e conhecidos) no Algoritmo de Fourier. Nesse caso, o algoritmo chama-se Fourier com Mínimos Quadrados.

Resposta em Frequência

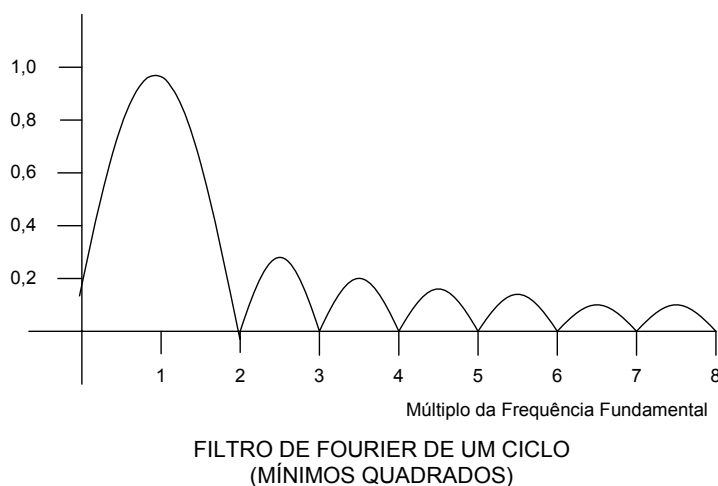


Figura 6.3 – Resposta em Frequência do Filtro de Fourier de onda completa de Mínimos Quadrados

Verifica-se que, com o ajuste utilizando a técnica dos Mínimos Quadrados, a componente DC, mesmo que teoricamente constante, não é totalmente removida. Por outro lado, o método dilui erros concentrados devido a ruídos que anda possam influenciar.

FOURIER DE MEIO CICLO

O Filtro de Fourier tem a capacidade de trabalhar em diferentes tamanhos de “janela de dados”. Mostra-se a seguir, o uso de janela de “Meio Ciclo”.

O Filtro original usa todos os dados amostrados do último ciclo para efetuar a somatória. O chamado “Filtro Fourier de Meio Ciclo” gera a somatória usando as amostras coletadas do último meio ciclo (“janela de dados” de meio ciclo).

Usando Filtro de meio ciclo, a proteção poderá detectar alterações na forma de onda de um modo mais rápido que o caso Filtro de Ciclo Total. Bem como, menos dados precisam ser salvos. Entretanto há diferenças nas ações de filtragem entre os dois métodos.

Numa proteção de 16 amostragens por ciclo, o método de de Ciclo Total utiliza as 16 últimas amostras para efetuar a somatória, enquanto que o método de Meio Ciclo utiliza as 8 últimas amostras. Desde que a quantidade de dados somados é menor, há um efeito sobre a constante que é usada multiplicar as somas, sendo $(2/N)$ substituído por $(4/N)$. Os temos

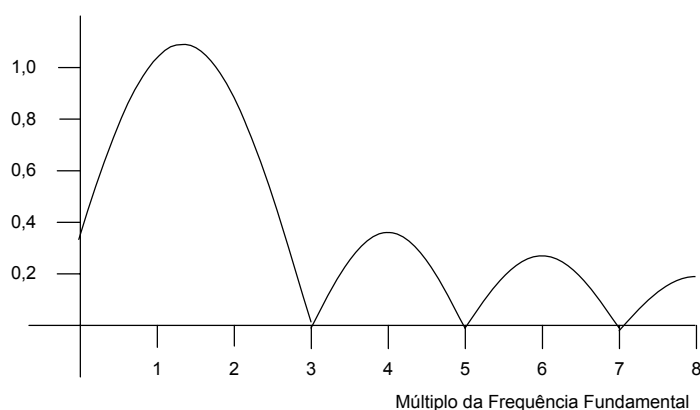
seno e cosseno continuam a ser determinados pelo fator $(2.\pi.k/N)$. Assim, esses últimos termos continuam a ser determinados pela taxa de amostragem ($N=16$) ao invés do tamanho da “janela de dados”.

$$V_{Real} = \frac{4}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N/2} [S_k \cdot \text{sen}(2.\pi \cdot \frac{k}{N})]$$

$$V_{Imag} = \frac{4}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N/2} [S_k \cdot \text{cos}(2.\pi \cdot \frac{k}{N})]$$

O Filtro Fourier de Meio Ciclo pode ser implementado tanto pelo método recursivo como pelo não-recursivo. Mas, geralmente os algoritmos de meio ciclo para relés digitais, são do tipo recursivo, segundo [9].

Resposta em Frequência



FILTRO DE FOURIER DE MEIO CICLO

Figura 6.4 – Resposta em Frequência do Filtro de Fourier de Meio Ciclo

O filtro de Fourier de Meio Ciclo efetua a filtragem de harmônicas de ordem ímpar. Não há filtragem de componente DC teoricamente constante, mas apenas uma atenuação.

FOURIER DE CICLO FRACIONADO

Como mencionado, o Filtro de Fourier tem a capacidade de trabalhar em diferentes tamanhos de “janela de dados”. Se for menor que meio ciclo, tem-se o chamado Ciclo Fracionado.

Esse tipo de algoritmo é sempre não recursivo, segundo [9].

FILTRO COSENO

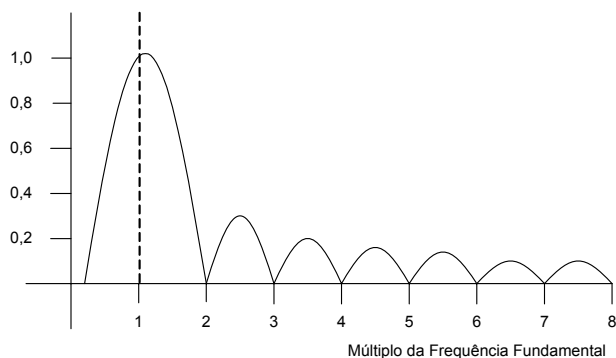
O Filtro de Fourier descrita anteriormente usa coeficientes “seno” e “coseno” para obter partes reais e imaginárias dos sinais filtrados. No sentido de se obter partes reais e imaginárias, dois sinais defasados de 90 graus são requeridos, o que é atendido pelo Filtro de Fourier.

Uma aproximação pode ser feita usando apenas os coeficientes “coseno”, sendo que o segundo sinal (que seria coeficiente “seno”) utilizado é o coeficiente “coseno” obtido 90 graus antes. Desse modo, se requer apenas o cálculo de um conjunto de dados ao invés de dois conjuntos de dados, como é feito Filtro de Fourier.

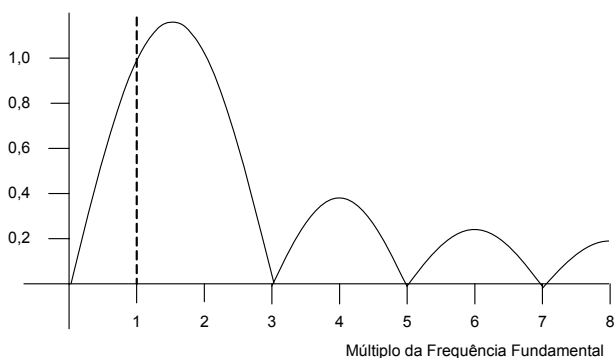
Entretanto essa aproximação (Filtro Coseno) pode ser feita apenas pelo método “**não-recursivo**”.

O Filtro Coseno pode utilizar uma “janela de dados” de um ciclo, de meio ciclo ou um quarto de ciclo. Quanto menor a “janela de dados”, há a tendência de ser mais rápido para detectar alterações na forma de onda. Uma janela de 4 amostras para 16 amostragens por ciclo é interessante pois o defasamento básico é de 90 graus, o que vai de encontro com o princípio do filtro.

Resposta em Frequência



FILTRO COSENO DE UM CICLO



FILTRO COSENO DE MEIO CICLO

Figura 6.5 – Resposta em Frequência do Filtro Coseno

O filtro Coseno de um ciclo tem valor de ganho Zero para componente DC e para harmônicas de 60 Hz. Perde-se a rejeição para harmônicas de ordem PAR quando se usa filtro Coseno de meio ciclo.

É importante observar que a resposta em frequência não é o único parâmetro para se escolher o filtro para uma dada proteção. Tudo depende da função de proteção desejada, dos princípios de medição, características do hardware e dos tempos envolvidos / gastos em cada etapa.

O filtro coseno de 1 ciclo é um dos melhores considerando que:

- Rejeita muito bem o componente DC com queda exponencial pelo fato de ser do tipo “duplo diferencial” [13].
- Rejeita todas as harmônicas (par e ímpar).
- Tem boa resposta para transitórios.

6.4 FILTRO DE WALSH

O Anexo mostra um sumário de base teórica do que seja uma função de Walsh. O Filtro de Walsh, baseado nessa função, trabalha apenas com dois números inteiros, enquanto que o filtro de Fourier trabalha com números complexos.

Enquanto que num Filtro de Fourier, as componentes à Frequência Fundamental são dados por:

$$Y_c = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K y_k \cos(k \cdot \frac{2\pi}{K}) \quad \text{e} \quad Y_s = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K y_k \cdot \text{sen}(k \cdot \frac{2\pi}{K}) \quad \text{com} \quad |Y| = \sqrt{Y_c^2 + Y_s^2}$$

Para o Filtro de Walsh há:

$$Y_{cal} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k \text{cal}_1(k \cdot \frac{1}{K}) \quad \text{e} \quad Y_{sal} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k \text{sal}_1(k \cdot \frac{1}{K}) \quad \text{com} \quad |Y| = \sqrt{Y_{cal}^2 + Y_{sal}^2}$$

As funções $\text{sal}_m(t)$ e $\text{cal}_m(t)$ de um Filtro de Walsh correspondem aos $\text{sen}(m \cdot \omega_0 t)$ e $\text{cos}(m \cdot \omega_0 t)$ de um Filtro de Fourier e têm valores ± 1 . Nota-se uma grande similaridade.

A quantidade de programação computacional é muito menor para a função de Walsh, mas para qualquer forma de onda de entrada, o filtro de Walsh requer o cálculo de muito mais termos de coeficientes que o filtro de Fourier.

Assim, a simplicidade da programação é contrabalançada pela necessidade de um grande número de termos. Sua resposta em frequência é a mesma do Filtro de Fourier de Um Ciclo, desde que uma quantidade suficiente de coeficientes seja utilizada.

FILTRO CAL

Da mesma maneira que para o Fourier há o filtro Coseno, por analogia pode-se ter filtro CAL para o Walsh.

A figura a seguir mostra a resposta em frequência de um Filtro CAL.

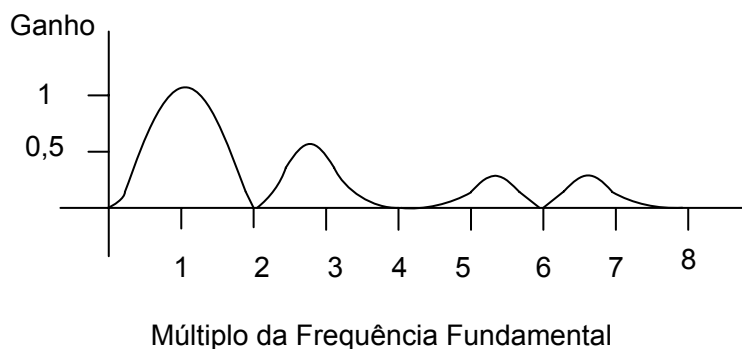


Figura 6.6 – Resposta em Frequência do Filtro CAL

Também este filtro CAL rejeita muito bem o componente DC com queda exponencial pelo fato de ser do tipo “duplo diferencial” [13]

6.5 FILTRO KALMAN

O Filtro de Kalman provê solução quando se deseja estimar condições dinâmicas do sistema. Para sistemas de Proteção este filtro é utilizado quando se deseja uma ferramenta que possa manipular medições (evolução de parâmetros com o tempo). Por exemplo, um ruído não constante ou ruído em condição específica para ser filtrado.

Conceitos sobre esse filtro podem ser encontrados na referência [9]. Não é objetivo deste curso.

6.6 TEMPO DE RESPOSTA NUM FILTRO DIGITAL

Outro aspecto a salientar é que a resposta em frequência mostrada ocorre em condição de regime. Para condição **transitória** de mudança de estado, há um certo período de tempo até que o filtro comece a responder de acordo com a resposta mostrada. Mas esta resposta depende muito da característica do sinal.

Por exemplo, um filtro coseno de meio ciclo ganha em rapidez de, mas tem uma resposta transitória mais pobre que o de um ciclo.

A figura a seguir mostra a resposta para a Corrente, em uma condição específica de presença de Erro Randômico no Filtro de Fourier, portanto com componente DC não totalmente filtrado. Observa-se uma demora superior a 3 ciclos até a acomodação em regime.

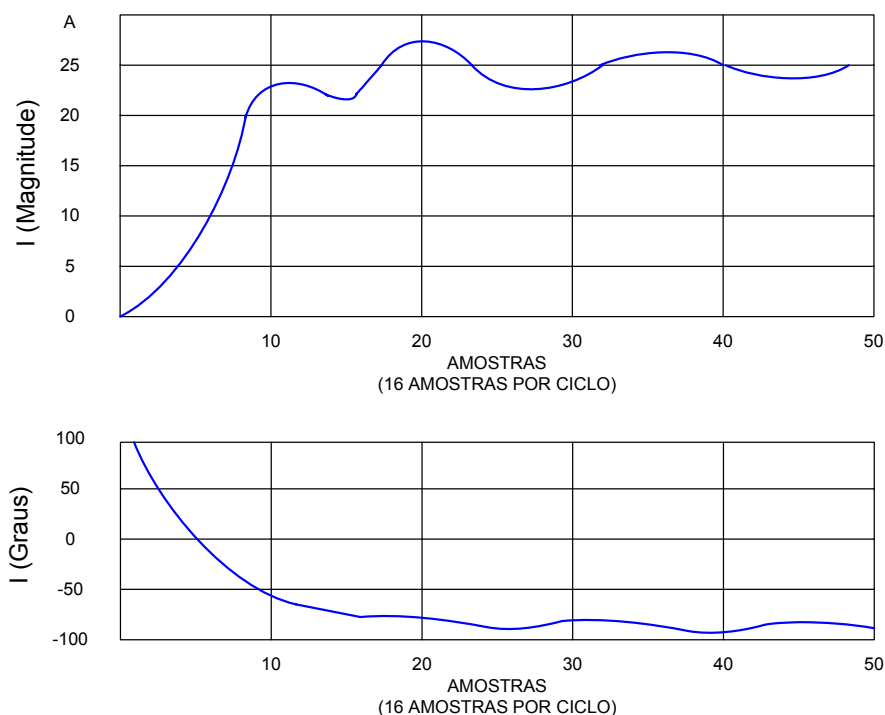


Figura 6.7 – Transítório de Acomodação para saída do Filtro Digital FOURIER DE 01 CICLO.

6.7 FILTRAGEM DE COMPONENTE DC

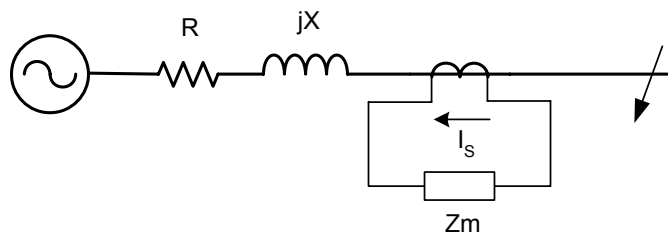
Dependendo do algoritmo utilizado, essa componente pode ser quase totalmente filtrada. Entretanto, erros randômicos e também características específicas dos filtros podem evitar que se remova, total ou parcialmente a componente DC.

Algoritmos Específicos

Métodos dos Mínimos Quadrados especiais com funções de correção para componentes DC têm sido desenvolvidos e aplicados para filtros de meio ciclo [14], através de algoritmos com características adaptivas. Para filtros Fourier de 1 ciclo há o algoritmo da referencia [16].

Uso de Impedância Réplica (“Mimic”)

O princípio de eliminação do efeito da componente DC é mostrada na figura a seguir.



Se Ângulo de $Z_m = \text{ArcTan}(X/R)$
Então a tensão através de Z_m não
conterá Offset DC

Figura 6.8 –Princípio de Compensação do Offset da Componente DC

Ajustando-se Z_m com a mesma relação X/R do sistema elétrico protegido, no ponto de aplicação da proteção e utilizando a tensão através de Z_m ao invés da corrente I_s , cancela-se o efeito offset da corrente.

Esse princípio pode ser aplicado digitalmente, isto é, calcula-se uma tensão através do “**mímico digital**”, para cancelar a componente DC. Uma dificuldade é que o ângulo adotado da relação X/R é aproximado, não sendo 100% preciso.

A figura a seguir mostra o efeito da Impedância Réplica para eliminar o efeito da componente DC no mesmo filtro da figura anterior. Note-se que se utiliza a tensão $I.Z$ (Z de réplica digital) ao invés da corrente I . Há acomodação em cerca de 01 ciclo, aumentando a velocidade de definição da proteção.

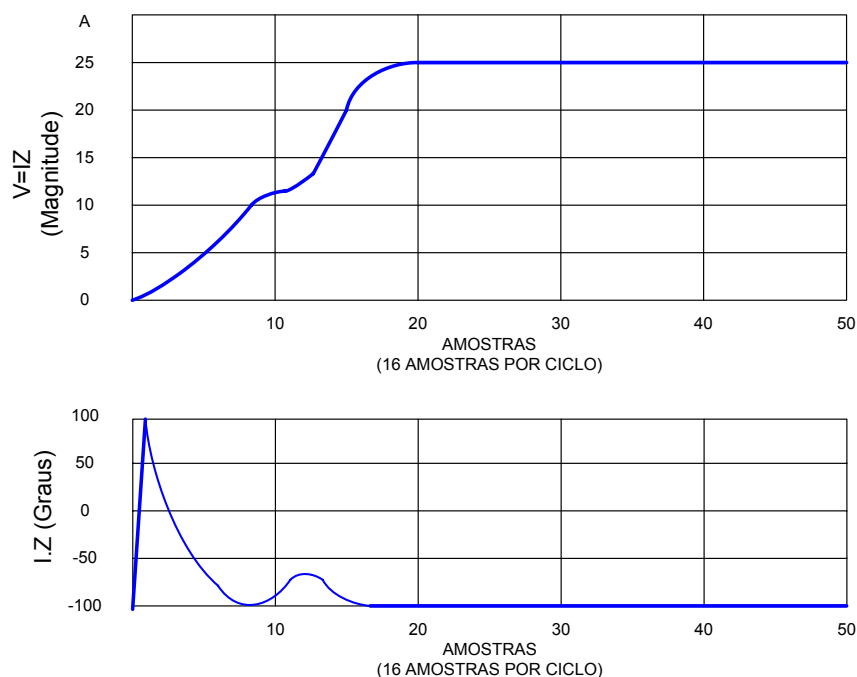
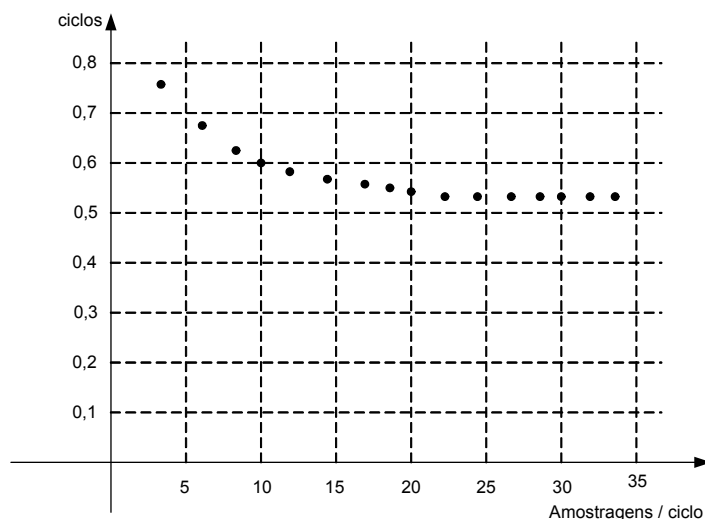


Figura 6.9 –Filtro Digital FOURIER DE 01 CICLO com Impedância Réplica

6.8 TEMPO DE OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO E A TAXA DE AMOSTRAGEM

Uma taxa de amostragem maior pode significar tempo de operação menor para o relé, mas essa melhoria é temperada pelo atraso introduzido pelo filtro.

A figura a seguir mostra o tempo de operação de uma proteção de distância em primeira zona, para um determinado tipo de falta, em função da taxa de amostragem da proteção:



Filtro Digital Fourier de 1 ciclo.

Figura 6.10 –Influência da Taxa de Amostragem na velocidade da proteção

Partindo de uma taxa de amostragem de 4 por ciclo e indo até 8 por ciclo, observa-se um ganho de cerca de $1/8$ de ciclo (0,125 ciclos) ao custo de se dobrar o esforço de computação.

Dobrando-se a taxa de amostragem de novo, para 16 por ciclo, ganha-se cerca de $1/16$ de ciclo no tempo. Dobrando de 16 para 32, ganha-se apenas $1/32$ de ciclo.

Porque esse tipo de saturação, isto é, o ganho vai se estreitando mesmo que se aumente muito a taxa de amostragem da proteção? É que os filtros digitais são baseados em janela de 1 ciclo e o aumento da velocidade vem da redução do tempo do filtro analógico de entrada e redução do tempo de latência do processamento.

6.9 ALGORITMOS NÃO FASORIAIS

6.9.1 Equações Diferenciais no Domínio do Tempo

Algoritmos com equações diferenciais são baseados em modelos de sistemas ao invés de modelos de sinais (formas de ondas). Tomando o diagrama unifilar simplificado a seguir:

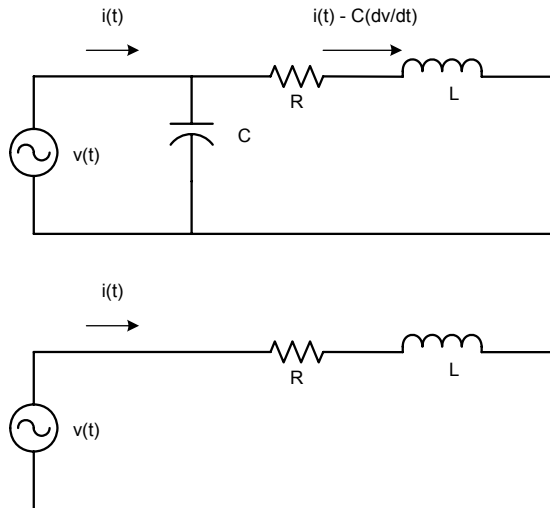


Figura 6.11 – Modelo para Algoritmo de Equação Diferencial

Considerando a capacitância:

$$v(t) = R.i(t) + L \frac{di(t)}{dt} - RC \frac{dv(t)}{dt} - LC \frac{d^2v(t)}{dt^2}$$

Sem considerar a capacitância:

$$v(t) = R.i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

Considerando a medição da impedância, tendo a medição de $v(t)$ e $i(t)$ pode-se estimar os parâmetros R e L . Como derivadas de quantidades medidas são difíceis de serem produzidas, faz-se o artifício de cálculo de integrais sobre dois intervalos consecutivos (para duas incógnitas, duas equações).

Para simplicidade, vamos analisar o caso sem Capacitância.

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t)dt = R \int_{t_0}^{t_1} i(t).dt + L[i(t_1) - i(t_0)] \quad \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt = R \int_{t_1}^{t_2} i(t).dt + L[i(t_2) - i(t_1)]$$

Os intervalos citados precisam ser acomodados para os valores amostrados pelo relé. Se as amostragens são uniformemente espaçadas no intervalo Δt e a regra trapezoidal é empregada para as integrais, temos:

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t)dt = \frac{\Delta t}{2} [v(t_1) + v(t_0)] = \frac{\Delta t}{2} [v_1 + v_0]$$

$$\int_{t_0}^{t_1} i(t)dt = \frac{\Delta t}{2} [i_1 + i_0]$$

E as duas equações em dois intervalos consecutivos podem ser escritas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}(i_{k+1} + i_k) & (i_{k+1} - i_k) \\ \frac{\Delta t}{2}(i_{k+2} + i_{k+1}) & (i_{k+2} - i_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}(v_{k+1} + v_k) \\ \frac{\Delta t}{2}(v_{k+2} + v_{k+1}) \end{bmatrix}$$

Então, três amostragens de tensão e corrente (k, k+1 e k+2) são suficientes para determinar R e L como:

$$R = \frac{(v_{k+1} + v_k).(i_{k+2} - i_{k+1}) - (v_{k+2} + v_{k+1}).(i_{k+1} - i_k)}{(i_{k+1} + i_k).(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1}).(i_{k+1} - i_k)}$$

$$L = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{(i_{k+1} + i_k).(v_{k+2} + v_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1}).(v_{k+1} + v_k)}{(i_{k+1} + i_k).(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1}).(i_{k+1} - i_k)} \right]$$

Este algoritmo de equações diferenciais teria a vantagem de ser bem rápido (três amostragens), mas é melhor não depender de somente três amostragens. Muitas implementações dependem de uma série de cálculos com 3 amostragens cada.

Tem a vantagem de não ser afetada pela componente DC.

Há problema, entretanto, com essas equações diferenciais.

O denominador $(i_{k+1} + i_k).(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1}).(i_{k+1} - i_k)$ pode-se tornar um valor muito pequeno, fazendo que o erro da divisão para cálculo de R e L seja amplificado. Para superar essa dificuldade, cálculos sucessivos (de 3 amostragens) são feitos (há contador) de modo que o valor seja confirmado.

6.9.2 Ondas Trafegantes

A idéia não é nova. Já existiram relés de proteção de tecnologia estática que eram baseados no princípio de medição de ondas trafegantes. Com a nova tecnologia digital também é possível, com mais precisão e confiabilidade, utilizar o princípio.

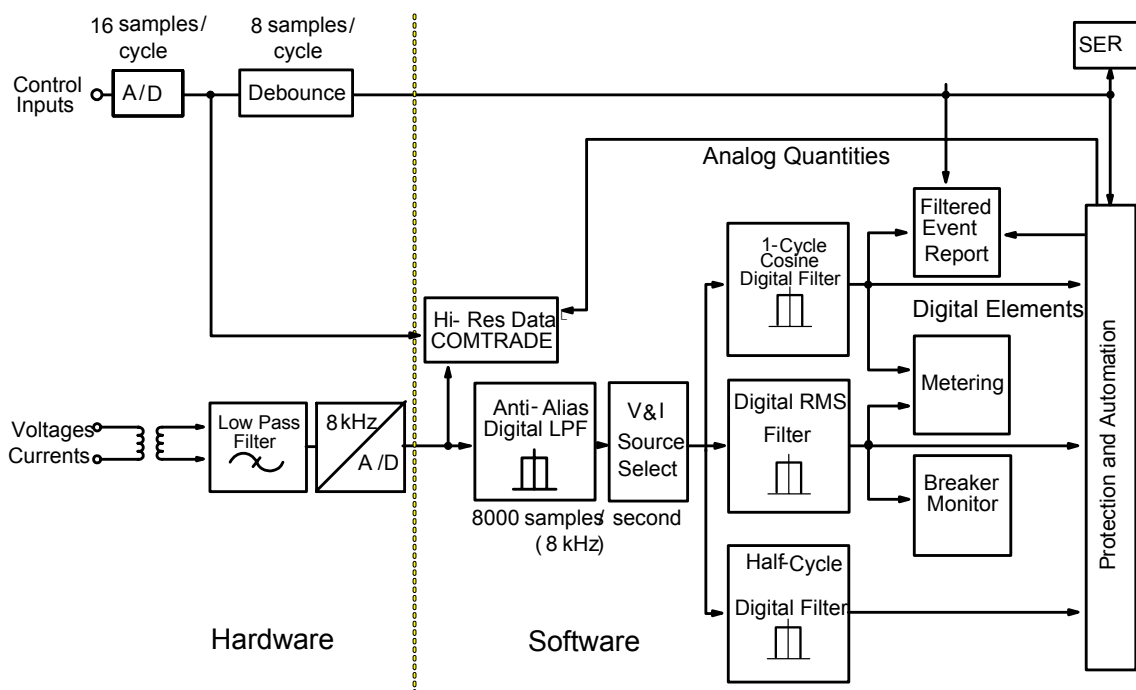
Não é objetivo do presente documento apresentar o esquema utilizado por relés digitais. Apenas se menciona que a proteção mede a onda criada pelo curto-circuito na LT e que atinge o ponto de aplicação da proteção. Vide teoria de ondas trafegantes.

No caso não se medem grandezas elétricas senoidais, mas sim os sinais de alta frequência associados à onda. O que seria “sinal” para uma proteção convencional, não se aplica à proteção de ondas trafegantes.

7. EXEMPLO DE UM RELÉ DIGITAL COMERCIAL E SEUS RECURSOS

7.1 CONVERSÃO A/D

Mostra-se aqui o processo de conversão AD de um relé comercial, no caso a proteção SEL421 da Schweitzer.

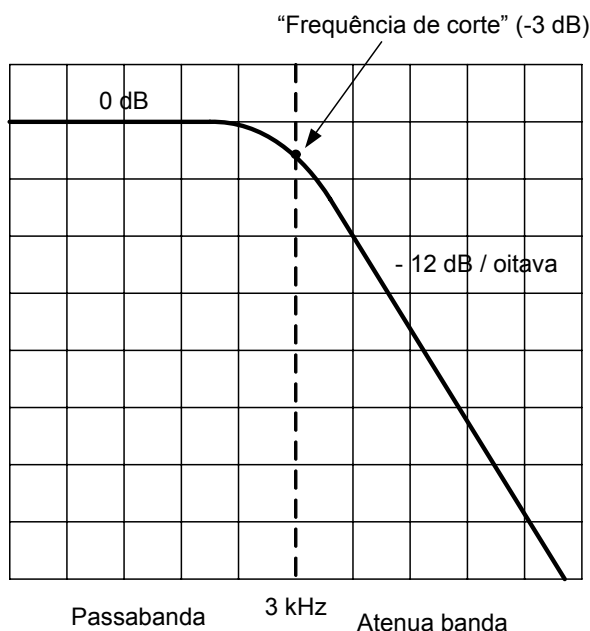


Exemplo de Proteção Schweitzer SEL421 e SEL451

Figura 7.01 – Conversão A/D de um relé comercial moderno

Observa-se que a conversão A/D por hardware é feita com uma taxa de amostragem fixa de 8 kHz por segundo (8000 amostragens / s ou 133,33 amostragens por ciclo em um sistema de 60 Hz, considerando a frequência constante).

Há um filtro passa baixa que faz as funções de “anti-aliasing” com característica de -3 dB a 3 kHz. Isso significa:



Definição de frequência de corte:

$$\begin{aligned}\text{Ganho } (-3 \text{ dB}) &= 10 \cdot \log(p_2/p_1) \\ -0,3 &= 10 \cdot \log(p_2/p_1) \\ p_2/p_1 &= 0,5 \text{ (meia potência)}\end{aligned}$$

Se filtro Butterworth de segunda ordem:

-12 db / oitava ou
redução de 16 x no sinal
de 3 kHz para 6 kHz

Figura 7.02 – Filtro passa baixa analógico do relé SEL421 (taxa de amostragem de 8 kHz)

Mantendo-se a frequência de amostragem constante no tempo, por um relógio próprio (não amarrado à frequência do sistema) obtém-se com mais facilidade o comportamento da variação de frequência do sistema supervisionado e a análise de harmônicas – o que é ótimo para a oscilografia. Então tem-se uma oscilografia (formato COMTRADE) com alta taxa de amostragem, já dentro da ordem de grandeza das taxas adotadas de registradores oscilográficos “stand-alone”.

7.2 FILTROS DIGITAIS

Os sinais já digitalizados em 8 kHz passam agora por um filtro digital “anti-aliasing” pois haverá reamostragem. Considerando uma reamostragem de cerca de 16 amostragens por ciclo, a frequência de corte deverá estar em torno de 8 amostragens por ciclo. A proteção do exemplo aplica um filtro digital com -3 dB a 640 Hz (ou frequência de corte em torno de 10 amostragens por ciclo, se frequência constante. Note que ainda a amostragem é fixa por intervalo de tempo e não de ciclo.

Uma vez filtrado, pode-se aplicar algoritmos de filtragem para várias finalidades, já sem erro de “alias”. Note que há três tipos de filtros:

- Filtro coseno de 1 ciclo que é utilizado para a função de distância, com algoritmo final que considera 8 amostragens por ciclo (este fabricante considera que não tem necessidade de mais amostragens para função de distância).
- Filtro coseno de 0,5 ciclo é utilizado para a função de falha de disjuntor, onde se exige rápida definição de grandeza de corrente.

- Filtro de valor eficaz para medição e para monitoramento de disjuntor (cálculo da capacidade de interrupção disponível para fins de manutenção).

7.3 FILTRAGEM ADAPTATIVA

Deve-se observar agora, que ao se fazer “amostragens por ciclo” e algoritmo de Fourier ou cosseno para cálculo da grandeza à frequência fundamental, a quantidade de amostras deve ser constante, por ciclo, independente da frequência do sistema elétrico. Caso contrário, haverá erro na recomposição do vetor a partir dos valores amostrados.

Assim sendo, a proteção tem uma “Filtragem Adaptativa” a 16/8 amostras por ciclo, que é um recurso onde se faz a necessária adaptação à frequência do sistema, evitando erros de medição (chamado “Tracking de Frequência” na faixa de 40 a 65 Hz). A figura a seguir é esquemática e ilustra o processo que é utilizado para função de distância:

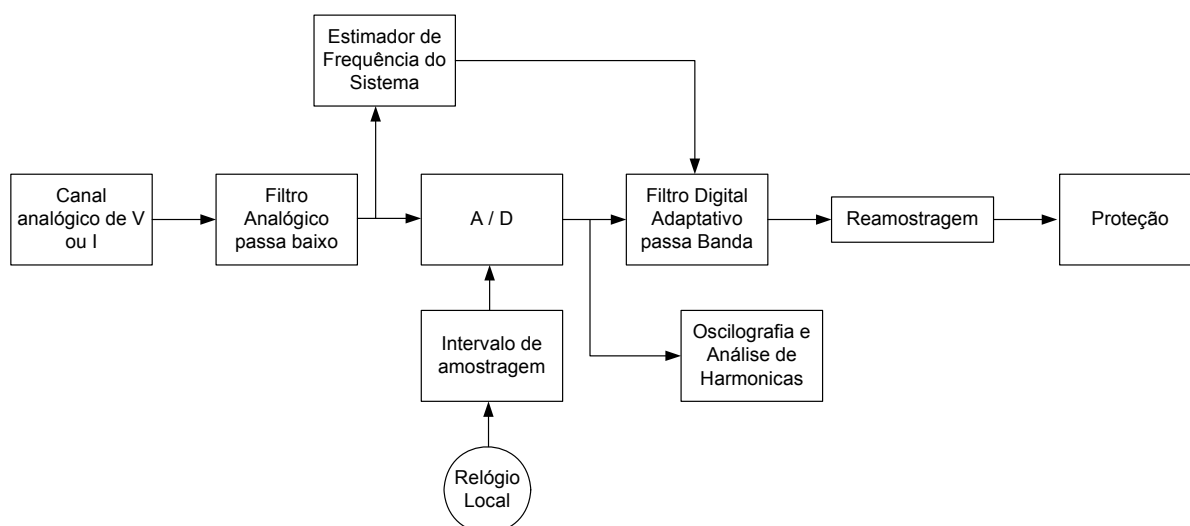


Figura 7.03 – Processo adaptativo de amostragem para “Tracking de Frequência”

8. IMPACTOS DA TECNOLOGIA DIGITAL EM PROJETOS, INSTALAÇÕES E NA OPERAÇÃO.

Métodos, processos e técnicas de projeto, instalação, operação e manutenção da proteção, controle e supervisão são significativamente alterados com o advento da TECNOLOGIA DIGITAL, se comparados com os adotados com a tecnologia convencional (eletromecânica e eletrônica analógica).

Este capítulo apresenta alguns comentários sobre os itens de projetos, instalações e operação. O capítulo seguinte trata da manutenção.

8.1 INSTALAÇÕES E PROJETOS

8.1.1 Substituição de Equipamentos “Stand Alone” por Funções Digitais

No passado era necessária a aquisição de equipamentos específicos para várias funções como por exemplo:

- Medição de Controle
- Religamento Automático
- Verificação de Sincronismo
- Falha de Disjuntor
- Monitoração de Disjuntor
- Monitoração de Serviço Auxiliar DC
- Localização de Defeitos
- Registrador de Eventos
- Registrador de Perturbações

Hoje, um relé digital multifuncional incorpora uma ou mais dessas funções, dependendo do modelo, finalidade e fabricante.

Isso implica que:

- Não há necessidade de aquisição de equipamento a parte para essas funções, porém continua havendo necessidade de especificar o que se deseja, agora como função ou facilidade embutida.
- Se antes havia cablagem das instalações externas (TP, TC, disjuntor, serviço auxiliar, telecomunicações) aos equipamentos a parte e destes com os relés de proteção, agora continua havendo necessidade de cablagem dessas mesmas instalações externas ao relé digital, mas sem necessidade de eventuais duplicações. Em geral há redução de cablagem.

Por exemplo, há necessidade de apenas um conjunto de informações dos TP's ao novo relé digital, e não mais a vários equipamentos com por exemplo, medidores, check de sincronismo e relés que utilizam informação de tensão.

- Deve-se sempre tomar o cuidado de perceber que essas funções exigem sinais externos e há, por exemplo, tendência de esquecimento no novo projeto digital, pelo projetista.

8.1.2 Sistemas de Comando e Controle por Lógicas Embutidas em Relés ou Outros Dispositivos Eletrônicos Inteligentes

No passado as lógicas de comando e controle em uma instalação elétrica eram realizados por relés eletromecânicos de diversas características (capacidade de contato, tempo de atuação), dependendo da aplicação. Os relés e contadores eram conectados através de cabos de controle (cobre), com borneiras e chaves diversas.

Isso implicava em painéis com muita cablagem e relés ou contadores, temporizadores, chaves diversas e outros auxiliares para sinalização e alarme.

Hoje, muitos circuitos de comando e controle podem ser implementados através de:

- Programadores Lógicos Controláveis (PLC)
- Lógicas embutidas em relés de proteção.

PLC's são utilizados em sistemas mais completos de automação ou esquemas especiais de proteção. Lógicas de relés são utilizados em controles tradicionais para terminais.

Assim, os sinais das seccionadoras, disjuntores e sinais analógicos são levados aos PLC's ou relés digitais de proteção, sendo que esses possuem contadores internos de saída para os comandos finais, após a lógica desejada.

Por exemplo, muitos intertravamentos simples e bloqueios podem ser implementados através de lógicas internas de relés, não necessitando de cabos de cobre interligando os equipamentos supervisionados. Bastam informações desses equipamentos ao relé.

O impacto desses recursos é significativo na filosofia de projeto de comando e controle. Há economia sensível em cabos e relés e contadores auxiliares necessários, dependendo da aplicação.

8.1.3 Disponibilidade de Novas Funções de Proteção

No passado, algumas funções de proteção eram consideradas especiais, pela dificuldade de implementação, pois exigiam relés mais caros ou conexões mais complexas.

Hoje, essas funções podem ser executadas por simples operações matemáticas num relé digital (na realidade, um computador). E operações matemáticas em computador, através de fórmulas ou algoritmos são executadas rotineiramente em velocidade, mesmo as mais complexas.

Como exemplos dessas novas funções, podem ser citadas:

- **Seqüência Negativa**

Pelo fato de serem de difícil implementação, eram utilizados (relés de desbalanço de corrente) para máquinas rotativas. Hoje, estão disponíveis em quase todos os relés que tem como entrada as três correntes de fase de um circuito, através de apenas um cálculo (teoria de componentes simétricos).

- **Tensão residual (3.V0)**

Antes, havia necessidade de secundário de TP adicional ou TP's auxiliares, conectados em Delta Aberto, para medição da tensão residual para proteção de terra em sistema isolado ou aterrado com impedância. Hoje, apenas um cálculo (soma das três tensões de fase) já fornece o valor desejado.

- **Sobrecarga Térmica**

No passado, relés térmicos tentavam representar, através de circuitos secundários de dissipação de calor (placas dissipadoras) a constante de tempo de aquecimento do equipamento supervisionado. Assim um relé 49 era aplicado principalmente a máquinas rotativas. Mesmo assim, dificilmente se conseguia uma característica de proteção adequada à característica do equipamento protegido.

Hoje, através de réplicas térmicas digitais, pode-se modelar a característica de aquecimento (em função da corrente e da temperatura ambiente) com precisão. Mas ainda hoje permanece a dificuldade de se conseguir a característica térmica do equipamento protegido. Dependendo do equipamento, o próprio fabricante tem dificuldade de informar (por exemplo, grandes transformadores).

- **Outras, como fechamento sobre falta, zona morta entre TC e disjuntor, especial para esquema disjuntor e meio, etc.**

8.1.4 Constatações

a) Hoje, há maior necessidade de conhecimento da filosofia de proteção para uso adequado de todas as disponibilidades de um relé digital.

- Usar ou não usar uma função é uma dúvida bastante comum. Os reles em geral apresentam mais recursos que o simplesmente necessário, pois os fabricantes, em decorrência de aspectos econômicos e de mercado, oferecem relés praticamente “universais” (para várias aplicações). Prós e contras e aspectos técnicos diversos devem ser considerados.
- Há também o problema da redundância. Diversas opções de hardware e de software (funções de proteção) estão disponíveis. Muitas vezes, se tem todas as funções em um único equipamento (relé). O problema da redundância deve ser considerado, para se avaliar a confiabilidade.

Assim, sempre se deve avaliar se deve ser aplicado um relé com todas as funções ou mais relés com funções distribuídas.

b) Muitos projetistas estão ainda despreparados.

- Há funcionalidades que a projetista simplesmente não utilizam, enquanto que sua utilização poderia trazer benefícios – assim alguma cablagem que deveria existir não existe. Um quando utilizam, o fazem parcialmente

Exemplos: uso da função térmica 49, uso da falha de disjuntor, uso da supervisão de serviço auxiliar DC, uso do monitoramento do disjuntor.

- As vezes as conexões AC não são as mais adequadas para melhor aproveitamento das funções digitais.

Exemplo proteção diferencial de TR. Uma conexão delta no TC principal é utilizada, como num projeto convencional, enquanto que uma conexão estrela-aterrada poderia proporcionar mais sensibilidade, com a proteção digital fazendo o bloqueio da sequência zero.

c) Muitos prestadores de serviços estão ainda despreparados.

- Principalmente para serviços de comissionamento da parte de proteção, supervisão e controle, há necessidade uma atenção maior quanto aos prestadores de serviços.

A falta de conhecimento de uma proteção digital pode levar a comissionamento superficial, sem verificação de itens essenciais.

A falta de equipamentos adequados (notebooks, softwares, caixas digitais de ensaios) também podem levar ao comissionamento incompleto ou até a danos em equipamentos mais sensíveis.

- Como melhorar a capacitação desse pessoal? Eis uma boa questão. .

d) Quanto à Contratante.

- Necessidade de estabelecimento de requisitos e especificações adequados à tecnologia moderna, para os projetos contratados de supervisão, controle e proteção.
- Idem para serviços de comissionamento respectivos.
- Necessidade de fiscalização técnica adequada aos projetos e serviços.
- Há necessidade de melhor conhecer os impactos da moderna tecnologia nos projetos para a devida contratação

8.2 OPERAÇÃO

Quanto à Operação, há significativas mudanças nas instalações e nos recursos de modo que os procedimentos devem se adequar às essas mudanças, para melhor aproveitamento.

8.2.1 Integração com a Supervisão

As proteções digitais, juntamente com outros equipamentos e dispositivos digitais do sistema de supervisão e controle de uma instalação elétrica fazem parte de uma família denominada genericamente de IED – “Intelligent Electronic Devices”.

Esses equipamentos possuem facilidades embutidas de operação em rede, com equipamentos e sistemas trocando informações e provendo um sistema de supervisão global onde as informações da proteção fazem parte de um todo e não mais são consideradas isoladas.

Isto é, o conceito do relé de proteção isolado dentro de uma instalação, ou considerado isoladamente, não existe mais. Geralmente **as proteções são parte de um todo**, sendo colocadas em rede local juntamente com unidades de aquisição de dados (controle e supervisão) e outros IED's. O sistema é conectado a uma unidade de supervisão geral da instalação em rede, cujas arquiteturas e meios de comunicação podem ser as mais diversas possíveis.

O grande problema é ainda a integração de IED's de fabricantes distintos. Os protocolos que no passado eram, na maior parte, proprietários, apresentam tendência de abertura cada vez maior, permitindo através de codificações comuns e compatíveis, a integração de equipamentos das mais diferentes origens.

Também o conceito de rede ampla, que no passado era utilizado apenas para os Centros de Operação do Sistema (transmissão e geração de energia elétrica) para fins de operação, são agora compreendidos como algo mais amplo e diversificado, incluindo proteção e mas mais diversas informações englobando instalações múltiplas em uma região.

8.2.2 Acesso Remoto

A supervisão e controle remotamente efetuados é, portanto, bastante comum. As mesmas facilidades e recursos de uma supervisão local já são disponíveis remotamente.

Isso trouxe um impacto muito grande para a Operação. Por exemplo, já em fins dos anos 80 e começo dos anos 90 o desassistimento de instalações em função da operação remota (apesar de menos recursos na época) já era realidade – hoje, as informações de proteção e oscilografia também são adquiridos a distância.

O acesso remoto a dados de proteção (parâmetros, dados de eventos, oscilogramas de ocorrências, diagnóstico) são as conquistas que trazem um retorno econômico significativo, com agilização dos procedimentos operacionais e redução de despesas de locomoção.

8.2.3 Constatação

Constata-se que a adaptação cultural à nova tecnologia digital, com os seus recursos, é lenta.

Tem-se observado que:

- A alteração nos métodos e processos, para melhor aproveitamento dos novos recursos, é feita lentamente em algumas empresas. A agilização não tem sido obtida na velocidade desejada.
- O fato de não se enxergar “bits” e “bytes” é uma dificuldade. O SOFTWARE DEVE SER TRATADO COMO UM EQUIPAMENTO (Custa caro. Exige manutenção / atualização. Há parametrização e comissionamento. Pode apresentar falhas e defeitos).
- Muitas vezes a operação, as vezes, não exige de “projetos e instalações”. E “projetos e instalações” é lenta na oferta de novos recursos – ou a oferta é feita sem critério.

Uma **recomendação** adequada seria:

“Procurar utilizar todos os recursos disponíveis de telecomunicações para aquisição de dados e informações e para diagnóstico e parametrização.

Exigir esses recursos onde não disponíveis para recursos digitais locais, já existentes”.

9. CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO DA PROTEÇÃO DIGITAL

9.1 SISTEMAS DE AUTO VERIFICAÇÃO, MONITORAMENTO CONTÍNUO E AUTO-TESTE

Uma das **mais importantes vantagens** da proteção numérica de tecnologia digital microprocessada é a possibilidade ampla de implementar sistemas de verificações e diagnósticos automáticos.

- O relé digital pode reconhecer instantaneamente os dados de entrada em quantidades mínimas, permitindo executar monitoramento contínuo e verificações com muito mais precisão que os relés de tecnologia eletrônica convencional.
- Desde que o monitoramento é feito principalmente por softwares, é possível executar, de imediato, funções complexas de verificação e testes que não seriam possíveis com relés convencionais.

O resultado imediato é a melhoria sensível na confiabilidade operacional da proteção, como será mostrado posteriormente, e a redução dos custos de manutenção da proteção.

Os seguintes processos são considerados:

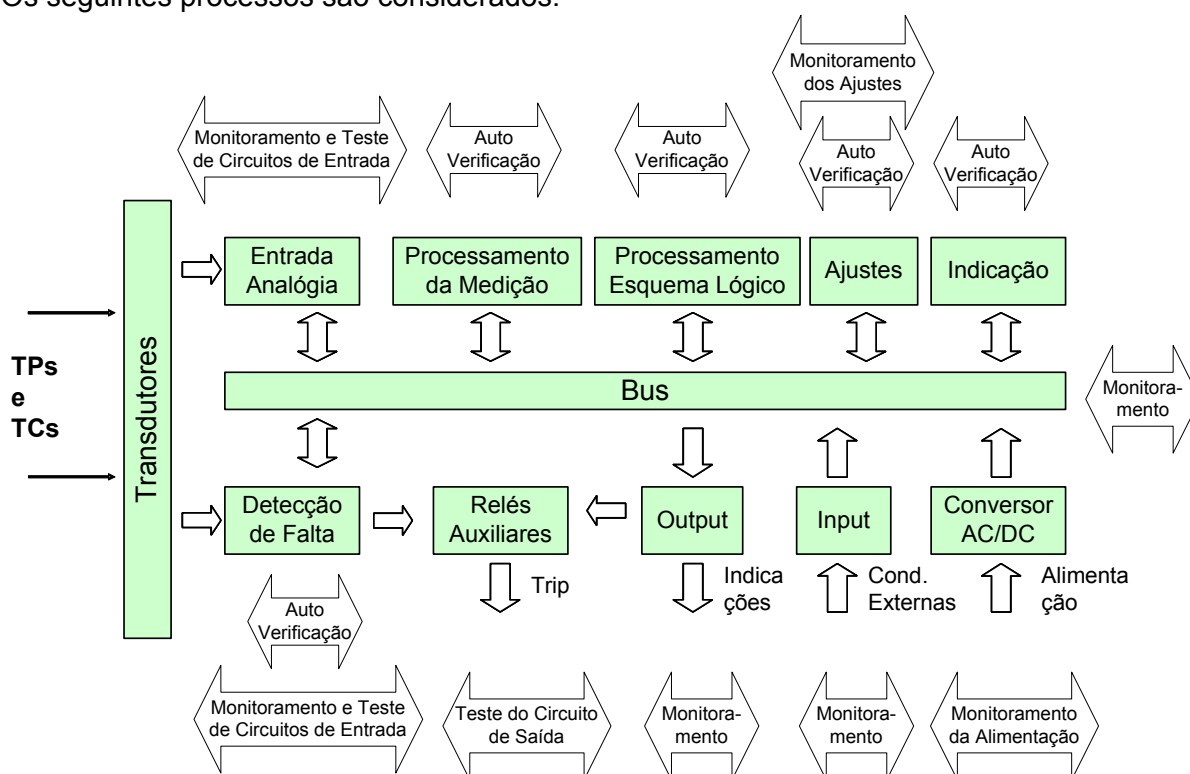


Figura 9.1 – Sistema Automático de Monitoramento e Verificação

Monitoramento Contínuo

É feito monitoramento para:

- Sinais de entrada, fazendo uso de critérios de redundância e erros esperados na medição, por exemplo, cálculos de sequência zero de tensão e corrente.
- Circuitos de TC's e TP's quanto a curto-circuito ou circuito aberto, fazendo uso de expressão que indica valores máximos e mínimos esperados no conjunto relacionado das três fases e neutro.
- Circuitos de entrada, envolvendo transdutores e acopladores, fazendo de critérios de discrepâncias.
- Circuitos de saída, fazendo uso da comparação da saída com os níveis de processamento e lógicas em execução.
- Conversor DC-DC quanto a falhas, através da comparação dos níveis de saída de cada subsistema.
- "Set" de Ajustes (armazenados em EPROM's), comparando diferenças entre dois conjuntos (há sempre dois conjuntos iguais para cada "set" de ajustes).
- Ajustes, através da verificação em função da faixa de ajustes permitida.
- Itens do sistema de processamento, como paridades, temporizações inerentes de ROM, RAM, Watch Dog, etc. (auto diagnose).

Adicionalmente pode-se fazer uso do chamado "stole alarm", isto é, um sinal "OK" é encaminhado a um hardware externo, pelo software de monitoramento, de tempo em tempo, para indicação de que o programa está sendo processado normalmente. A amplitude desse monitoramento é determinada pela quantidade e variedade dos "check points".

Auto Verificação

Exemplos de auto verificação:

- Verificação da memória RAM – através de escrita e leitura de dados pré-determinados.
- Verificação de programas – através de dados de "entrada" para processamento, conhecendo-se as "saídas" esperadas.
- Verificação da Característica da conversão A/D – pela aplicação de teste DC de alta precisão a partir do circuito S/H (Sample & Hold) e fazendo verificação de dado de entrada pela CPU.

Auto-Teste

Podem ser feitos testes para:

- Verificação das Entradas Analógicas – através da aplicação de corrente de teste e verificando o resultado pela CPU. Durante esse teste, o circuito de trip da proteção é desativada (cerca de 100 ms).

- Verificação de circuitos de saída (trip ou circuitos de grande importância) – através da demanda de sinal interno de trip, para verificar se o circuito de saída está operando corretamente. Também neste caso, o circuito externo de trip da proteção teria que ser isolado (automaticamente, com projeto prevendo este esquema).

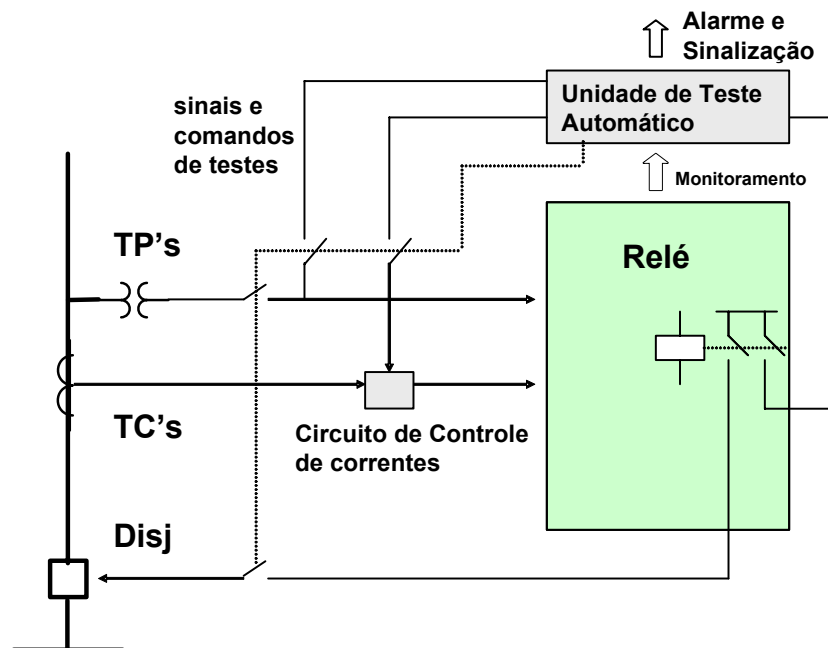


Figura 9.2 – Exemplo de Sistema Automático de Testes

Timing para Monitoramento, Auto Verificação e Auto Teste

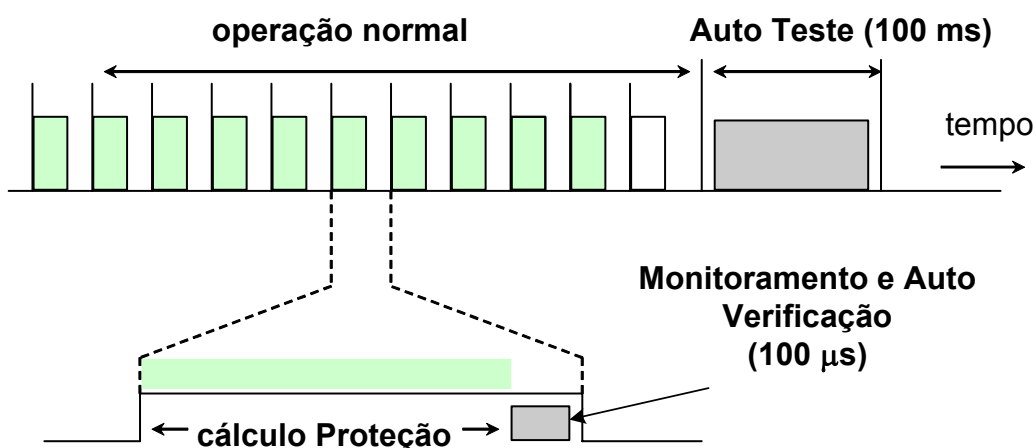


Figura 9.3 – Tempos Envolvidos no Processo

Classificação dos Métodos de Detecção de Falhas

Tipo de Detecção	Intervalo de Testes	Período sem Proteção	Modos de Operação Detectáveis	Modos de Falha Detectáveis	Maiores Vantagens	Maiores Desvantagens
Manual Periódico	1 a 4 anos	Algumas horas	<ul style="list-style-type: none"> • Recusa de Operação • Operação Acidental • Operação Incorreta 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas de Degradação • Falhas Catastróficas 	<ul style="list-style-type: none"> • Testes mais completos. • Detecção de falhas menores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proteção indisponível por horas. • Longo tempo para detectar falhas ocultas • Possibilidade de erro humano. • Alto custo operacional.
Auto Teste	De algumas horas a alguns dias (ajustável)	100 ms	<ul style="list-style-type: none"> • Recusa de Operação • Operação Incorreta 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas de Degradação • Falhas Catastróficas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo relativamente curto para detectar falhas ocultas 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de projeto específico e instalação extra. • Custo inicial maior. • Aumento da taxa de falhas pelo acréscimo de itens adicionais.
Monitoramento contínuo	Zero	Zero	<ul style="list-style-type: none"> • Operação acidental 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas Catastróficas 	<ul style="list-style-type: none"> • Adequado para esquemas redundantes. • Detecção imediata de defeitos • Trip instantâneo incorreto pode ser prevenido • Adicional de hardware é pequeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funções operacionais não podem ser verificadas.
Auto Verificação	Alguns ms	Zero	<ul style="list-style-type: none"> • Recusa de Operação • Operação Incorreta 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas Catastróficas • Erros de software • Falhas de Degradação 	<ul style="list-style-type: none"> • Detecção imediata de defeitos • Quase sem hardware adicional. • Defeitos intermitentes também detectados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de programas adicionais.

9.2 CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE RELÉS DIGITAIS

O presente item tem a finalidade de mostrar como os sistemas de monitoramento contínuo, auto verificação e auto-teste implementam a confiabilidade operacional de uma proteção digital.

A confiabilidade operacional de uma proteção é dada por dois parâmetros:

- **Dependabilidade**

A proteção deve atuar corretamente quando solicitado. Uma proteção pode:

- Atuar incorretamente, quando solicitada a operar e não desempenha sua função adequadamente.
- Não atuar (recusa), quando solicitada a operar.

- **Segurança**

A proteção não deve atuar, quando não solicitado. Uma proteção pode:

- Atuar acidentalmente, quando não é solicitada a atuar mas opera desligando o terminal.

Transição de Estado de Um Relé de Proteção

Vamos considerar os seguintes Estados, nos quais pode se encontrar um relé de proteção:

(A) – Estado São.

Quando o relé se encontra em uma situação que garanta tanto a Dependabilidade como a Segurança.

(B) – Em Falha.

Quando o relé se encontra em uma situação tal que pode operar incorretamente quando solicitado ou pode acidentalmente sem solicitação.

(C) – Em Reparo

Quando o relé se encontra fora de operação para reparo.

Esses três estados estão mostrados na figura seguinte.

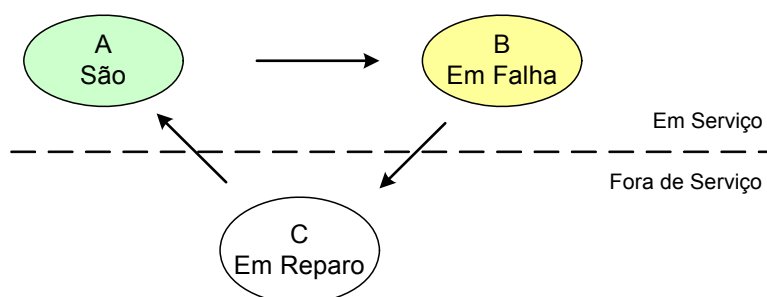


Figura 9.4 – Estados Possíveis de Um Relé de Proteção

Deve-se observar que o relé pode permanecer em operação no estado B, sob falha não detectada. Se o relé se encontrar neste estado, ele poderá operar incorretamente ou não operar quando solicitado. Nessas condições, sofrerá intervenção e entrará no Estado C. O retorno para a Operação será no Estado A.

Taxas de Transição de Estado

Terminologia e definições:

MTBF - Tempo Médio Entre Falhas. É o tempo médio em que um relé permanece no estado A. No instante que ele tiver uma falha interna, passará para o estado B.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \text{ - Taxa de Falha por Unidade de Tempo}$$

T_C - Intervalo de Tempo entre Intervenções no Relé.

$\frac{T_C}{2}$ - Tempo em que o Relé permaneceu em Falha, antes da Solicitação / Detecção.

$$\nu = \frac{1}{T_C/2} \text{ - Taxa de Detecção de Falha por Unidade de Tempo.}$$

MTTR – Tempo Médio para Reparo do Relé.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \text{ - Taxa de Reparo de Falha por Unidade de Tempo.}$$

Nessas condições, as transições de Estado podem ser definidas matematicamente através das taxas:

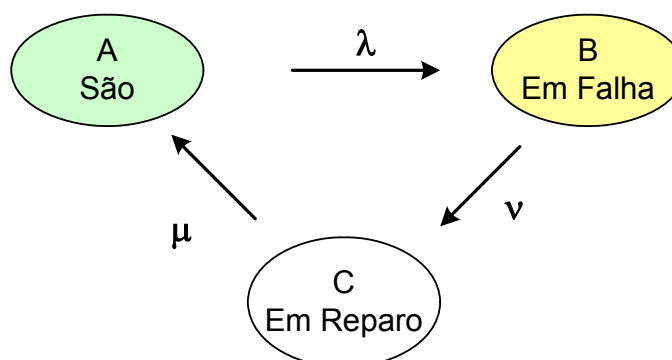


Figura 9.5 – Transição de Estados

Requisitos para a Proteção

- a) Manter o Estado A o maior tempo possível
- Através do uso de componentes confiáveis (diminuindo λ).
 - Detectando e reparando as falhas o mais rápido possível (aumentando ν , μ)
- b) Reduzir a probabilidade de atuação incorreta, recusa ou atuação acidental ao mínimo, durante o estado de Falha B.
- Por exemplo, duplicando a proteção.
 - Utilizando funções menos afetadas por falhas.
 - Diminuindo o tempo na qual a proteção permanece em Falha, sem detecção.

Os sistemas de monitoramento contínuo, auto verificação e auto teste contribuem para aumentar ν e μ . À medida que se diminui o Tempo ($T_C/2$) na qual a proteção permanece em estado de falha sem detecção, há aumento de ν (item a acima) e também se reduz a probabilidade de atuação não correta da proteção (item b acima).

A figura a seguir mostra matematicamente as contribuições de diversos aspectos na melhoria da confiabilidade da proteção:

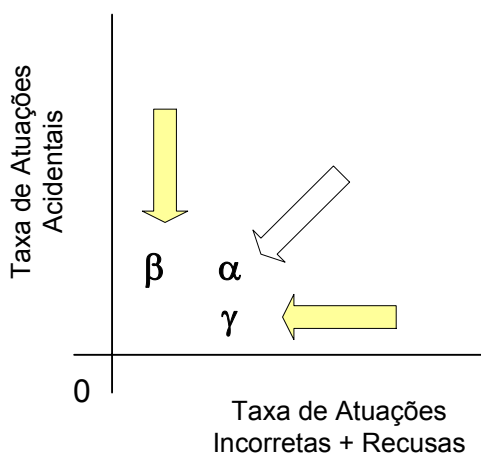


Figura 9.6 – Medidas para Melhorar a Confiabilidade

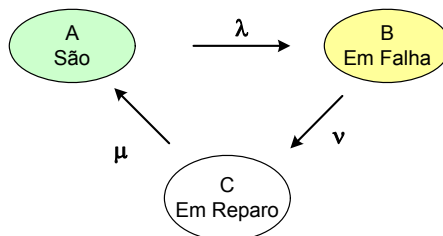
α = Utilizando componentes confiáveis na fabricação da proteção, projeto adequado, etc.

β = Redundância série (elementos de partida ou de detecção da falta, antes da medição da proteção propriamente dita). Monitoramento contínuo.

γ = Redundância paralela (duplicação da proteção), esquema de auto teste, auto verificação.

Probabilidade da Operação Não Correta

Pode-se mostrar que esquemas de monitoramento contínuo, auto check e auto teste diminuem sensivelmente a probabilidade de operação não correta da proteção, diminuindo o tempo em que a proteção sob falha permanece em operação.



Referindo-se à figura de transição de falhas, pode-se efetuar uma análise relacionando as taxas com os estados, conforme terminologia já mencionada.

Considera-se que os estados A, B e C sejam “estáveis”, quando:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} = \frac{dC}{dt} = 0$$

$$\text{Mas:} \quad \frac{dA}{dt} = -\lambda A + \mu C \quad \frac{dB}{dt} = -\nu B + \lambda A \quad \frac{dC}{dt} = -\mu C + \nu B$$

Nessas condições:

$$B = \frac{\frac{1}{\nu}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\nu} + \frac{1}{\mu}} = \frac{T_c/2}{MTBF + T_c/2 + MTTR}$$

Conforme mostrado na figura a seguir, a probabilidade de operação não correta está associada a B.

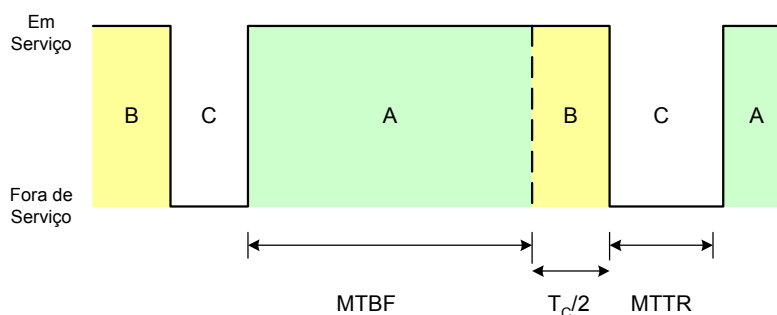


Figura 9.7 – B Associado à Probabilidade de Operação Não Correta

Exemplo:

MTBF = 20 anos

MTTR = 1 dia

Intervalo entre Intervenções $T_c = 2$ anos

$$B = \frac{T_c/2}{MTBF + T_c/2 + MTTR} \approx \frac{1}{20} = 0,05$$

Isto é, a probabilidade de 5% significa que uma atuação em 20 solicitações seria Não Correta. Ou que num universo de 20 relés, teríamos 1 relé em estado de falha por unidade de tempo.

Efeito de um Auto Teste realizado a cada 7 dias, complementado por monitoramento contínuo e auto check.

Neste caso, $T_c/2 = 3,5$ dias ao invés de 1 ano.

$$B = \frac{3,5}{4,5 + 20 * 365 + 5} \approx 0,00043$$

Isto é, há uma melhora considerável na probabilidade de Operação Não Correta.

NOTA

Evidentemente, para que se tenha essa altíssima confiabilidade operacional, deve haver esquema de Auto Teste que verifica automaticamente as funções operacionais da proteção em complementação ao monitoramento contínuo e auto check.

Entretanto, desde que haja instalação confiável (cablagem, circuitos externos, etc.), mesmo sem o auto teste, haverá uma grande confiabilidade operacional.

Intervalo de Teste Ótimo para Esquema de Auto Teste

Para determinar esse intervalo de tempo ótimo, refere-se ao modelo mostrado na figura a seguir, onde o Estado em que se está realizando o Teste Periódico (automático) estará relacionado com o Estado A:

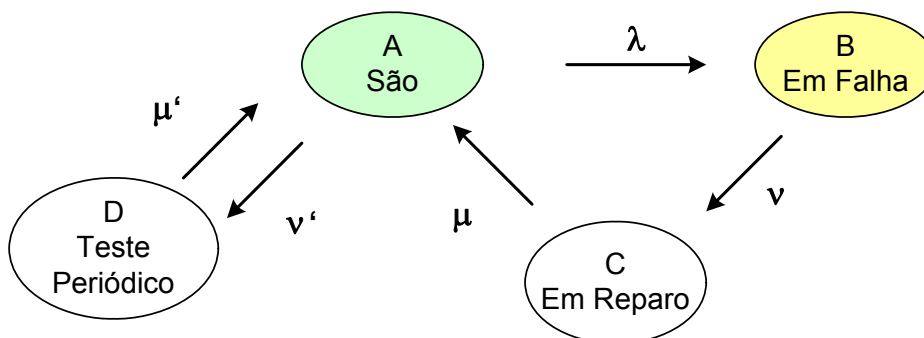


Figura 9.8 – Modelo de Taxas Incluindo Auto Teste Periódico

Uma proteção no Estado A, tem esquema automático de teste a cada T_c e a duração do ensaio é t . Nessas condições, segundo a **referência [2]**:

$$A = \frac{\frac{T_c}{2}}{MTBF + \frac{T_c}{2} + MTTR} \times \frac{T_c}{T_c + t}$$

Segundo a mesma referência, o intervalo de tempo ótimo para autoteste é dado quando:

$$\frac{dA}{dT_c} = 0 \rightarrow \text{IntervaloOtimo}_{T_c} = \sqrt{2(MTBF + MTTR).t}$$

Exemplo:

MTBF = 20 anos

MTTR = 1 dia

t = 1 minuto

Intervalo Ótimo calculado segundo fórmula acima = 76 horas (mais ou menos 3 dias).

9.3 MANUTENÇÃO DE RELÉS DIGITAIS

Para avaliar o efeito dos sistemas de monitoramento contínuo, auto check e auto teste na manutenção da proteção, vamos imaginar uma situação onde as falhas na proteção que poderiam causar ou causaram operação não correta foram detectadas da seguinte maneira:

Modo de Detecção	Intervalo de Intervenção	% dos casos detectados
Manutenção Periódica	2 anos	10%
Auto Teste Periódico	7 dias	10%
Auto Check e Monitoramento Contínuo	0	80%

Vamos calcular a probabilidade de operação não correta, observada nessas condições.

$$B = \frac{\frac{1}{v}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{v} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\frac{T_c}{2}}{MTBF + \frac{T_c}{2} + MTTR}$$

$$B \approx \frac{\frac{T_c}{2}}{MTBF} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{MTBF} \cdot T_c = \frac{1}{2} \lambda \cdot T_c$$

O intervalo entre intervenções pode ser ponderado e calculado da seguinte maneira:

$$T_c = k \cdot T_K + \ell \cdot T_\ell + m \cdot T_m$$

onde:

T_K = Intervalo de intervenção para monitoramento contínuo e auto check.

T_ℓ = Intervalo de intervenção para auto teste.

T_m = Intervalo de intervenção manual.

k = Taxa de detecção para monitoramento e auto check.

ℓ = Taxa de detecção para auto teste

m = Taxa de detecção para intervenção da manutenção periódica.

Assim:

$$B \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{MTBF} \cdot (k.T_K + \ell.T_\ell + m.T_m)$$

Substituindo os valores para uma mesma base (ano ou dias), teremos:

$B \approx 0,005$, isto é, cerca de 0,5% o que é um excelente valor.

Conclusões

- Com relés digitais dotados de sistemas de auto check e monitoramento contínuo, o intervalo para intervenções manuais preventivas pode ser aumentado com relação àqueles períodos que eram adotados para relés de tecnologia eletromecânica ou estática.
- Eventualmente, dependendo dos recursos e da filosofia do usuário, a manutenção preventiva periódica para a proteção em si poderá até ser eliminada. Entretanto, isso irá requerer o uso de relés digitais com recursos completos e modernos de monitoramento contínuo e auto verificação.
- O auto teste (intervenção automática periódica em intervalos de tempo da ordem de dias) que é feito sobre os circuitos operacionais (entradas analógicas e saídas de trip) pode não existir, uma vez que:
 - Os sistemas de monitoramento contínuo e auto check estão cada vez mais avançados, aumentando a taxa de detecção de falhas.
 - Podem ser previstas intervenções manuais periódicas simplificadas, apenas para circuitos funcionais (entradas e saídas).

9.4 EXEMPLO DE PERIODICIDADE DE INTERVENÇÃO NA PROTEÇÃO

A seguir é apresentado um exemplo de periodicidades e procedimentos adotados por um “pool” de concessionárias dos EUA (PJM INTECONNECTION, L.L.C.) para a proteção em geral, para fins de ilustração (caso típico).

PERIODICIDADE DE INTERVENÇÕES

Sistemas de Proteção (Nota 5)	Tecnologia	Testes de Aferição Frequência (Nota 4)	Testes Funcionais Frequência (Nota 4)
Transmissão	Eletromecânica e Estática	4 anos	4 anos
	Digital	(Nota 1)	4 anos
Geração	Eletromecânica e Estática	4 anos	4 anos
	Digital	(Nota 1)	4 anos

Especiais	Eletromecânica e Estática	4 anos	4 anos
	Digital	(Nota 1)	4 anos
Frequência e Tensão (Rejeição de Carga)	Eletromecânica e Estática	4 anos	4 anos
	Digital	(Nota 1)	4 anos
Registrador de Perturbações	Eletromecânica e Estática	4 anos	
	Digital	(Nota 2)	
Canais de Teleproteção (Nota 3)	Carrier	4 anos	
	Linha Dedicada (alugada)	4 anos	
	Microondas	4 anos	
	Fibra óptica	4 anos	

Nota 1: Relés Digitais

Testes de Aferição periódica não se aplicam. Esses relés possuem monitoramento contínuo. A análise regular dos eventos e oscilogramas de perturbações permitem acompanhar o desempenho do mesmo. A medição analógica, entradas digitais e saídas digitais são verificadas quando dos ensaios funcionais.

Nota 2: Registradores Digitais (“stand alone”)

Testes de Aferição periódica não se aplicam. Esses equipamentos possuem monitoramento. A análise regular dos eventos e oscilogramas de perturbações permitem acompanhar o desempenho do mesmo.

Nota 3: Canais de Teleproteção

Os canais de teleproteção devem ser testados com a mesma frequência dos relés de proteção dos quais fazem parte. É recomendada também uma verificação anual (“on-line”) dos sinais de telecomunicação envolvidos.

Nota 4: Frequência de Intervenção

Intervalo de tempo desde a última intervenção. Esforço deve ser feito para que o planejamento seja executado dentro de uma margem de atraso máximo de 10%.

Nota 5

Toda atuação da proteção deve ser analisada. Intervenção corretiva é sempre necessária quando de atuação não correta.

PROCEDIMENTOS

A documentação técnica do fabricante da proteção e manuais de ensaios desenvolvidos pelo proprietário da instalação devem ser utilizados nos ensaios da proteção.

Eventualmente são necessários procedimentos ou cuidados especiais para situações quando há informações adicionais (experiências de terceiros ou advertências dos fabricantes). É importante que os procedimentos especiais estejam especificados e detalhados nos manuais de intervenção.

PEÇAS E COMPONENTES DE REPOSIÇÃO

Peças e componentes completos de reposição devem estar disponíveis ou estocados, conforme política da empresa. A experiência de utilização dessas peças e componentes fornece parâmetros para o seu dimensionamento.

GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO

É obrigatória a documentação de todas as intervenções efetuadas nos sistemas de proteção, independentemente da amplitude de tal intervenção. Toda contingência que eventualmente impeça o cumprimento de um planejamento preventivo ou uma programação específica deve também ser documentada.

São Paulo, abril de 2008.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Tutorial Course – “Computer Relaying”, 79 EH0148-7-PWR, 1979
- [2] Toshiba Corporation, Seminar for Digital Protection Relay System, 1995 – “Digital Relays” – Slides.
- [3] Toshiba Corporation, “Instructions for Digital Relay” – 6F2L0152, 1997
- [4] Toshiba Corporation, “Noise and Surge” – KP-946-006, 1995
- [5] Toshiba Corporation, “Waveform Distortion” , 1995
- [6] Toshiba Corporation, “Automatic Testing and Continuous Monitoring”, 1995
- [7] Ziegler, G. – “Numerical Distance Protection – Principles and Applications” – Siemens AG, Berlin and Munich, 1999
- [8] Zocholl, S. E., Benmouyal G.,- “Como os Relés Microprocessados Respondem a Harmônicos, Saturação e a Outras Distorções de Onda” - Schweitzer Engineering Laboratories, USA.
- [9] Phadke, A. G., Thorp, J. S. – “Computer Relaying for Power Systems”, Research Studies Press, Ltd. England – 1994
- [10] Elmore, W. A. – “Microprocessor Relaying Fundamentals”- Chapter 6 of “Protective Relaying Theory and Applications”, ABB – Marcel Dekker, Inc., 1994
- [11] Das, J. C. – “Power System Analysis – Short-Circuit, Load Flow and Harmonics”- Marcel Dekker, Inc., 2002
- [12] Kennedy, J. M.; Alexander, G. E. (General Electric Company, Malvern, PA); Thorp, J. S. (Cornell University, Ithaca, NY) - “Variable Digital Filter Response Time in a Digital Distance Relay”- Twentieth Annual Western Protective Relaying Conference, October 1993.
- [13] Schweitzer III, E. O.; Hou, D. – Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. - “Filtering for Protective Relaying”- 47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, April 1993.
- [14] Rosolowski, E.; Izykowski, J (Wroclaw University of Technology, Poland), Kasztenny, B (GE Power Management, Canada) — “A New Half-Cycle Adaptive Phasor Estimator Immune to the Decaying DC Component for Digital Protective Relaying.” – Paper IEEE
- [15] Mode, E. B. – “Elements of Probability and Statistics”, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 1966.
- [16] Yong Guo, Mladen Kezunovic, Seshu Chen – “Simplified Algorithms for Removal of the Effect of Exponentially Decaying DC-Offset on the Fourier Algorithm”.