



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA “FIELD BUS”
NOS SISTEMAS DE CONTROLE E SEGURANÇA DE
UMA PLANTA DE RADIOESTERILIZAÇÃO**

DIB KARAM JUNIOR

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:
Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa

**São Paulo
2000**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA "FIELD BUS" NOS
SISTEMAS DE CONTROLE E SEGURANÇA DE UMA PLANTA DE
RADIOESTERILIZAÇÃO

DIB KARAM JUNIOR



Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do
grau de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:

Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa

SÃO PAULO

2000

Dedico este trabalho aos meus filhos Dib e Diego, que me propiciaram forças, às vezes tão raras e nos momentos mais difíceis, em busca da conclusão desta etapa, e para que sirva, no futuro, como exemplo em suas vidas. À Giulia. Esta vitória é de vocês.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa, por mais que eu agradeça seria ainda incapaz de expressar meu sentimento de gratidão. O incentivo, segurança, compreensão e paciência que me transmitiu ao longo deste trabalho foram fundamentais.

Agradeço a Deus pela vida. Ao meu País pela oportunidade.

Ao amigo Paulo Relá pelo empurrão, incentivo e confiança em mim depositado. Obrigado é pouco por tudo o que fez.

Aos meus pais S. Dibo e D. Cida, foi sempre assim que os chamei não seria diferente agora, e aos meus irmãos, meu muito obrigado.

Existem pessoas muito importante em nossas vidas, e não só por isto merecem meus agradecimentos. Professores Aziz, Agarb, Barco, Gílio, Motta e Edmilson devo muito a vocês. Irma, Janete, Maria, Zilda, Cristina e Soninha vocês são parte desse crédito.

À Escola de Engenharia de Lins pelo apoio recebido e, em nome de quem, agradeço a todos aqueles que, torcendo para mim, colaboraram na conclusão desta etapa. Em particular Bianor, Hamilton e Fernando, obrigado.

Agradeço aos colegas e amigos do Centro de Tecnologia das Radiações, CTR. Ao IPEN e aos amigos que nele se encontram.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo e aos colegas nele inseridos, meus agradecimentos.

Obrigado à Universidade Paulista, UNIP, e todas as pessoas que, através dela mantive e mantenho contato. Em especial aos professores Geraldo, Pacheco e Celso.

Agradeço a SMAR, em nome dos amigos Carnevalli, Laércio e Geron, pelo atendimento às minhas consultas, reclamações e solicitações, sem as quais não terminaria este trabalho.

Agradecimentos a todos aqueles que colaboraram ou não, direta ou indiretamente, amigos ou não, parentes ou não, na transposição dessa barreira que parecia intransponível. Citar nomes seria extremamente difícil, pois com certeza esqueceria alguns, e longo, pois mesmo esquecendo alguns, haveria uma relação interminável.

Não pela sua ordem chegada e nem menos importante, muito pelo contrário, mas por último para que tenha o destaque necessário, muito obrigado Grasiela.

Vó Paulina, a sua benção.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Apresentação do trabalho.....	2
1.3 Objetivo.....	4
2 ESTERILIZAÇÃO, DESINFECÇÃO E SEUS PROCESSOS	7
2.1 Esterilização e desinfecção.....	7
2.2 Métodos de esterilização e desinfecção.....	9
2.2.1 Características gerais.....	9
2.2.2 Vapor ou calor úmido.....	11
2.2.3 Gases químicos.....	13
2.2.4 Líquidos químicos.....	15
2.2.5 Filtração.....	16
2.2.6 Aquecimento ou calor seco.....	17
2.2.7 Radiação.....	17

3	RADIOESTERILIZAÇÃO	19
3.1	Histórico.....	19
3.2	Tipos de radiação ionizante.....	21
3.2.1	Interações da radiação com a matéria.....	23
3.3	Processos de radioesterilização.....	30
3.3.1	Fontes gama.....	31
3.3.2	Aceleradores de elétrons.....	33
3.4	Aplicações da radioesterilização.....	34
4	IRRADIADORES DE COBALTO-60	38
4.1	Descrição e sistemas.....	38
4.2	Condições de controle de processo.....	41
4.3	Tipos de irradiadores gama.....	43
4.4	Segurança da instalação.....	48
4.4.1	Introdução.....	48
4.4.2	Defesa em profundidade.....	53
4.4.2.1	Redundância.....	54
4.4.2.2	Diversidade.....	54
4.4.2.3	Independência.....	55
4.4.3	Sistemas eletrônicos programáveis	56

5	TECNOLOGIA "FIELDBUS"	57
5.1	Sistemas de automação industrial.....	57
5.2	"Fieldbus".....	60
6	APLICAÇÃO DO "FIELDBUS" EM UM IRRADIADOR DE ⁶⁰Co	71
6.1	Introdução.....	71
6.1.1	Definição dos elementos "Fieldbus".....	71
6.1.1.1	BT: terminadores ("bus terminators").....	72
6.1.1.2	FD: dispositivos de campo ("field devices").....	73
6.1.1.3	PS: fonte de alimentação ("power supply").....	74
6.1.1.4	PSI: impedância para fonte de alimentação ("power supply impedance").....	76
6.1.1.5	PCI : interface para controle de processo ("process control interface").....	77
6.2	Topologias de implementação da rede "Fieldbus".....	78

6.3	Sistemas de aplicação da rede "Fieldbus".....	81
6.3.1.	Sistema em anel.....	81
6.3.2.	Sistema em U.....	83
6.4	Definição da configuração.....	85
6.5	Análise de falhas.....	93
7	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	103
8	CONCLUSÕES	108
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA "FIELDBUS" NOS SISTEMAS DE CONTROLE E SEGURANÇA DE UMA PLANTA DE RADIOESTERILIZAÇÃO

Dib Karam Junior

RESUMO

Vários processos de esterilização têm sido utilizados ao longo desses anos para tratamento de inúmeros produtos. Entre esses processos citam-se o uso de temperaturas elevadas, choque térmico e agentes químicos. Com a descoberta da radiação ionizante e seus desenvolvimentos tecnológicos posteriores foi possível, a partir de 1960, a aplicação desse processo também na esterilização, denominado radioesterilização. Tal processo passou a ser aplicado também em outras áreas da saúde e da indústria como por exemplo conservação de alimentos, polimerização e indução de cores em gemas preciosas e semipreciosas. A radioesterilização requer um controle efetivo e necessita um alto nível de segurança da instalação. O uso comercial dos computadores nas aplicações em automação industrial é uma realidade e o domínio de novas tecnologias nesse campo abre o leque de suas aplicações permitindo novas associações antes inimagináveis. A tecnologia "Fieldbus", um novo protocolo de comunicação digital do tipo "Local Area Network", pode então tornar-se uma alternativa viável na instalação de irradiadores que se utilizam do cobalto-60 para esterilização. O presente trabalho sugere, avalia, qualifica e quantifica tal viabilidade.

**STUDY OF FIELDBUS TECHNOLOGY APPLIED IN A STERILIZATION PLANT
CONTROL AND SAFETY SYSTEMS**

Dib Karam Junior

ABSTRACT

Several sterilization processes have been used in these years for treatment of countless products. Some processes use high temperatures, thermal shocks and chemical agents. With the discovery of the ionizing radiation and its posterior technological developments turned possible the application of that process, in 1960, also in the sterilization, denominated radiation sterilization. This process became also applied in another areas of health and industrial as food conservation, gemstones enhancement and others. The radiation sterilization requests an effective control and it needs a high level of safety. The commercial use of the computers applied in industrial automation provides and the domain of new technologies in this field provides news applications then new designs now is possible. The Fieldbus technology, a new digital communication protocol, like a Local Area Network, can be an alternative in the cobalt-60 irradiation plant. The present work suggests, evaluates, qualifies and quantifies this possibility.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O uso da radiação ionizante possibilita um amplo espectro de aplicações industriais, tais como, esterilização de produtos médicos, farmacêuticos e cosméticos, processamento de alimentos, melhoria da propriedade de materiais, especialmente polímeros, coloração de vidros e gemas, etc.

A utilização mais difundida da radiação ionizante em processos industriais é na esterilização, tecnicamente denominada radioesterilização, onde raios gama ou feixe de elétrons de alta energia, interagem com o DNA dos microorganismos ocasionando principalmente a sua eliminação. No caso de utilização de raios gama existem mais de 180 plantas instaladas no mundo (em mais de quarenta países) operando com elevada eficiência e confiabilidade.

A radiação ionizante (gama), proveniente de radioisótopos de cobalto-60, com energias de 1,17MeV e

1,33MeV, assegura o tratamento de produtos das mais variadas formas e constituição. As embalagens finais e/ou matérias primas são expostas à radiação em um ambiente especialmente projetado onde, submetidas a um fluxo controlado, recebem a quantidade de radiação ionizante, ou dose, que foi preestabelecida. O processo, realizado a temperatura ambiente, provoca uma elevação insignificante da temperatura do produto em tratamento, não deixa resíduos, não libera agentes poluentes e também não torna os produtos radioativos.

No amplo espectro de aplicações existentes, a aplicação da radiação ionizante na esterilização de produtos médicos tem crescido exponencialmente, indicando a real aceitação universal do método. Experiências acumuladas em países desenvolvidos são transferidas para países em desenvolvimento, sendo que a garantia da qualidade dos produtos radioesterilizados, quando comparada com outros métodos convencionais, entre eles o óxido de etileno, é de várias ordens de grandeza superior.

1.2 Apresentação do trabalho

O presente trabalho propõe-se a apresentar uma nova tecnologia em instrumentação, o "Fieldbus", aplicado a uma planta de radioesterilização.

Para tanto faz-se necessário situar esse sistema no atual contexto, e com este intuito no Capítulo 2 - ESTERILIZAÇÃO, DESINFECÇÃO E SEUS PROCESSOS estarão descritos sucintamente as definições, diferenças e processos para que se possa localizar a radiosterilização, está contida no Capítulo 3 - RADIOESTERILIZAÇÃO.

No Capítulo 4 - IRRADIADORES DE ^{60}Co , apresentam-se os conceitos de uma planta de radioesterilização que utiliza fontes de raios gama, raios esses gerados pelo decaimento do isótopo instável ^{60}Co .

O Capítulo 5 - TECNOLOGIA "FIELD BUS" e o Capítulo 6 - APLICAÇÃO DO "FIELD BUS" EM UM IRRADIADOR DE ^{60}Co mostram o cenário da automação industrial, as definições do sistema "Fieldbus" e sua inserção nos irradiadores de ^{60}Co , assunto este incomum na literatura encontrada.

Um levantamento de custos, simplista, é apresentado no Capítulo 7 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA e por fim no Capítulo 8 - CONCLUSÕES faz-se uma avaliação da nova tecnologia trazida à aplicação nos irradiadores gama.

1.3 Objetivo

A aplicação da radiação ionizante, principalmente a radiação gama de cobalto-60, é atualmente uma tecnologia consolidada na esterilização de produtos médicos e cirúrgicos que pode ser também aplicada em alimentos apresentando as seguintes vantagens¹:

- processo flexível de elevada confiabilidade e repetibilidade para desinfestação, descontaminação e aumento da vida de prateleira;
- não deixa resíduos;
- não provoca aumento de temperatura durante o tratamento;
- permite que o produto seja esterilizado em sua embalagem final; e
- custo competitivo.

Muito embora o Brasil possua atualmente cinco irradiadores de grande porte, dos mais de 180 espalhados pelo mundo, dos quais dois são integrados a linha de produção e os outros três para prestação de serviços a terceiros, o reconhecimento das vantagens citadas, fazem com que a comunidade industrial e entidades que atuam na área de saúde e alimentação exerçam fortes pressões para desenvolvimentos, no País, das aplicações mencionadas.

Indo ao encontro dessas pressões, o Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN está desenvolvendo o projeto de uma planta de cobalto-60, cujo objetivo é viabilizar a implantação de novas aplicações da radiação em processos industriais contribuindo para atualização tecnológica do País, a otimização de seus processos produtivos e aumentar a competitividade dos produtos nacionais. Os principais objetivos desta planta estão centrados em:

- desenvolver e implantar no País um irradiador multipropósito para a implementação de tecnologias avançadas que utilizam a radiação ionizante como parte integrante do processo de produção. O porte deste irradiador permitirá o desenvolvimento de lotes adequados de produtos para estudos de otimização da produção em escala comercial visando uma avaliação de aceitação de mercado;
- transferir tecnologia e/ou dar suporte técnico à comunidade industrial e entidades que atuam na área de saúde e alimentação na implantação de unidades de irradiação de grande porte, atendendo a atual emergente necessidade do País;
- desenvolver e validar sistemas de dosimetria e códigos computacionais de mapeamento de altas doses de radiação ionizante, para plantas de irradiação; e
- desenvolver no País tecnologia de processamento automático, integrado com sistemas de segurança para plantas que operam com elevado nível de radioatividade.

Esta planta está sendo concebida para processar, com bom desempenho econômico, a maior diversidade possível de produtos, levando em consideração a extensa gama de exigências associadas aos parâmetros de irradiação que comprometem a eficiência operacional.

A tecnologia "Fieldbus" tem encontrado aplicações em vários segmentos industriais podendo ser citados os setores sucroalcooleiros, petroquímico, químico, papel e celulose, entre outros muitos, no âmbito mundial.

Neste sentido o presente trabalho centra suas atividades num estudo da aplicação da tecnologia, recente, de automação "Fieldbus" no sistema de controle de uma unidade de irradiação utilizando fontes de ^{60}Co , de modo a atender aos requisitos de segurança do irradiador principalmente no controle de acesso à câmara de irradiação.

2 ESTERILIZAÇÃO, DESINFECÇÃO E SEUS PROCESSOS

2.1 Esterilização e desinfecção

Esterilização e desinfecção são termos geralmente bem aceitos e habitualmente confundidos.

Esterilização é um processo, físico ou químico, que destrói todas as formas de vida, aplicada especificamente a microorganismos, incluídos aí bactérias e a inativação de vírus. Os termos estéril, esterilizar e esterilização, no senso bacteriológico, significa a extinção ou destruição de todos os microorganismos viáveis. Estes termos indicam uma condição absoluta e não relativa. Um determinado produto é dito estéril ou não estéril, sendo passível a sua verificação em laboratório.

Desinfecção é geralmente menos letal do que a esterilização e na prática é um processo que reduz o número de microorganismos, sendo seu objetivo apenas evitar a disseminação de agentes patogênicos. A desinfecção inativa virtualmente todos os microorganismos patogênicos

reconhecidos mas, não necessariamente formas microbianas (exemplo, formas esporuladas) em objetos inanimados. A efetividade da desinfecção depende de alguns fatores: a) natureza e número de microorganismos contaminantes; b) concentração do agente químico aplicado; c) tempo de exposição ao agente químico; d) quantidade de matéria orgânica presente; e) tipo e condição do material a ser desinfetado e f) temperatura. Assim, desinfecção é um processo que reduz o nível de contaminação microbiana^{2,3}.

Anti-séptico e desinfetante são substâncias capazes de inibir ou destruir microorganismos, e a diferença entre estes é que o anti-séptico é utilizado em tecidos vivos enquanto o segundo, desinfetante, utilizado em objetos inanimados. Alguns agentes químicos, iodóforos por exemplo, são utilizados como germicida químico na formulação de desinfetantes bem como no anti-séptico, entretanto entra nas formulações com precisão significativamente diferente, dependendo da intenção de uso e eficácia microbiana. Desta forma, anti-séptico não deve ser usado como desinfetante e vice-versa.

2.2 Métodos de esterilização e desinfecção

2.2.1 Características gerais

Quando se procura métodos de esterilização e desinfecção aplicados em hospitais e indústrias, encontram-se processos baseados em vapor ou calor úmido, gases químicos, líquidos químicos, aquecimento ou calor seco, filtração e radiação.

Calor úmido (vapor) e gases químicos, como o óxido de etileno e formaldeído, são amplamente utilizados em várias aplicações. Os processos que utilizam radiação e filtração estéril, com filtros assépticos, necessitam um grande investimento para instalações e equipamentos.

A seleção do método de esterilização e desinfecção usualmente advém da natureza física e química do material que está sendo esterilizado ou desinfetado. Na Tabela 1 listam-se vários métodos de esterilização e desinfecção e, para cada um deles os parâmetros de processo que devem ser controlados⁴.

Tabela 1: Variáveis de processos de esterilização e desinfecção⁴.

CONTROLE NECESSÁRIO	MÉTODOS DE ESTERILIZAÇÃO E DESINFECÇÃO					
	GASES QUÍMICOS	LÍQUIDOS QUÍMICOS	VAPOR	AQUECIMENTO	FILTRAGEM	RADIAÇÃO
TEMPO	X	X	X	X	X	X
TEMPERATURA	X	X	X	X		
EMBALAGEM	X	X	X	X		
DENSIDADE	X		X	X		X
PRESSÃO / VÁCUO	X		X		X	
UMIDADE	X		X			
CONCENTRAÇÃO	X	X				
pH		X				

A variável tempo tem que ser controlada em todos os métodos de esterilização e desinfecção. Os processos químicos tem várias outras variáveis que afetam o taxa de reação química e a permeabilidade do esterilizante. Os processos térmicos são processos com menores complicações e necessitam o controle de poucos fatores para garantir a reprodutibilidade da transferência de calor ao produto em esterilização. A filtração é o mais complicado dos processos pois necessita de condições assépticas para a sua realização.

Tabela 1: Variáveis de processos de esterilização e desinfecção⁴.

CONTROLE NECESSÁRIO	MÉTODOS DE ESTERILIZAÇÃO E DESINFECÇÃO					
	GASES QUÍMICOS	LÍQUIDOS QUÍMICOS	VAPOR	AQUECIMENTO	FILTRAGEM	RADIAÇÃO
TEMPO	X	X	X	X	X	X
TEMPERATURA	X	X	X	X		
EMBALAGEM	X	X	X	X		
DENSIDADE	X		X	X		X
PRESSÃO / VÁCUO	X		X		X	
UMIDADE	X		X			
CONCENTRAÇÃO	X	X				
pH		X				

A variável tempo tem que ser controlada em todos os métodos de esterilização e desinfecção. Os processos químicos tem várias outras variáveis que afetam o taxa de reação química e a permeabilidade do esterilizante. Os processos térmicos são processos com menores complicações e necessitam o controle de poucos fatores para garantir a reprodutibilidade da transferência de calor ao produto em esterilização. A filtração é o mais complicado dos processos pois necessita de condições assépticas para a sua realização.

As técnicas que se utilizam da radiação são potencialmente as menos complexas de todos os processos vistos no tocante ao controle - apenas o tempo e a densidade do material afetam este processo⁴.

2.2.2 Vapor ou calor úmido

Dos principais métodos utilizados em hospitais e na indústria, a esterilização por vapor é o mais antigo deles e tem sido o mais profundamente estudado. Durante metade do século passado obteve-se um grandioso progresso no estudo dos microorganismos. Louis Pasteur desenvolveu métodos bacteriológicos e estudos sobre a destruição de microorganismos por calor. Robert Kock provou que doenças são causadas por espécies microbianas e o desenvolvimento de técnicas de assepsia e esterilização têm um grande efeito sobre o controle de infecções hospitalares⁴.

A esterilização com vapor é normalmente o processo selecionado por hospitais e indústrias pois esta técnica possui várias vantagens. O vapor penetra e aquece rapidamente os poros dos materiais e coloca o calor, através da vaporização, prontamente em contato com as superfícies sólidas. As bactérias resistentes são destruídas com breves períodos de exposição. Não existe resíduos tóxicos remanescentes e a qualidade do produto e letalidade do

processo podem ser controladas facilmente, sendo altamente confiáveis. O vapor é um agente esterilizante econômico.

Existem, entretanto, algumas desvantagens neste processo. O vapor não pode ser utilizado para produtos susceptíveis a altas temperaturas e também a misturas. A eliminação completa do ar do esterilizador pode tornar o processo ineficaz e produzir vapor superaquecido. Ainda, a esterilização com vapor é inadequada para produtos como óleos anidro, graxas e pós, onde não pode ser assegurado o pleno contato com a mistura de calor.

Os processos com vapor encontram várias aplicações na indústria da saúde tais como esterilização de soluções parentais, bandagens adesivas, instrumentos médico-cirúrgicos, etc.

Talvez o mais importante aspecto que deva se ser garantido é a remoção de todo o ar do esterilizador e, pelos poros do material, do produto a ser esterilizado. O motivo é que o ar aquece lentamente se comparado ao vapor saturado e pode agir como um isolante térmico ao redor do produto. Durante o início do processo o ar é forçado a sair da câmara esterilizadora pelo lado oposto ao da entrada de vapor, trazendo assim o produto a condições de temperatura e pressão de esterilização. Os múltiplos pulsos de vapor com evacuações intermitentes garantem a remoção completa de ar dos poros do material, deixando-o na temperatura

especificada. O uso de pulsos de vapor entre evacuações reduz os efeitos de secagem e resfriamento que os ciclos de vácuo podem causar ao produto em esterilização. A fase final de vácuo possibilita a facilidade de secagem.

O processo de esterilização com vapor é realizado usando-se indicadores biológicos e a medição de parâmetros físicos.

2.2.3 Gases químicos

Dois gases tóxicos são normalmente usados como esterilizantes, óxido de etileno e o formaldeído. Ambos são altamente eficientes contra contaminantes microbianos quando a umidade relativa apropriada pode ser atingida nos produtos a serem esterilizados. Estes gases têm sido utilizados a mais de cinquenta anos e cem anos respectivamente, principalmente na esterilização de dispositivos e equipamentos médicos. Em altas concentrações podem causar doenças graves ao penetrar no organismo. São gases conhecidos com características mutagênicas e cancerígenas, e vários países admitem como concentração máxima uma parte por milhão no ar em ambientes de trabalho. O óxido de etileno misturado ao ar torna-se explosivo e o formaldeído, que não é explosivo nem inflamável, é um alergênico potente⁵.

Todo tipo de microorganismo pode ser inativado por estes gases em concentrações, temperatura e tempo de exposição dentro dos limites físicos, químicos e econômicos indicados. Comparado a outros métodos de esterilização trata-se de um processo complexo face aos parâmetros que devem ser controlados.

Um ciclo típico de esterilização é feito com o acondicionamento do produto a ser esterilizado com referência à umidade, remoção de ar, reumidificação e ajuste da temperatura acima da ambiental, exposição ao gás tóxico a temperaturas controladas e finalmente a remoção do gás e excesso de água. O primeiro e último passo desse ciclo não necessariamente são feitos dentro do esterilizador e diferentes temperaturas e concentração de gás são utilizadas, dependendo da aplicação.

Esse método com gases tóxicos é flexível com relação a capacidade do esterilizador e a influência do produto a ser esterilizado.

O principal efeito do óxido de etileno e do formaldeído é a sua atuação na desidratação dos microorganismos e somente a falha na umidificação pode resultar na não destruição (sobrevivência) de alguns microorganismos.

2.2.4 Líquidos químicos

Os líquidos químicos germicidas formulados como desinfetantes e aplicados em vários ambientes, tais como hospitais e indústria alimentícia entre outros, devem utilizar protocolos específicos de eficiência microbiana, estabilidade e toxicidade para os seres humanos. Já os germicidas químicos formulados como anti-sépticos, preservativos ou drogas são usados no corpo humano e preparados para inibir ou destruir organismos na pele.

O uso de um germicida químico líquido como anti-séptico ou desinfetante depende de uma série de fatores e não simplesmente de um único agente ou procedimento, sendo adequado para todo propósito. Fatores a serem considerados na seleção incluem o grau de destruição microbiana necessário, a natureza do item a ser tratado e o custo e facilidade do uso dos agentes disponíveis².

Usualmente por este processo não é possível garantir o extermínio de bactérias.

2.2.5 Filtração

É um processo comum de esterilização que remove fisicamente os microorganismos por peneiração ou por adsorsão através de um filtro. Se o material a ser esterilizado for um fluido aquecido, esta é a única maneira prática de esterilização⁶.

Por tratar-se de um processo tipicamente mecânico (retirada física de microorganismos) pouco tem-se a falar deste processo, exceção às categorias de filtros usados e seus materiais. Assim, são utilizados basicamente duas categorias de filtros, os de profundidade e os de tela. Os filtros de profundidade, como o próprio nome diz, efetua a filtragem principalmente por sua profundidade (espessura) através de armadilhas mecânicas ou adsorsão aleatória, sendo esta categoria a mais utilizada. Já os filtros do tipo tela, por outro lado, são assim denominados por reterem fisicamente partículas ou microorganismos, contidas no líquido ou gás, na sua superfície. Filtros de membrana são exemplos desta categoria e sua estrutura é normalmente rígida e uniforme, sendo o tamanho dos poros determinado pelo tempo de sua fabricação.

Os materiais mais utilizados em filtros de esterilização são, asbesto, quartzo, caolin, nitrato de celulose, "teflon", náilon, entre outros.

2.2.6 Aquecimento ou calor seco

Este método utiliza o calor seco para esterilização e, basicamente é usado quando o material não pode ser molhado, como óleos, ceras, pós, desde que não sofram alterações quando submetidos a este aquecimento. Os materiais são efetivamente esterilizados quando processados por várias combinações de ciclos térmicos (por exemplo: 121°C por 12 horas, 160°C por 2 horas ou 170°C por 1 hora)⁷.

O material a ser esterilizado deve estar livre de impurezas pois o aquecimento produzirá uma incrustação dessas impurezas causando dificuldades na sua remoção posterior.

2.2.7 Radiação

A radiação (eletromagnética ou particulada) interage com a matéria destruindo microorganismos pela quebra de ligações químicas em moléculas biologicamente importantes, como o DNA (ácido desoxiribonucleico) e pela criação de radicais livres e moléculas reativas para atacarem quimicamente os microorganismos⁸.

Os processos de interação da radiação são como processos térmicos ou químicos com relação as trocas ocorridas no material, fundamentadas na deposição de energia. Comercialmente, a radioesterilização é usada há mais de quarenta anos principalmente na área médica, onde contabiliza-se um grande crescimento⁹.

3 RADIOESTERILIZAÇÃO

3.1 Histórico

A descoberta do raio-X em 1895, por Roentgen, foi a primeira de uma série de revelações que fundamentalmente alteraram a visão do mundo físico e trouxe grandes ferramentas para muitos métodos analíticos modernos e processos tecnológicos. A descoberta da radioatividade em 1896 e do elétron em 1897 marcou o início de um período de quarenta anos denominado, por muitos, como anos dourados da física.

Embora um esforço tenha sido feito em 1896 para investigar os efeitos do raio-X sobre os microorganismos, a carência de novas fontes de radiação adequadas, tornou tais estudos do fenômeno dificultoso e extenso, e as aplicações industriais impossíveis. Nos idos de 1930, entretanto, tubos de raio-X mais utilizáveis foram desenvolvidos e novos estudos revelaram uma relação logarítmica dose-inativação para sistemas microbianos expostos a radiações ionizantes.

Ao mesmo tempo que os efeitos da radiação em microorganismos eram quantificados, o primeiro grande acelerador de partículas estava sendo inventado por Cockcroft e Walton, Van de Graaff e Lawrence. Um amplificador de microondas de alta potência, chamado "klystron", foi inventado em 1939 pelos irmãos Varian e um acelerador linear de prótons de alta energia, baseado nos princípios desenvolvidos por R. Wideroe em 1929, foi construído por Luis Alvarez em 1946 na Universidade da Califórnia.

A tecnologia de aceleradores lineares recebeu impulso substancial dos radares cuja pesquisa e desenvolvimento foi realizado durante e depois da II Guerra Mundial. A empresa Ethicon Inc., uma afiliada da Johnson & Johnson, iniciou pesquisas sobre esterilização com radiação em colaboração com o Massachusetts Institute of Technology, de Boston, em 1949 e foi pioneira em radioesterilização comercial com um acelerador de elétrons, tipo Van de Graaff em 1956, em Somerville, New Jersey, e um acelerador linear de microondas (LINAC) em 1957. Muito embora tenha sido um esterilizador efetivo, o LINAC sofria com a pequena vida útil das "klystrons" e das falhas constantes em seu "hardware" que reduzia significativamente seu uso e aumentava em demasia os custos operacionais.

A construção de reatores nucleares, entre 1940 e 1950, criou uma grande disponibilidade de fontes de nêutrons para pesquisas básicas e produção de isótopos. Um dos isótopos mais usuais produzidos era o ^{60}Co , um emissor gama usado primordialmente em equipamentos para terapia do

câncer. No final dessa década, quantidades suficientes de ^{60}Co estavam disponíveis, o que permitiu a construção de grandes irradiadores panorâmicos para processamento comercial da radiação. A U.K. Atomic Energy Authority, em Wantage, iniciou a esterilização de produtos médicos em 1960, no mesmo ano que a Austrália usava, pela primeira vez, o ^{60}Co para a inativação do *Bacillus Anthraxis* em pelo de cabras⁸.

O primeiro irradiador da Johnson & Johnson foi construído por H. S. Marsh Ltd., na Inglaterra em 1962 e um segundo em Edinburgh, na Escócia, em 1963 pela Nuclear Chemical Plant Ltd. Essas duas plantas ainda hoje encontram-se em plena operação. Quando a Atomic Energy of Canada Ltd. começou a produzir ^{60}Co em quantidades para abastecer comercialmente o mercado da América do Norte, a Ethicon passou de aceleradores de elétrons para irradiadores gama e, em 1964 construiu duas plantas nos Estados Unidos, uma em Somerville e outra em San Angelo e uma terceira no Canadá, em Ontário. Atualmente existem operando no mundo cerca de 180 plantas comerciais baseadas no uso do cobalto-60.

3.2 Tipos de radiação ionizante

De um modo geral as radiações ionizantes podem ser classificadas em dois tipos, a eletromagnética e a particulada.

As radiações ionizantes eletromagnéticas, incluídas aí o raio-X e raios gama, são distinguidas pelo modo como são originadas. A radiação ultravioleta de pequenos comprimentos de onda também é capaz de produzir ionização mas usualmente não se enquadra em nenhum dos dois tipos anteriores, sendo considerada uma categoria separada¹⁰.

O raio-X origina-se de transições atômicas, da destruição da matéria por colisões elétron-pósitron ou pela desaceleração de elétrons livres. Este último fenômeno é conhecido como "bremsstrahlung" cuja tradução do alemão significa "quebra de radiação". A radiação gama advém da transição dos núcleos atômicos de um estado energeticamente mais excitado para um outro menos excitado⁸.

Existem várias radiações particuladas, naturais ou não, incluindo-se partículas alfa e beta, elétrons de alta energia, pósitrons, prótons, nêutrons, íons de elementos mais pesados que o hidrogênio, e uma variedade de mésons. As partículas alfa e beta naturais não têm penetração suficiente para serem usadas no processamento da radiação. Os feixes de pósitrons, prótons, nêutrons, mésons e íons pesados, todos eles produzidos artificialmente pelo homem, têm um custo elevado, limitação em sua capacidade de penetração e indução de quantidades significativas de radioatividade nos materiais irradiados. Energias de vários milhões de elétrons-volt podem ser concedidas a elétrons livres em aceleradores de, relativamente, baixo custo, e apesar das energias envolvidas, os elétrons são usados sem induzir radioatividade significativa. Existem hoje, nos

Estados Unidos, várias plantas de esterilização de produtos médicos que usam o de feixe de elétrons com energias da ordem de 12MeV⁸.

Raios X e raios gama são atenuados a uma taxa exponencial quando atravessam um material. Nesses casos, o coeficiente de atenuação depende da energia do fóton, da densidade e composição atômica do material que está sendo submetido a essa radiação.

3.2.1 Interações da radiação com a matéria

Embora as radiações eletromagnéticas diferenciem-se pela maneira como interagem com a matéria, os efeitos biológicos das interações dessas energias utilizadas para esterilização são qualitativamente similares.

A radiação destrói microorganismos quebrando ligações químicas em moléculas biologicamente importantes, como o DNA, criando radicais livres e moléculas reativas que quimicamente atacam os organismos.

A radiação ionizante eletromagnética exibe muitas propriedades similares às partículas. As partículas, pequenos pacotes de energia chamado fótons, não têm massa ou carga elétrica e são por isto capazes de penetrar significativamente na matéria até que sua energia seja completamente absorvida. Ainda que existam vários processos pelos quais o raio-X ou gama podem interagir com a matéria, apenas três destes devem ser considerados, pela sua relevância, no uso da esterilização: espalhamento Compton, efeito fotoelétrico e produção de pares⁸.

No processo de espalhamento Compton, conforme mostrado na Figura 1, um fóton que entra é defletido ao se chocar com um elétron fracamente ligado ao átomo¹¹. O fóton espalhado e o elétron movem-se para fora em direções diferentes, com o fóton carregando uma quantidade de energia menor do que tinha inicialmente. Quase toda energia perdida pelo fóton é transferida para o elétron como energia de movimento. Espalhamento Compton é a interação predominante para fótons de energia maior que 0,1MeV para aplicações em, por exemplo, materiais poliméricos e celulosos usados nos diversos dispositivos médicos.

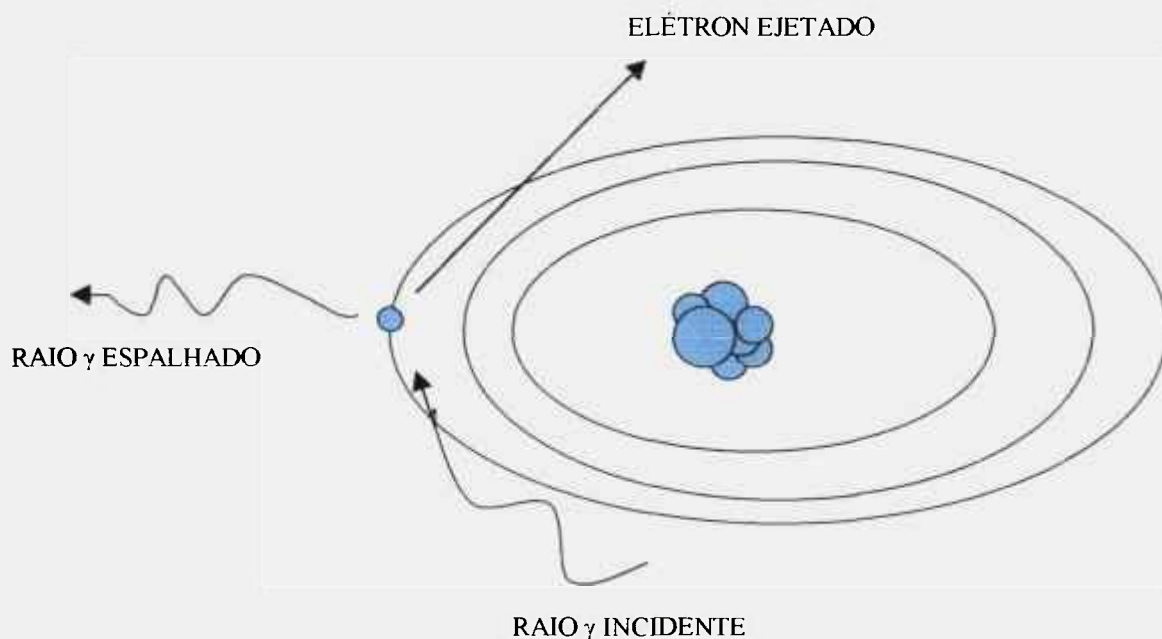


Figura 1: Espalhamento Compton

O efeito fotoelétrico (Figura 2), que já começa a ser importante para energias menores do que 0,1MeV, difere do espalhamento Compton pelo fato de que a energia do fóton é inteiramente absorvida por um átomo. A energia da radiação gama incidente é então transferida totalmente para um elétron de uma camada interna do átomo, mais habitualmente a camada eletrônica K, ejetando esse elétron. Assim, o efeito fotoelétrico é a liberação de um fotoelétron, que carrega a energia da radiação gama incidente. Este processo é bastante interessante para se medir a intensidade de energia da radiação gama, uma vez que para isto basta medir-se a energia do elétron liberado desse átomo.

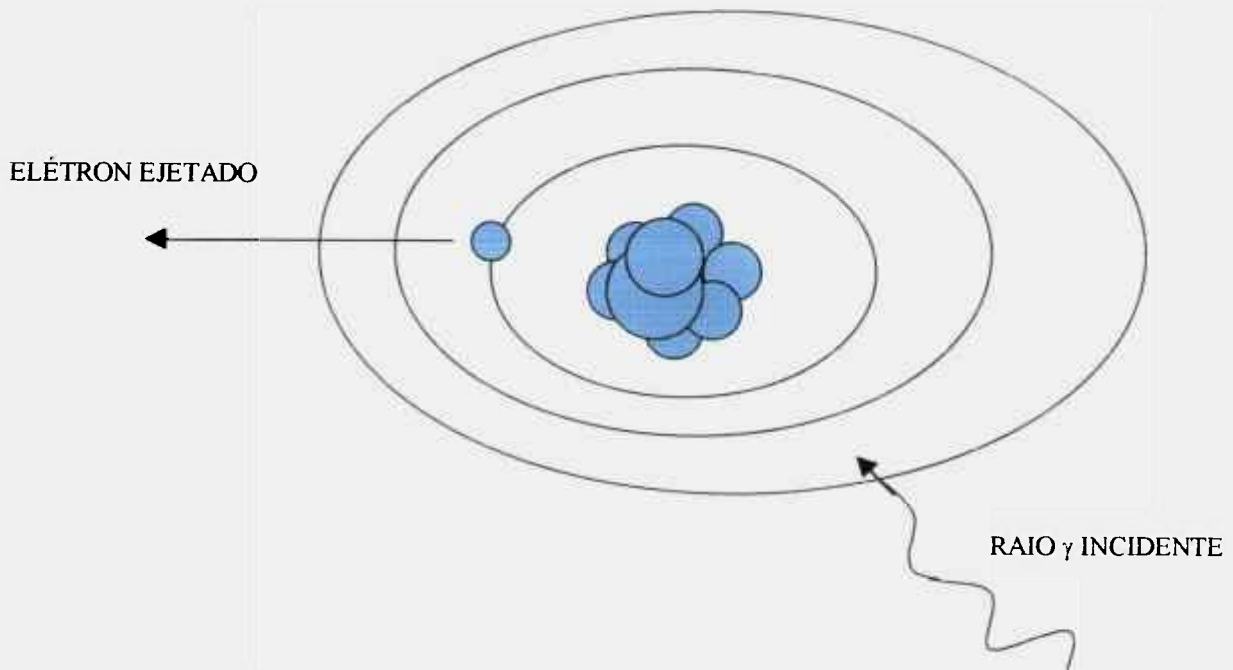


Figura 2: Efeito fotoelétrico

A produção de pares (Figura 3) somente pode ocorrer para energias acima de 1,02MeV, e isto é uma rara interação para fótons gama em uso na radioesterilização. Envolve a transformação completa de um fóton em um par elétron-pósitron.

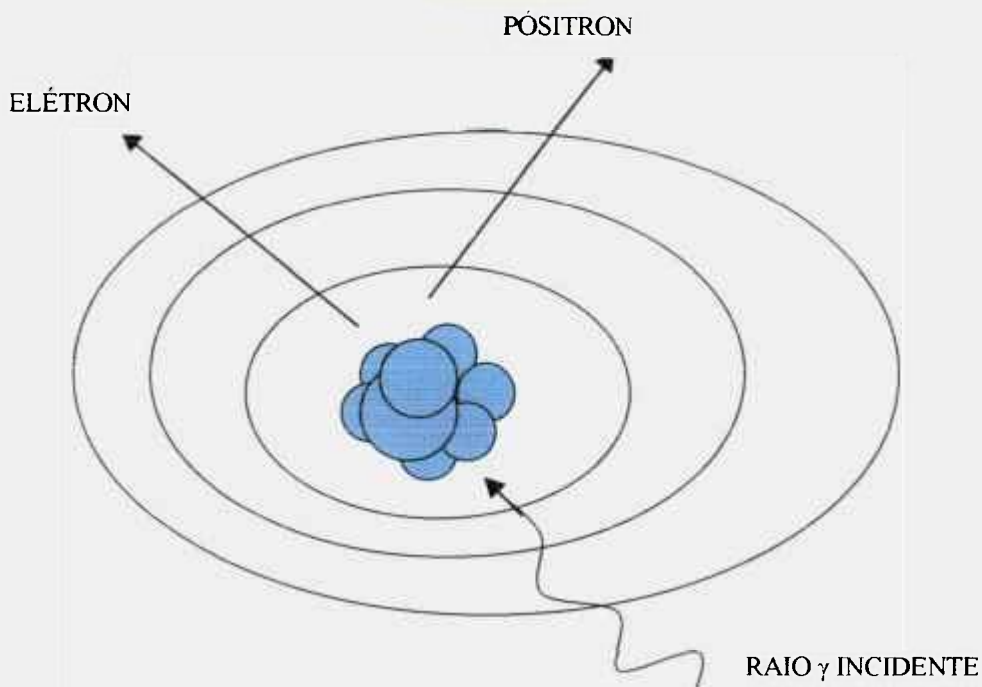


Figura 3: Produção de pares

Para o caso da radiação ionizante particulada, o agente de interação com a matéria é o elétron. Os elétrons são pequenos, carregados negativamente, e com massa de $9,1 \times 10^{-31}$ g. Devido ao fato de terem carga, ao atravessarem matéria, eles perdem energia quase continuamente através de colisões com outros elétrons, átomos inteiros ou pela geração de "bremsstrahlung". Destes, os processos de colisão são os mais significativos, sendo o "bremsstrahlung" importante em elementos de número atômico alto à energias em torno de 10MeV.

O tipo mais comum de interação, colisões com elétrons (Figura 4), ocorre quando um elétron incidente passa a uma distância da ordem das dimensões atômicas de um átomo

alvo. Os elétrons atômico e incidente repelem-se, sendo que o elétron atômico recebe energia suficiente para ser ejetado do átomo. O elétron incidente move-se numa direção ligeiramente diferente carregando menos energia do que a inicial.

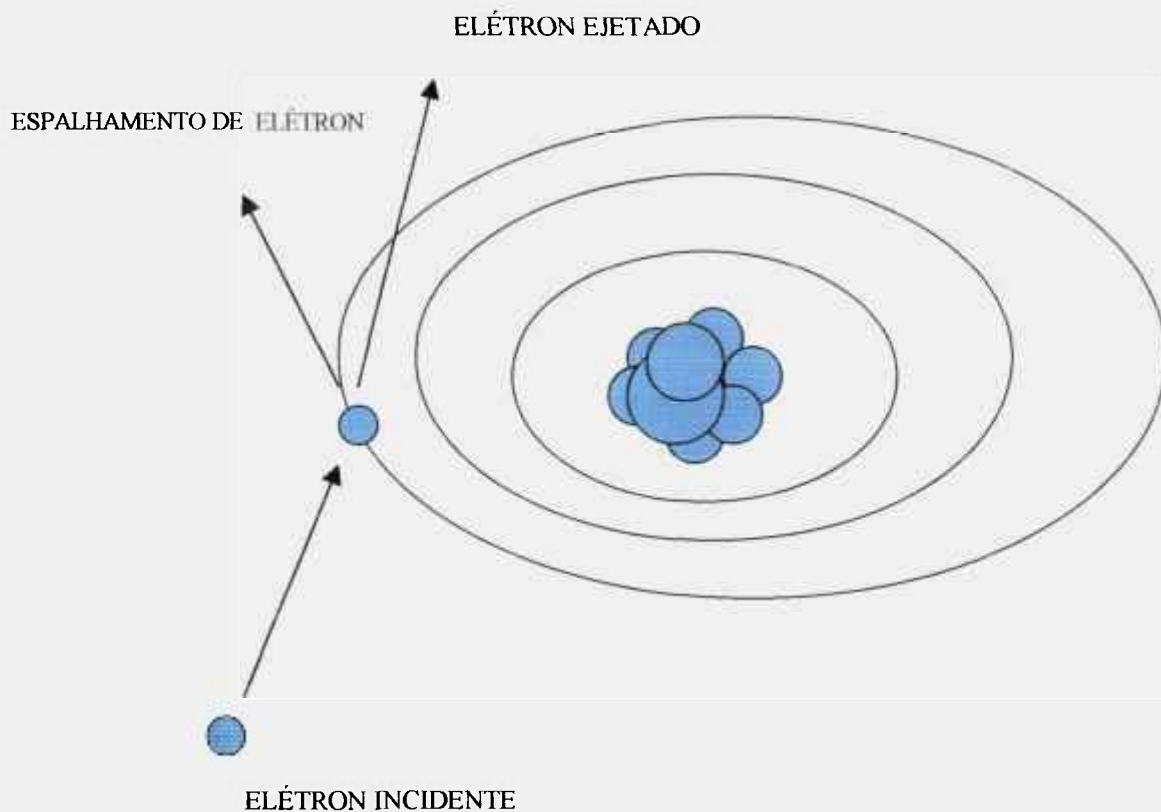


Figura 4: Colisões de elétrons

As colisões de elétron com átomos são muito similares às colisões de elétron-elétron, exceto que a mínima distância entre o elétron incidente e o átomo alvo é muito

maior que as dimensões atômicas. A energia é transferida integralmente para o átomo resultando em sua excitação ou ionização. Essas interações são por vezes referidas como "colisões leves".

O efeito "Bremsstrahlung" (Figura 5), a produção de radiação pela desaceleração de elétrons, ocorre quando um elétron de alta velocidade passa próximo ao núcleo atômico. O campo elétrico na periferia do núcleo gera uma curvatura na trajetória do elétron e a partícula emite um raio-X. Este processo conta com maior dissipação de energia quando elétrons de alta energia passam através de elementos pesados, pois esses elementos possuem uma carga nuclear alta.

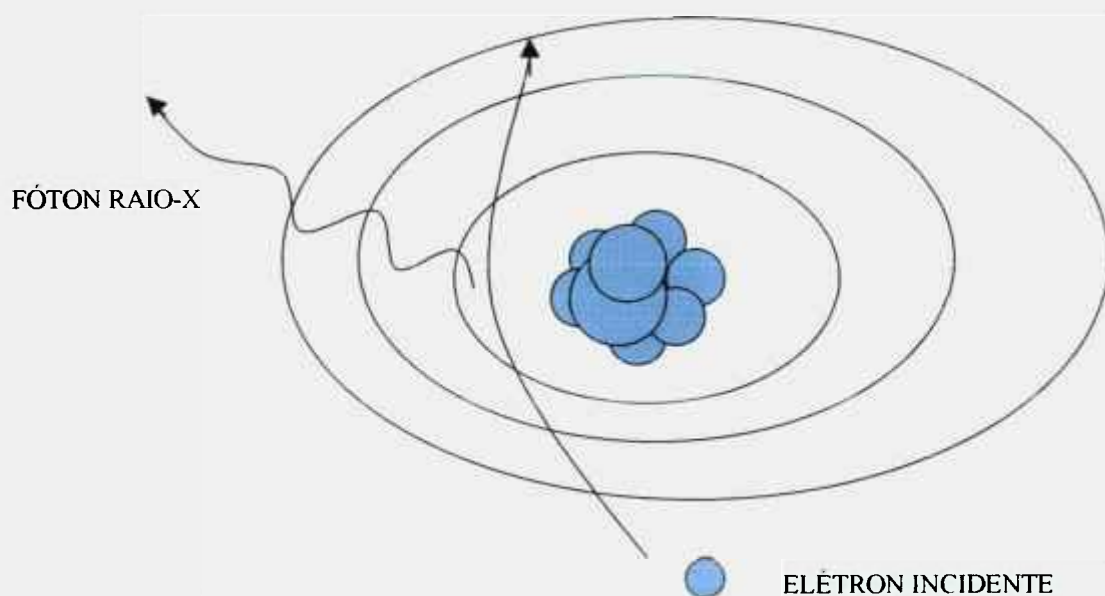


Figura 5: Efeito "Bremsstrahlung"

A penetração de elétrons na matéria é mais restrita que as radiações eletromagnéticas de energias equivalentes. Por outro lado, materiais irradiados com elétrons tem a dose absorvida dentro do alvo dependente da densidade do material e energia do elétron enquanto nos irradiadores com gama ou raio-X esses atravessam o alvo sendo sua atenuação dependente da densidade do material. Estas características tem relevância no projeto de uma planta pois a elas estão vinculadas as doses com que o material a ser esterilizado pode ser submetido.

3.3 Processos de radioesterilização

Os processos de radioesterilização economicamente viáveis baseiam-se na radiação gama e feixe de elétrons.

A radiação gama proveniente de uma fonte de ^{60}Co e o feixe de elétrons oriundo de um acelerador industrial diferem no poder de penetração. A radiação gama tem um grande poder de penetração, mas baixa intensidade (10^3 a 10^4 Gy/s). No caso de aceleradores de elétrons, a corrente e a energia do feixe devem ser selecionadas de acordo com a velocidade de produção e a profundidade necessária de tratamento, respectivamente. A faixa de penetração efetiva de

um feixe de elétrons é função da energia deste feixe e densidade-espessura do material a ser irradiado¹².

3.3.1 Fontes gama

As instalações industriais que utilizam fontes de radionuclídeos, ^{60}Co ou ^{137}Cs , são construídas de forma similar, sendo que as fontes em si consistem pastilhas do radioisótopo, encapsuladas em zircaloi, e após a irradiação são colocadas em arranjos na forma de lápis de aço inoxidável, selados e dispostos em geometria tal a permitir que o material receba a dose mais homogênea possível.

Como já visto anteriormente, os raios gama são ondas eletromagnéticas obtidas pela desintegração do ^{60}Co . Obtém-se o ^{60}Co a partir do ^{59}Co , pela absorção de um nêutron, por irradiação em um reator nuclear.

Como qualquer átomo instável, o ^{60}Co tende a se estabilizar, e desse modo libera energia na forma de uma partícula beta e dois raios gama. Esse processo de decaimento resulta num isótopo estável, o ^{60}Ni . Essa desintegração nuclear pode ser mencionada em função da meia-vida do radioisótopo, tempo necessário para que o número de átomos

instáveis seja reduzido à metade do valor inicial. O ^{60}Co apresenta uma meia-vida de 5,27 anos. A Figura 6 mostra o esquema de desintegração do cobalto-60¹².

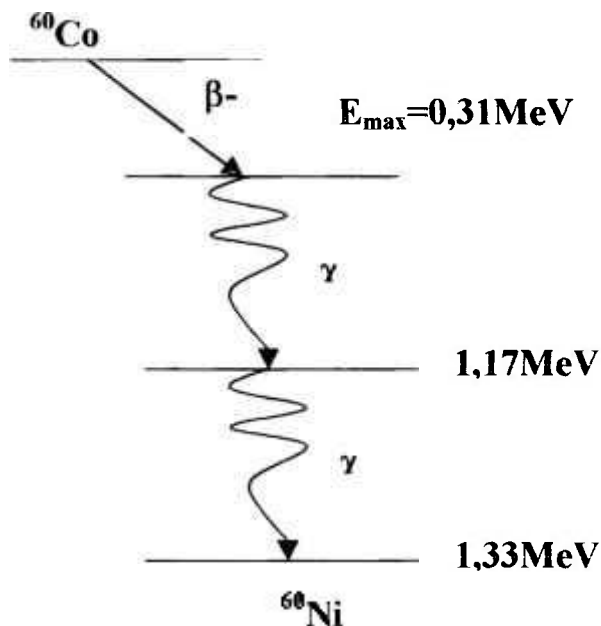


Figura 6: Esquema de desintegração do ^{60}Co

Para compor a fonte, o cobalto é acondicionado em cápsulas de aço inoxidável e este encapsulamento é capaz de frear a partícula beta, sendo aproveitados, na sua integralidade, os fótons da radiação gama com energias de $1,17 \text{ MeV}$ e $1,33 \text{ MeV}$. Desse modo obtém-se a energia total dos fótons emitidos a partir de cada uma das desintegrações do ^{60}Co sendo igual a $4,0 \times 10^{-13} \text{ J}$, que corresponde à somatória das energias convertidas em Joule dada pela relação de igualdade $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Para se obter a potência nominal de uma instalação, basta que se multiplique esta energia (gerada por uma fonte com atividade de 1 Bq) pela atividade total da fonte.

3.3.2 Aceleradores de elétrons

Um acelerador de partículas pode ser definido como um equipamento que aplica forças a partículas carregadas por meio de alguma combinação de campos elétrico e magnético, gerando íons de alta velocidade e alta energia cinética. Quando se estabelece um potencial de alta tensão entre o cátodo e ânodo, no vácuo, o cátodo emite feixe de elétrons, chamados raios catódicos ou feixes eletrônicos, seguindo o mesmo princípio do tubo de televisão, onde a diferença fundamental é que este último utiliza potenciais de aceleração de aproximadamente 25.000volts enquanto ao acelerador de partículas aplica-se da ordem de milhões de volts¹².

A dinâmica do feixe de elétrons apresenta uma dependência entre o movimento das partículas e parâmetros do campo na estrutura de aceleração, criando forças de interação com o feixe em movimento. O produto da intensidade do feixe ou corrente elétrica formada por partículas carregadas em movimento no acelerador pela energia do feixe, corresponde à potência do feixe de elétrons. A potência média do feixe está diretamente relacionada com o rendimento da taxa de dose de radiação.

Os principais componentes e subsistemas de um acelerador de elétrons são a fonte de alta tensão, o tubo acelerador com seu sistema de vácuo, o canhão de elétrons, sistema de radiofrequência, a câmara de ionização, painel de controle e um sistema de segurança que inclui a blindagem da radiação.

Os aceleradores de elétrons podem ser classificados conforme sua faixa de energia ou de acordo com a estrutura de aceleração do feixe. Uma das possibilidades de classificação divide-os em Aceleradores de Ação Direta, Aceleradores ressonantes de RF (radiofrequência), Aceleradores Lineares Ressonantes e Aceleradores de Indução. Dentre os de Ação Direta encontram-se aqueles cuja aceleração é do tipo eletrostático, de corrente contínua ou alternada, e é excitado por um gerador de alta tensão. Os aceleradores de Van de Graaff, Cockroft-Walton, transformadores de núcleo isolado e os Dynamitron estão entre estes¹³.

3.4 Aplicações da radioesterilização

As radiações ionizantes têm experimentado o crescimento de seu uso em práticas comerciais em áreas como a médica, farmacêutica, saúde pública, cosméticos e alimentos. Baseado nos efeitos microbianos e outras modificações químicas e físicas de materiais, o processamento da radiação

tem sido usado em processos de esterilização de dispositivos e produtos médico-cirúrgicos, matérias-primas para formulações farmacêuticas e na preservação de alimentos para aumentar o tempo de armazenamento até o fornecimento ao consumidor final¹³.

Dos atributos da radiação quando comparado aos processos convencionais, estão a conservação e economia de energia bem como a preservação do meio ambiente, por se tratar de um processo cuja operação é não poluente além de garantir uma esterilidade superior do produto final.

A radioesterilização pode ser aplicada em produtos como, seringas, cateteres, luvas, bandagens, implantes, ferramentas cirúrgicas, dispositivos contraceptivos intra-uterino, cloreto de sódio, soluções de sais de cálcio, fosfato de sódio, lactatos, talcos, antibactericidas, esteróides, cremes de limpeza, loções, etc.

Entre os produtos farmacêuticos, alguns podem ser esterilizados por calor ou óxido de etileno, porém em outros casos existem problemas com a disponibilidade técnica das embalagens e a radioesterilização apresenta-se como a única solução. A possibilidade de otimização da dose em produtos já embalados, de acordo com o nível de carga biológica, que é habitualmente baixa em muitos produtos farmacêuticos, é mais um aspecto atrativo da radioesterilização.

Dentre as aplicações, em processamento de alimentos, destacam-se a inibição da germinação em bulbos e tubérculos (batatas, cebolas e alhos), aumentando o seu tempo de armazenagem; eliminação de insetos e parasitas de grãos (arroz, trigo, feijão, etc.); desinfestação de frutas (mamão, abacate, morangos, etc.) estendendo a sua vida útil e possibilitando a exportação para países que impõem barreiras fitossanitárias; eliminação de agentes patogênicos (salmonela e outros) em frangos, peixes e carnes em geral; e redução da carga microbiana em temperos, especiarias e vegetais desidratados.

Entre outras aplicações das radiações ionizantes é possível citar a coloração de vidros, que, mediante dose adequada leva os vidros brancos, tipo "flint", a coloração âmbar na intensidade desejada, sendo que esse processo viabiliza a produção de pequenos lotes de frascaria variada sem a necessidade de enormes partidas em fornos de vidraria; a coloração de gemas, principalmente o topázio, onde a radiação induz modificação do incolor para a tonalidade azul, possibilitando uma grande elevação no seu valor comercial; a alteração de propriedades de polímeros através de reações denominadas reticulações, tornando-os mais resistentes à abrasão e à elevação da temperatura; na conservação de obras de arte, onde a aplicação de radiação ionizante possibilita a eliminação de insetos e fungos que deterioram tais obras, principalmente as confeccionadas em madeira, e também permite que seja feita uma impregnação de resinas de proteção cuja polimerização é induzida pela radiação; na vulcanização de látex de borracha natural, sem a necessidade da utilização do enxofre, com a obtenção de produtos de desempenho semelhante e isentos de contaminações

e agentes poluidores, técnica essa hoje amplamente utilizada por países asiáticos na confecção de luvas, tubos de látex, preservativos e outros.

4 IRRADIADORES DE COBALTO-60

4.1 Descrição e sistemas

O projeto e a construção de irradiadores, principalmente aqueles que utilizam como material radioativo o ^{60}Co , são fatores importantes para a aplicação a que se destinam (esterilização, irradiação de alimentos, etc.) visto que estes afetam diretamente a distribuição das doses no produto e a faixa de dose que se pode obter para a irradiação de produtos.

Um dos fatores de maior importância no projeto de um irradiador é a uniformidade da distribuição da dose absorvida num dado produto a ser tratado. A uniformidade da dose absorvida é a relação entre a dose máxima e a dose mínima absorvida ao longo de todo o volume de um material. Por outro lado, a planta de irradiação deve ser operada no seu ponto de eficiência ótima com relação à utilização da radiação. A natureza física e a quantidade do produto a ser esterilizado determinam as diferenças entre instalações¹⁴.

Um irradiador genérico é composto basicamente de uma sala de irradiação, piscina de armazenamento das fontes radioativas, sistema transportador de material a ser beneficiado, sala de controle (ou simplesmente um painel de controle) e áreas para armazenamento de produtos. A Figura 7 mostra esquematicamente as principais partes de um irradiador de ^{60}Co .

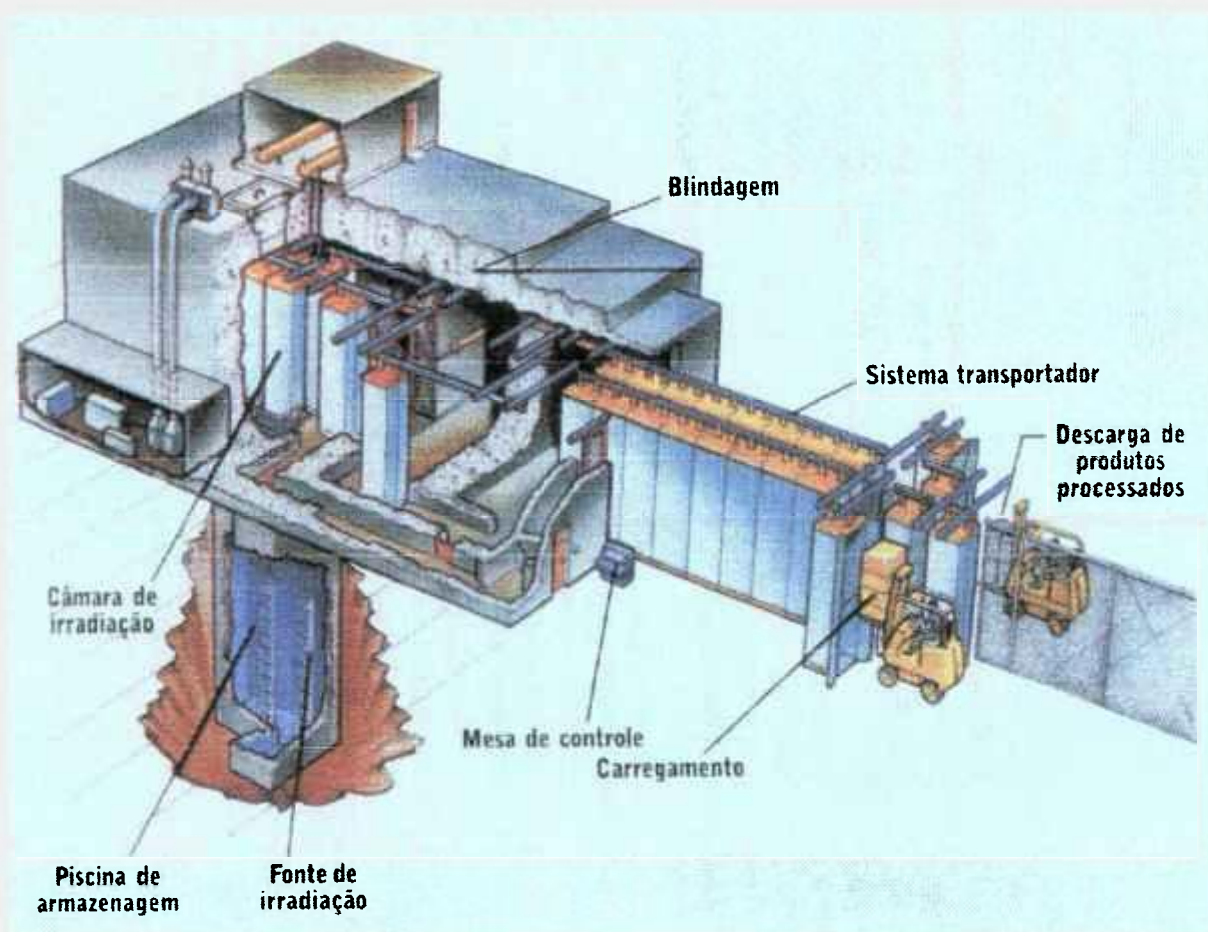


Figura 7: Instalação de um irradiador de $^{60}\text{Co}^{15}$.

A sala de irradiação é o local onde os produtos são tratados (irradiados). Construída com paredes de concreto e portas especiais para impedir a liberação de radiação, possui um sistema de controle onde intertravamentos e alarmes impedem que a fonte de radiação seja içada sem que todas as portas estejam lacradas.

A piscina de armazenamento é o local onde as fontes de ^{60}Co são mantidas quando não se encontram em uso. Localizada sob a sala de irradiação possui grande profundidade e conseqüentemente grande volume de água, pois a água, uma das melhores blindagens contra radiação conhecida, absorve a energia da radiação e protege os operadores da exposição quando em serviço dentro da câmara.

O sistema transportador é responsável por deslocar automaticamente os produtos dentro e fora da sala de irradiação. Este sistema deve ser capaz de fazer os produtos passarem pelo campo da radiação dentro da câmara com um tempo controlado para que estes possam absorver a quantidade correta de energia necessária ao tratamento a que estão sendo submetidos. Como os níveis de energia são demasiadamente baixos, não induzindo radioatividade no material, imediatamente depois de tratados os produtos irradiados podem ser descarregados e transportados manualmente.

Na sala de controle por meio do painel de controle, operadores, devidamente qualificados e treinados,

controlam e monitoram a fonte de radiação e o tratamento do produto. Situada fora da câmara de irradiação, na sala de controle observa-se basicamente um console de controle que centraliza as informações de controle e segurança de toda a instalação.

As áreas de armazenamento de produtos devem ter basicamente duas divisões. Fisicamente separadas, uma área de armazenamento de produtos ainda não irradiados (entrada de produto) e outra de produtos irradiados (saída de produto), estas duas divisões devem existir para assegurar o correto armazenamento e manuseio, impossibilitando a mistura dos produtos tratados e os que serão tratados, simplificando assim a necessidade de procedimentos para o inventário de materiais dentro da instalação.

4.2 Condições de controle de processo

No caso de irradiadores que possuem sistema transportador contínuo, o controle da taxa de dose absorvida, geometria da fonte com relação ao produto, velocidade da esteira e permanência ou tempo de trânsito dos produtos em relação às fontes de ^{60}Co são os itens mais significativos para o estabelecimento efetivo do tratamento com a radiação. Devem ainda ser considerados fatores relativos ao produto a

ser irradiado, como por exemplo homogeneidade, variações de densidade e outros.

Para garantir reprodutibilidade das condições de irradiação, o sistema transportador, particularmente, deve ser bem monitorado e ter sua velocidade aferida sempre que necessário. Essa calibração deve considerar o decaimento radioativo da fonte e fazer sua compensação, aumentando o tempo de permanência ou diminuindo a velocidade. O posicionamento correto do produto deve ser assegurado, porém não deve ser possível movimentar a esteira enquanto a fonte não atingir completamente a posição de irradiação e esta deve retornar automaticamente à sua blindagem quando o sistema transportador falhar ou qualquer outra falha no sistema ocorrer, como por exemplo a água da piscina baixar de um determinado nível, etc. O intertravamento do sistema de controle e segurança é o responsável por isto, garantindo que o inventário de radiação dentro da câmara de irradiação, no caso de panes elétricas ou mecânicas, esteja nos padrões pré-definidos¹⁶.

Os parâmetros de controle de processo de uma instalação podem ser monitorados pela sala de controle e automaticamente gravados. As informações mais comuns são as de posição da fonte, seqüência de movimento do produto, velocidade da esteira transportadora, horários de partida, desligamento e eventuais falhas ou alarmes além dos níveis de radiação e temperatura dentro da sala de irradiação. Cuidando desses parâmetros garante-se o bom funcionamento da planta de irradiação.

Ao iniciar-se o processo de irradiação, os parâmetros referentes àquele determinado produto devem estar devidamente caracterizados para o sistema afim de assegurar as condições apropriadas do tratamento, não permitindo assim irregularidades no decorrer do processo.

4.3 Tipos de irradiadores gama

Sob o aspecto segurança, em função de sua acessibilidade e blindagem, e de acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica¹⁷, existem quatro tipos de irradiadores gama denominados Categoria I, Categoria II, Categoria III e Categoria IV.

Em um irradiador da categoria I (Figura 8), a fonte selada é completamente encapsulada em um "container" contruído de material sólido e blindada durante todo o tempo, de forma que o acesso a essa fonte não é fisicamente possível. Esse tipo de irradiador recebe, comercialmente, o nome de "gammacell".

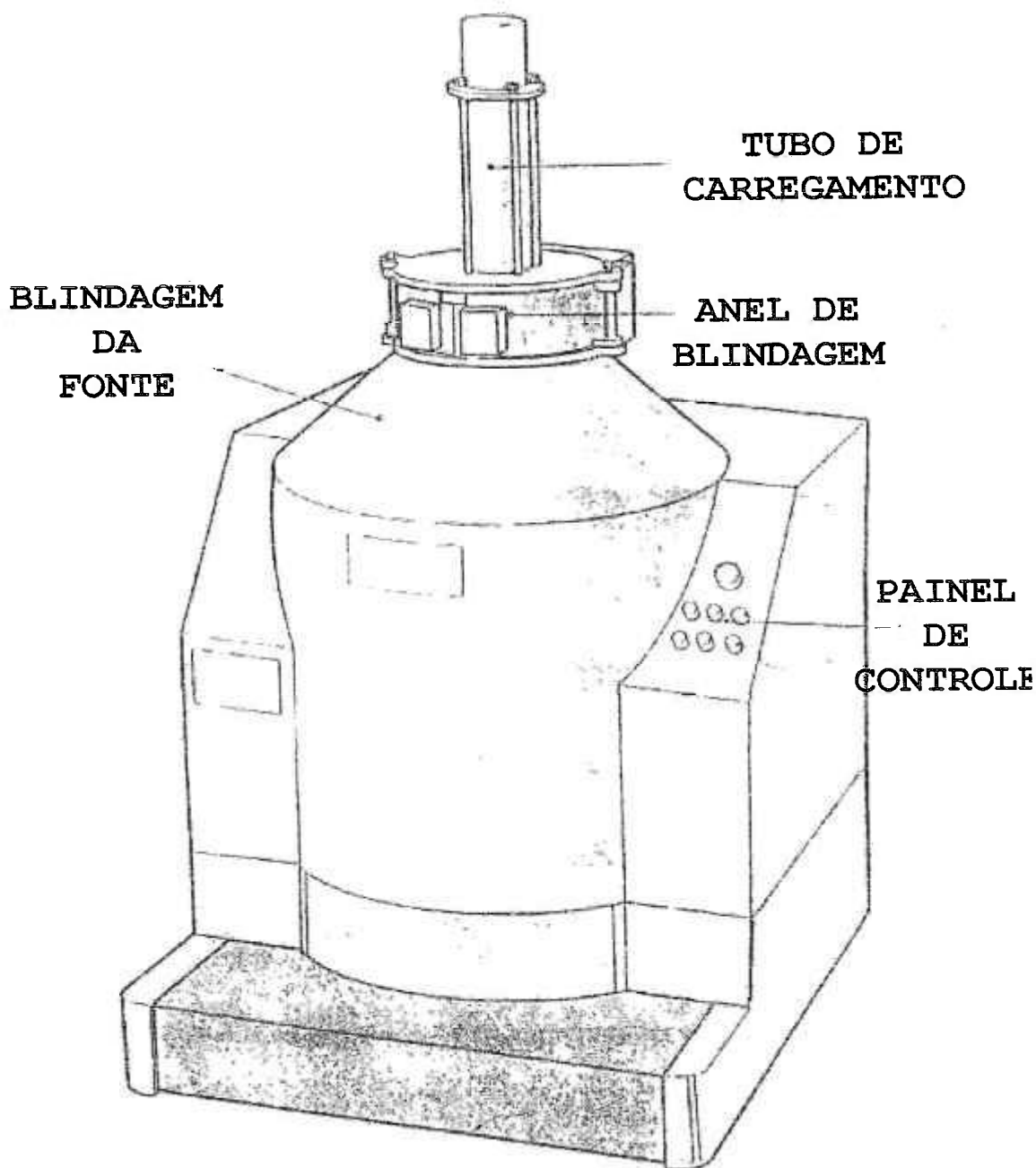


Figura 8: Irradiador de ^{60}Co categoria I¹⁷.

Na categoria II (Figura 9), o acesso ao irradiador é controlado pois, não estando em uso a fonte é completamente selada e, exposta dentro de um compartimento quando em uso quando, nessa condição, deve ser inacessível.

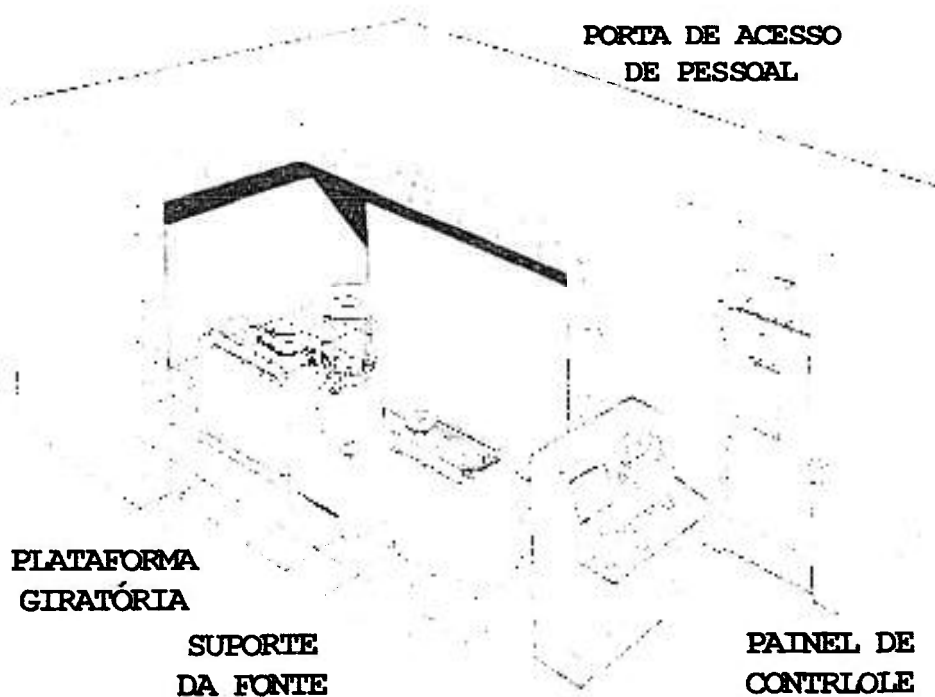


Figura 9: Irradiador de ^{60}Co categoria II¹⁷.

Nos irradiadores da categoria III (Figura 10) a fonte selada é mantida em uma piscina e blindada durante todo o tempo de forma que o acesso a essa fonte é fisicamente restrito pelo projeto.

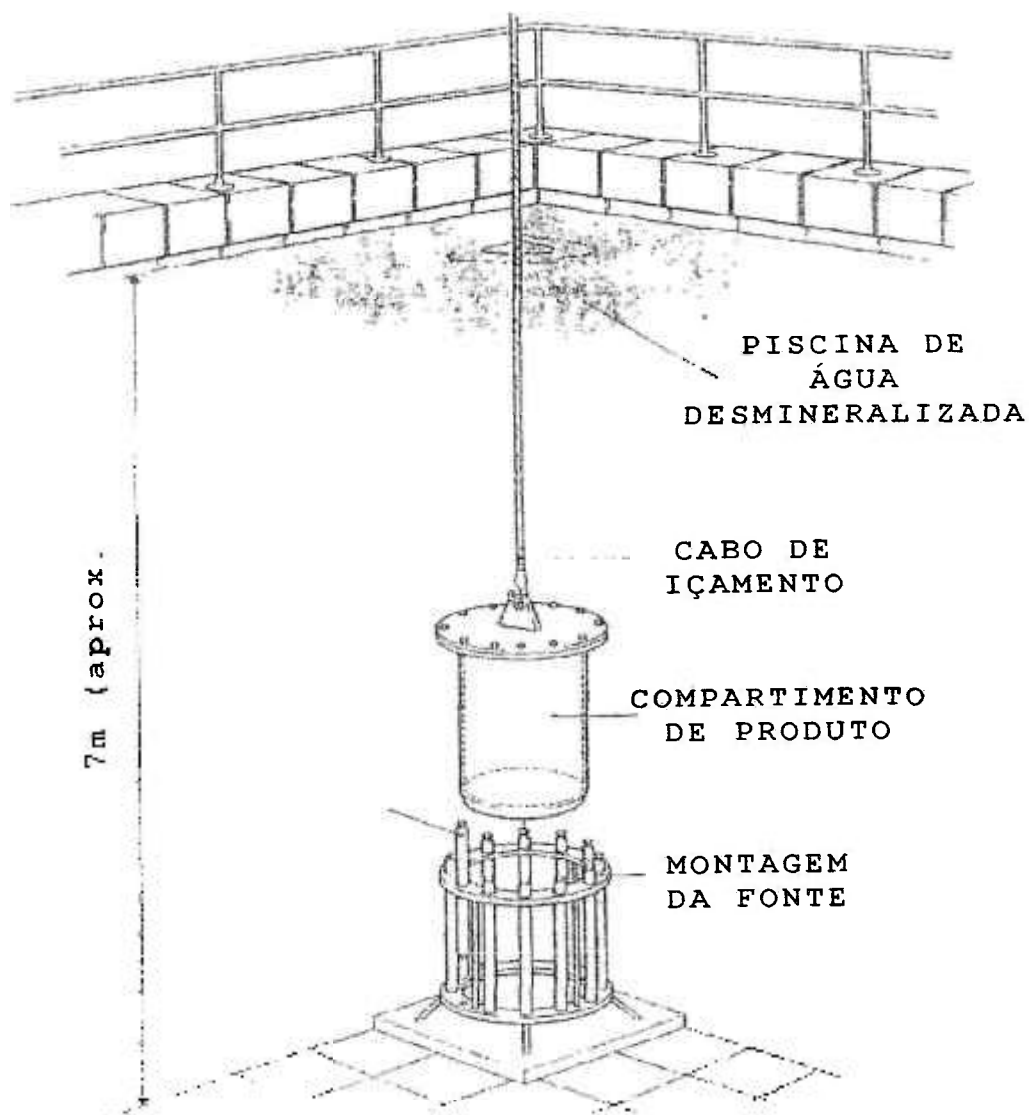


Figura 10: Irradiador de ^{60}Co categoria III¹⁷.

A categoria IV (Figura 11) é uma fonte selada armazenada em uma piscina que, quando não está em uso é completamente blindada e durante o uso está exposta dentro de seu compartimento, devendo-se manter a inacessibilidade durante este procedimento.

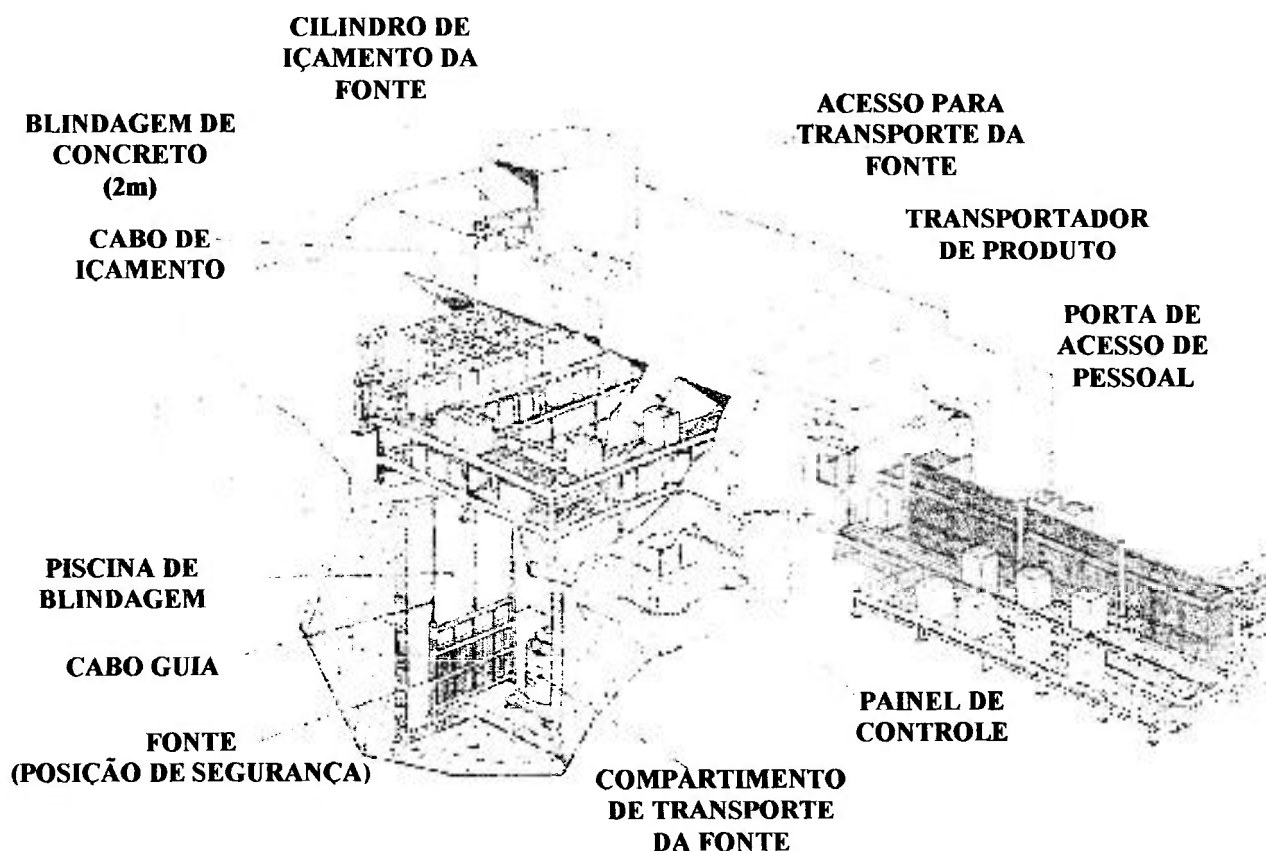


Figura 11: Irradiador de ^{60}Co categoria IV¹⁷.

4.4 Segurança da instalação

4.4.1 Introdução

O projeto de um irradiador é fundamentado em fatores como propósito e a categoria da planta. Desta forma não é possível determinar-se um sistema específico para se atingir a segurança necessária, porém é possível estudar-se alguns princípios que devem ser seguidos, se necessário a combinação deles, para que seja atingido e mantido o nível de segurança pretendido¹⁷.

De um modo geral, a análise de segurança de um irradiador de cobalto-60 utiliza uma abordagem que considera a seleção de eventos iniciadores, a determinação de funções de segurança, a modelagem da seqüência de um possível acidente e, dentro das disponibilidades existentes na literatura, uma análise probabilística de segurança desse irradiador. Este método é usado para se identificar os iniciadores postulados, ou seja, as ocorrências que conduzem a um possível cenário de acidente.

Os acidentes que devem ser considerados como de topo são, por exemplo, os de "pessoas expostas à radiação" e "liberação de material radioativo", que podem ser gerados pela reunião de eventos que exerçam influência nas possíveis conseqüências. Por exemplo, pode-se verificar na Figura 12 o diagrama lógico, com eventos iniciadores, baseado no método de Análise de Árvore de Falhas.

Na Figura 12, cada um dos catorze eventos iniciadores, que representa a possibilidade de se levar pessoas à exposição acidental de radiação, devem ainda ser detalhado.

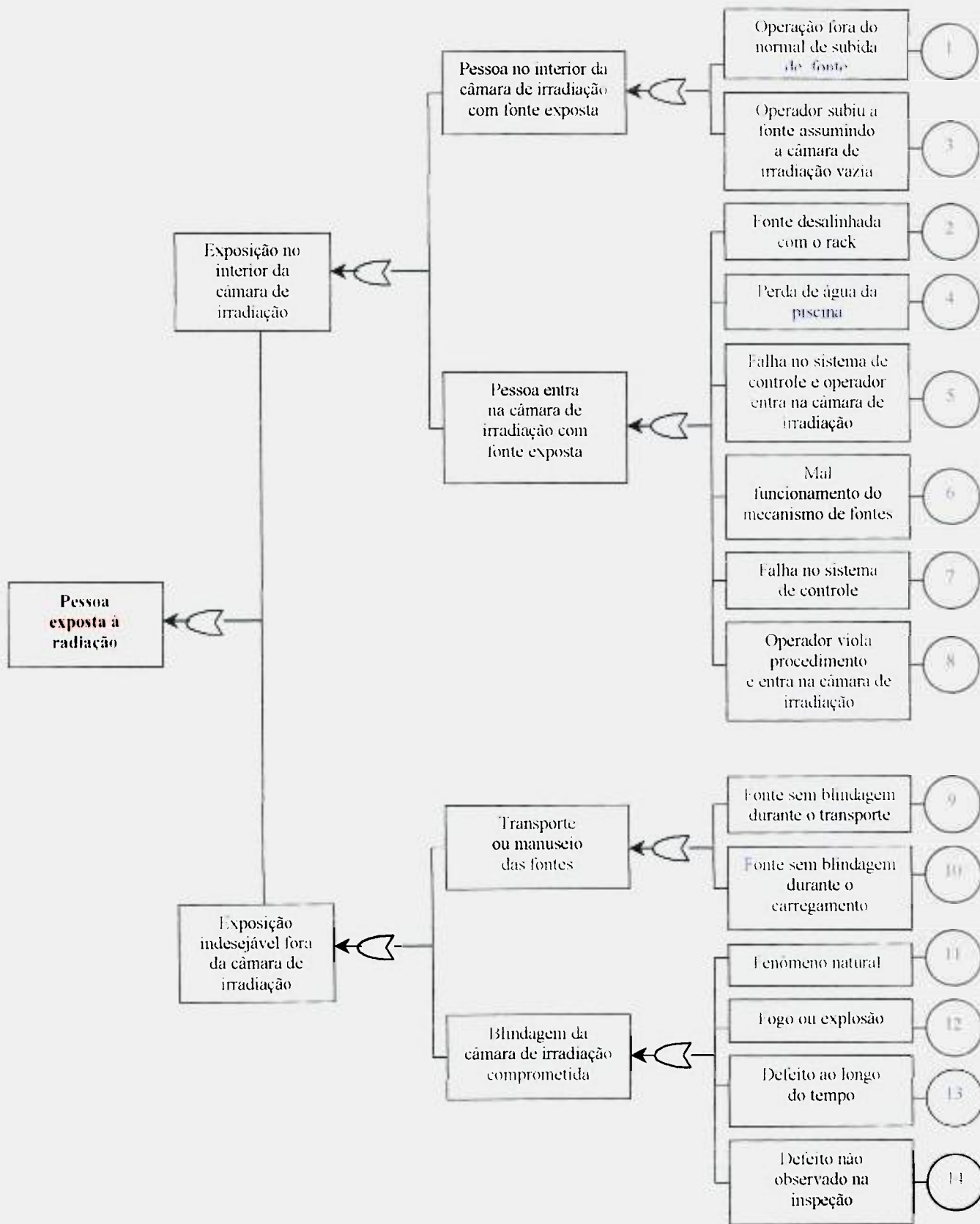


Figura 12 : Diagrama lógico com eventos iniciadores que podem levar a exposição acidental de pessoas às fontes radioativas.

Tome-se o caso iniciador de número cinco, mostrado na Figura 13, onde ocorre a falha no sistema de controle e o operador entra na câmara de irradiação.

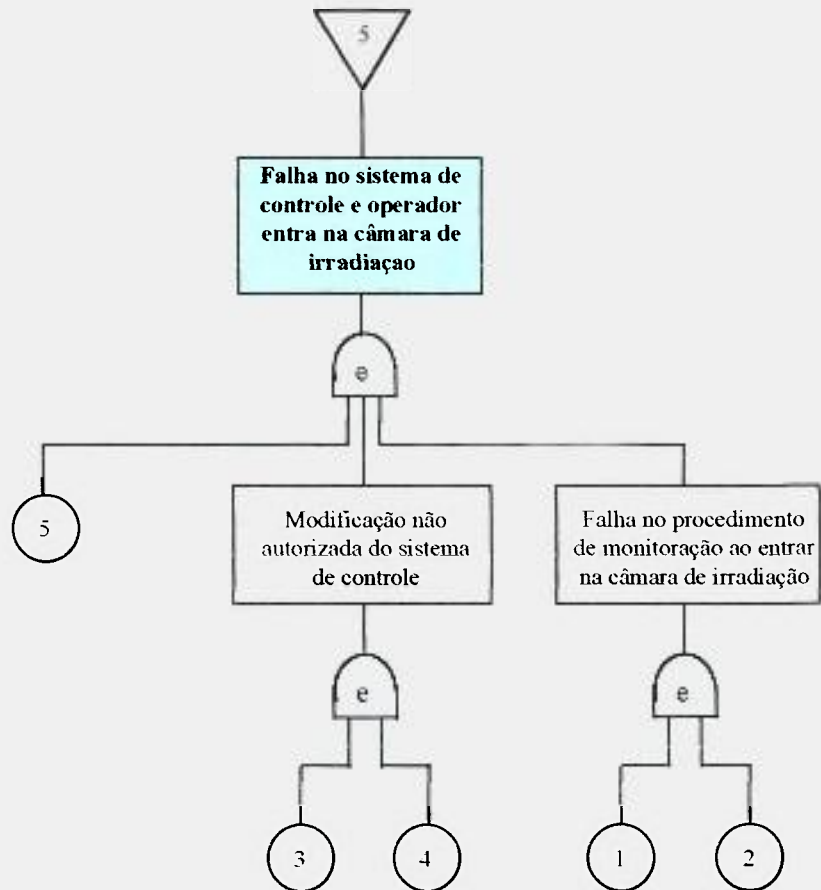


Figura 13 : Diagrama lógico de um dos eventos iniciadores

Na Figura 13, os modos de falha são:

1. falha no monitor portátil de radiação (falha da bateria, sonda ou pane no circuito eletrônico);
2. falha no procedimento de checagem do monitor portátil de radiação antes de entrar na câmara de irradiação;

3. modificação não autorizada no painel de controle;

4. modificação não autorizada no controlador lógico programável; e

5. falha no sistema de monitoração interna da câmara, permitindo o desbloqueio da porta de acesso.

Da mesma forma, o diagrama lógico da Árvore de Falhas para o caso de liberação de material radioativo teria similaridade ao apresentado aqui.

Cabe salientar que não há disponibilidade de dados específicos que contemplem as frequências de eventos geradores, principalmente os relacionados às atividades humanas. Por outro lado, se um determinado projeto apresenta todos os itens de segurança necessários ao atendimento do princípio da defesa em profundidade (redundância, independência e diversidade) e principalmente ao atendimento de todas as funções básicas de segurança de uma planta, pode-se, pela utilização desta metodologia demonstrar qualitativamente a segurança de uma determinada instalação.

4.4.2 Defesa em profundidade

Dentre os princípios a serem seguidos como filosofia de segurança, o conceito de defesa em profundidade apresenta a maior contribuição. Este conceito deve ser aplicado à todas as atividades de segurança tais como organizacional, comportamental ou projeto propriamente dito para garantir que estes estão cobertos por uma série de procedimentos tal que se uma falha ocorrer, ela estará sendo compensada e corrigida. Ou seja, defesa em profundidade é uma medida aplicada preferencialmente de modo automático, ou com a mínima interferência do ser humano, na reação de uma falha, agindo de modo a mitigar a sua causa bem como corrigir os seus efeitos¹⁷.

O projeto de processo deve incorporar defesa em profundidade de maneira que múltiplos níveis de proteção estejam presentes e a necessidade de intervenção humana seja minimizada.

Alguns níveis de proteção podem ser introduzidos, tais como, redundância, diversidade e independência.

4.4.2.1 Redundância

O princípio da redundância nos sistemas de segurança significa o uso de um número de itens maior que o necessário para uma dada função. Redundância permite que a falha ou indisponibilidade de um determinado item seja tolerado sem a perda de sua função. Para esse propósito, componentes idênticos ou diversos devem ser utilizados¹⁷.

4.4.2.2 Diversidade

A confiabilidade de alguns sistemas pode ser atingida com a aplicação do princípio da diversidade, outro princípio de segurança. Diversidade é aplicada a sistemas redundantes, que desempenham a mesma função de segurança, incorporando diferentes atributos a estes sistemas ou componentes. Tais atributos diferenciados podem ser, por exemplo, diferentes condições de operação, diferentes fabricantes entre outros. As causas de uma potencial falha devem ser examinadas afim de se determinar onde o princípio da diversidade poderia ser aplicado efetivamente¹⁷.

Se a diversidade é aplicada, um cuidado deve ser tomado para garantir que este atenda ao incremento desejado da confiabilidade na implementação do projeto. A fim de reduzir eventuais falhas, o projetista deve selecionar os materiais, componentes, processos de fabricação, princípios de operação, etc. para todos os similares dos sistemas. Se componentes diversos são usados, existirá uma garantia razoável de que isto trará benefícios gerais, não deixando de considerar que algumas desvantagens estarão presentes, como complicação de operação, manutenção e procedimentos de testes.

4.4.2.3 Independência

Independência, em um sistema, é a isolação física e separação física de seus componentes. A confiabilidade de sistemas pode ser aumentada aplicando-se os seguintes princípios de independência:

- a) manutenção de independência entre sistemas redundantes;
- b) manutenção de independência entre componentes do sistema projetados para mitigar os efeitos de incidentes, evitando assim que um incidente atinja, com perda ou falha, sistemas de segurança usados para mitigar os efeitos daquele evento;

- c) manutenção de independência apropriada em um sistema ou componente de diferente importância para a segurança; e
- d) manter a independência entre sistemas importantes para a segurança daqueles não importantes para esse fim¹⁷.

4.4.3 Sistemas eletrônicos programáveis

Os sistemas eletrônicos programáveis têm tido sua aplicação aumentada em sistemas de controle e segurança. Problemas podem originar-se relacionados com a integridade do "hardware" e validação do "software", protagonistas de falhas em sistemas. É de extrema importância que somente pessoal capacitado e devidamente treinado tenha permissão para alterar o "software". Tais procedimentos devem estar formalizados. Nenhuma alteração de "software" será concebida sem a competente autorização e comunicação ao fabricante¹⁷.

5 TECNOLOGIA "FIELDBUS"

5.1 Sistemas de automação industrial

Os sistemas de automação industrial foram introduzidos nos anos quarenta baseado na tecnologia, disponível na época, de instrumentação pneumática. Com os desenvolvimentos na área de eletrônica, passou-se por sistemas de controle analógicos (4mA a 20mA), digitais centralizados e digitais distribuídos. A diferença entre estes dois últimos está na "inteligência" atribuída aos sensores, antes inexistentes¹⁸.

Os circuitos integrados com alta escala de integração ("VLSI - very large scale integration") possibilitaram tal avanço. Para exemplificar o grau deste avanço tecnológico citam-se os microprocessadores e microcontroladores (também chamados de "SCC- single chip computer") onde tem-se em uma única pastilha uma quantidade quase ilimitada de transistores, hoje da ordem de dezenas de milhões destes.

Desta forma os subsistemas tornaram-se inteligentes porém com comunicação precária, visto que os sinais de campo, transformados em sinais analógicos passam por conversores analógico-digitais para serem processados, degradando a exatidão da leitura, pois essas conversões não traduzem fidedignamente os reais valores. Tal exatidão é ainda piorada se levado em consideração que, para retornar e atuar em um elemento ativo no campo, também analógico, o sinal é novamente deteriorado pela aplicação de um conversor digital-analógico¹⁹.

Os sistemas constituídos de componentes discretos produzem um controle efetivo dos processos, porém trazem desvantagens sob os aspectos custo, instalação e manutenção. Aprofundando-se no item instalação, estes sistemas utilizam-se de "hardware" simples com conseqüente complexidade em sua implantação. Esta complexidade de instalação (principalmente cablagem) torna a manutenção difícil. Qualquer alteração do sistema ou processo requer reformulação total do "hardware" e, não raras, alterações de todo o sistema de controle.

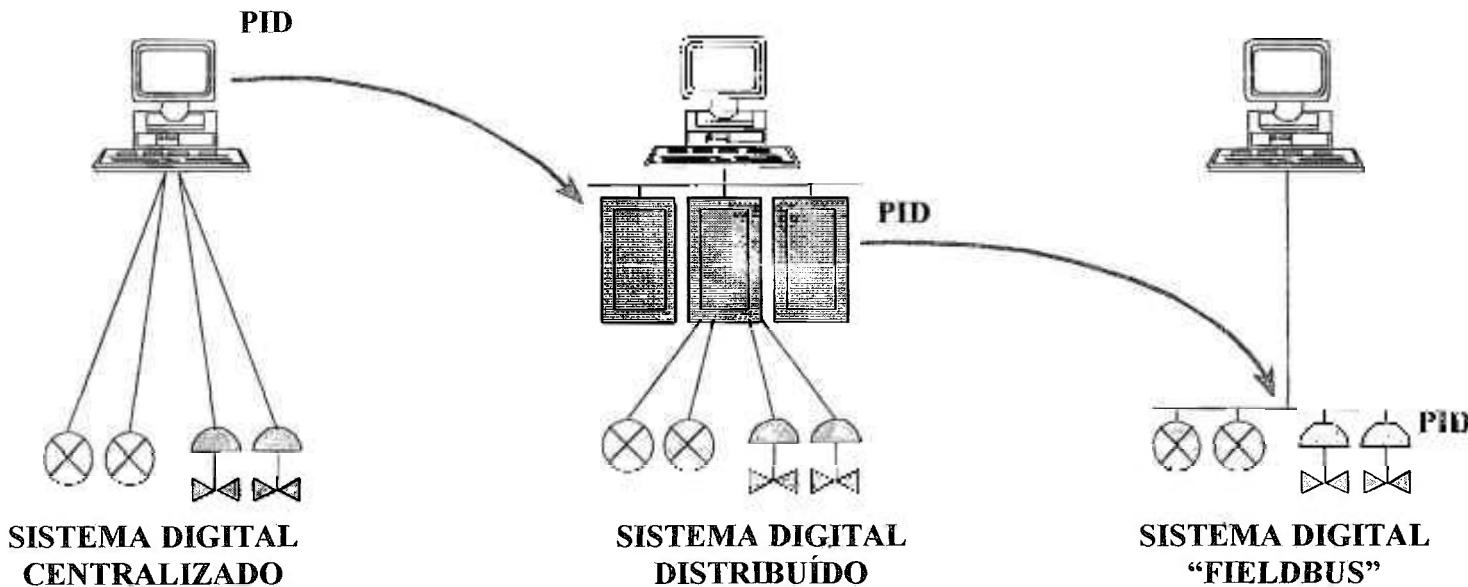


Figura 14: Evolução dos sistemas de automação²⁰.

Os sistemas inteligentes, transmissores de sinais, t6Em "hardware" mais complexos, porém induzem uma maleabilidade na manutenção, visto que alterações são de relativa simplicidade, bastando, basicamente, reformulações de "software". A Figura 14 mostra a evolução dos sistemas de autiomação.

5.2 "Fieldbus"

A tecnologia "Fieldbus", implantada somente há sete anos, é uma nova era na automação industrial. Aplicada atualmente em vários processos químicos e industriais em geral. Há na área nuclear, apenas uma citação no 11th International Meeting on Radiation Processing ocorrido em 1999 em Melbourne, Austrália²¹.

Com o advento da comunicação digital entre instrumentos, isto é, a transferência de sinais digitais, pode-se ter uma rede de comunicação com um protocolo. Protocolo é a organização necessária em uma transferência de dados seriais que possibilita a transmissão desses (dados) com garantias de sua integridade. Os protocolos de comunicação são, em sua maioria, proprietários, ou seja, não são intercambiáveis entre fabricantes diferentes, cada qual define o seu. O "Fieldbus" é uma rede de comunicação digital que une instrumentos de campo (sensores e atuadores) aos equipamentos de controle por um único barramento, no qual todas as informações transitam serialmente e multiplexadas no tempo^{22,23}.

DISTRIBUIÇÃO DA INTELIGÊNCIA

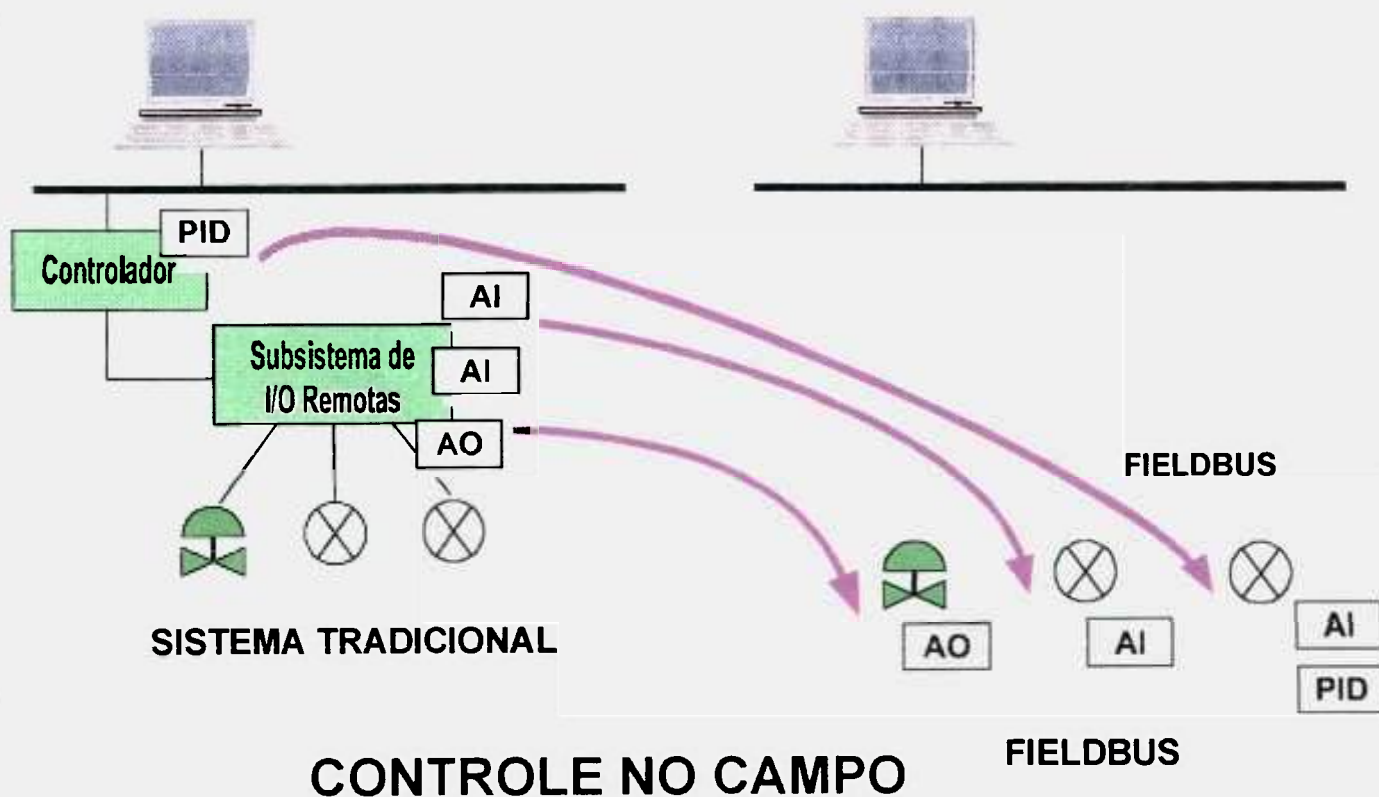


Figura 15: Redução de "hardware" e distribuição da "inteligência" com a tecnologia "Fieldbus"²⁰.

"Fieldbus" é uma evolução tecnológica da comunicação digital entre instrumentação e controle de processos, diferindo de outros protocolos pelo fato de transferir dados apenas no modo digital, conforme mostrado na Figura 15.

O "Fieldbus" é a tecnologia de comunicação digital, bidirecional, interligando instrumentos inteligentes, entre si e com seu respectivo sistema de controle. Tal tecnologia consiste em um protocolo de comunicação do tipo Redes de Área Local ("Local Area Network" - LAN), do nível mais baixo da hierarquia da automação industrial, onde os instrumentos de campo comunicam-se entre si e com um computador central de controle. Em princípio isto parece um retrocesso no aspecto de controle, visto que estar-se-ia retornando ao estágio de sistemas controlados centralmente. Em verdade isto não acontece pois a rede é independente do computador central. Esse computador tem basicamente a função supervisória, já que os instrumentos são inteligentes (pode-se pensar como se cada instrumento fosse um computador) e "comunicam-se" entre si.

A estratégia de controle está distribuída ao longo dos dispositivos de campo, sendo isto possível pois, além de possuir blocos de funções em seus microprocessadores, eles têm a disponibilidade para comunicação rápida e confiável entre si através do barramento.

Nos sistemas de automação tradicionais, as informações disponíveis não são maiores do que as variáveis de controle disponíveis, sendo que com o "Fieldbus" podem ser "criadas" informações a partir dos sinais de controle.

A tecnologia "Fieldbus" consiste em três partes básicas, mostradas na Figura 16, a saber:

1. Camada Física ("physical layer");
2. Pilha de Comunicação ("communication stack"); e
3. Aplicativo do Usuário ("user application")

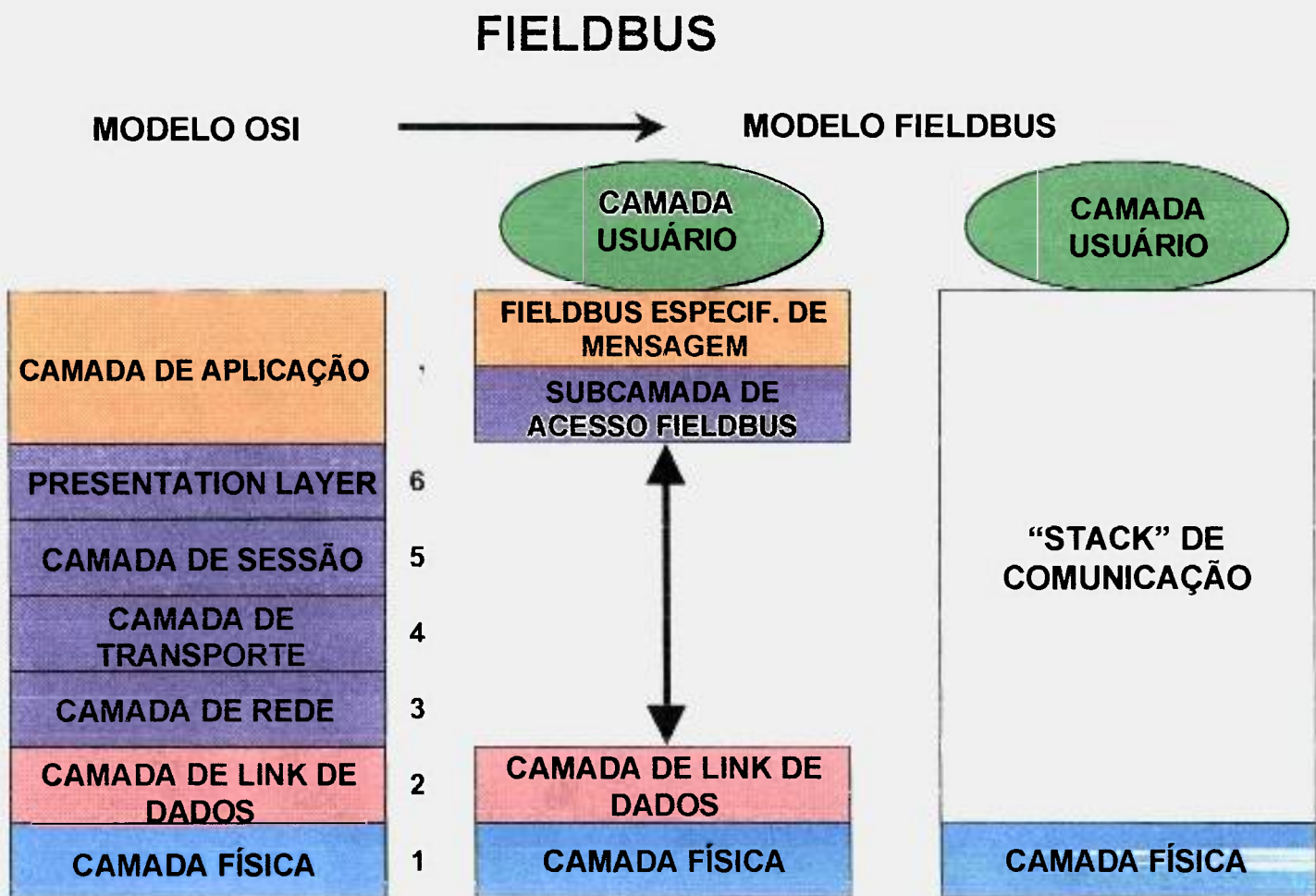


Figura 16: Comparação de modelos das camadas de comunicação²⁰.

Os sistemas ditos OSI ("open system interconnect"), para que seja possível uma comparação, possuem sete camadas não estando aí definida uma camada de aplicativo do usuário.

A camada física é definida pelo "International Electrotechnical Commission" - IEC²⁴ e pelo "International Society of Measurement and Control" - ISA²⁵. Essa camada recebe mensagem da pilha de comunicação e as converte em sinais para a "mídia Fieldbus" e vice-versa. A tarefa de conversão compreende, entre outras coisas, a adição e remoção de delimitadores de partida ("start delimiters") e terminais ("end delimiters").

Manchester Biphase-L Encoding.

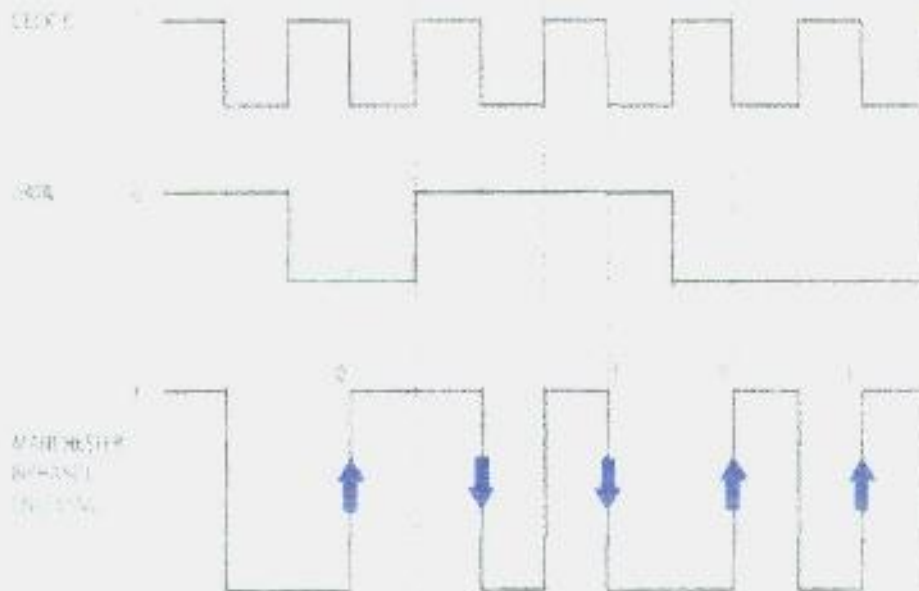


Figura 17: Configuração do sinal "Fieldbus"²⁰.

*Preamble, Start
Delimiter, and End
Delimiter.*

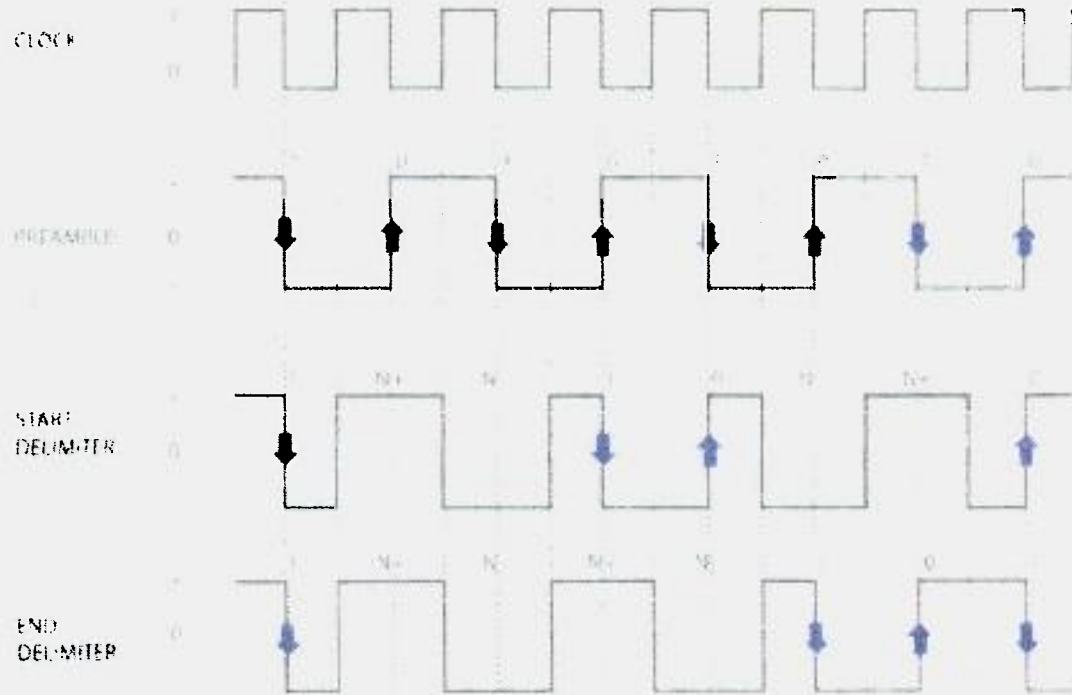


Figura 18: Forma de onda do sinal transmitido na rede "Fieldbus"²⁰.

Example of Voltage mode signaling.

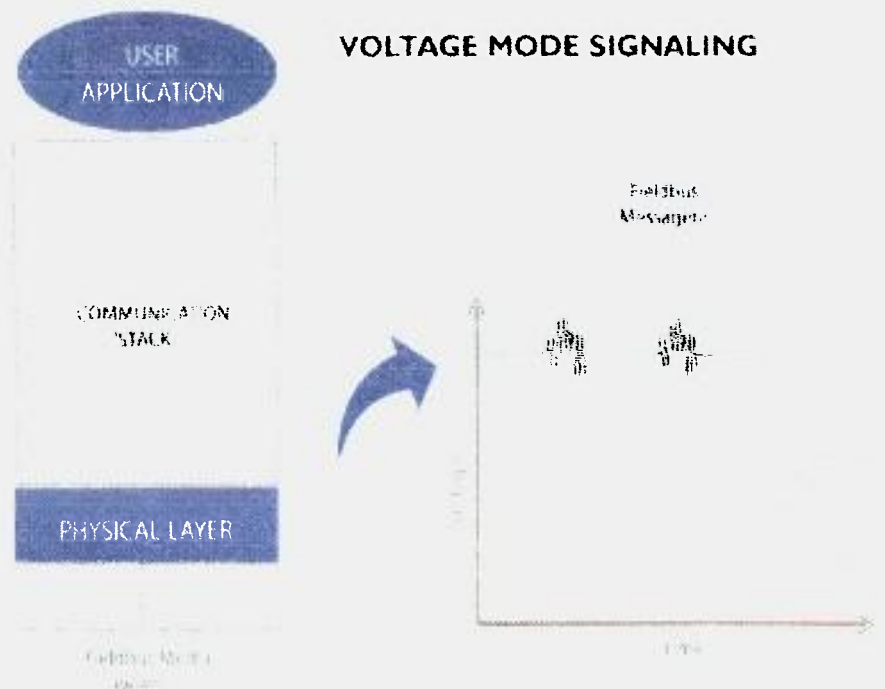


Figura 19: Sinal característico da rede "Fieldbus"²⁰.

As Figuras 17, 18 e 19 mostram o sinal característico que transita pela rede "Fieldbus".

Na camada do aplicativo do usuário, os blocos de função providenciam o sistema de controle (Tabela 2). Blocos de função padrão são definidos por norma, a "Standard Fieldbus Foundation 891 FB part 2"^{25,26,27}, mostrados na Figura 20.

Tabela 2: Funções padrão definidas pela norma²⁰.

Function Block Name	Symbol
Analog Input	AI
Analog Output	AO
Bias	B
Control Selector	CS
Discrete Input	DI
Discrete Output	DO
Manual Loader	ML
Proportional/Derivative	PD
Proportional/integral/Derivative	PID
Ratio	RA

A figura 20. mostra os blocos de funções básicas na forma de um "jogo" de montagem, e assim pode ser entendido, pois para se configurar a função de controle basta ir adicionando-se blocos. Nas figuras 21 e 22 são apresentados funções simples na forma de diagrama e de blocos montados.

FUNCTION BLOCKS BÁSICOS

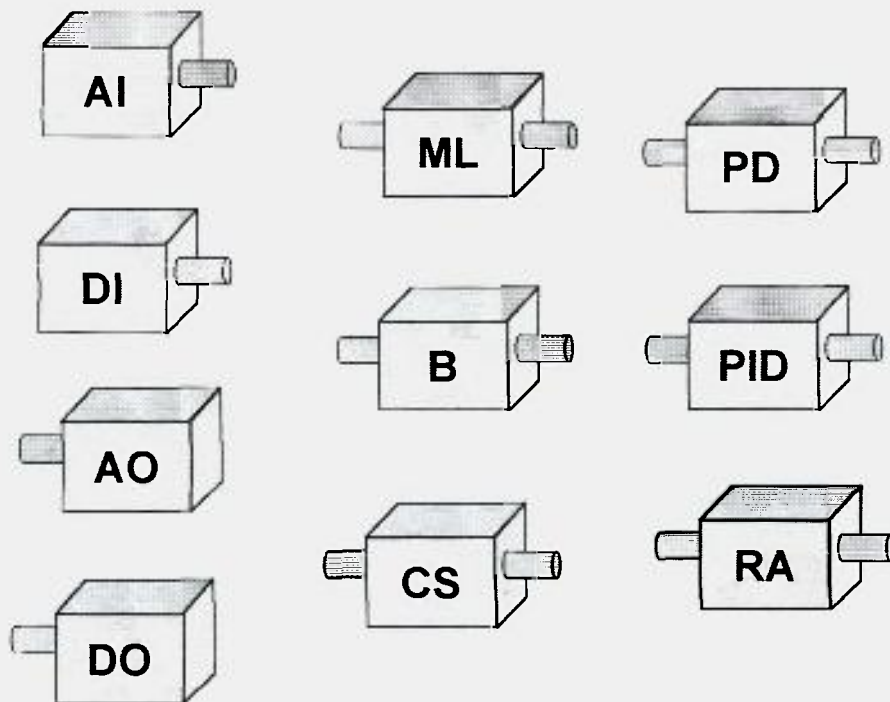


Figura 20: Blocos de funções básicas²⁰.

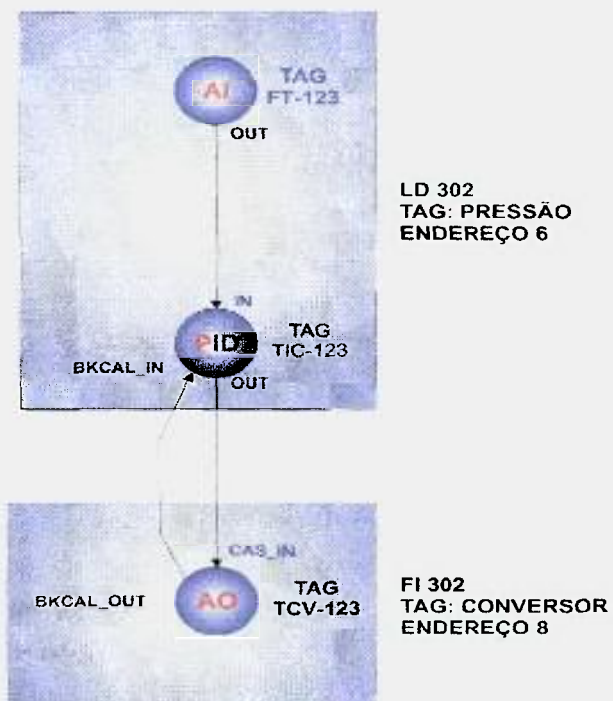
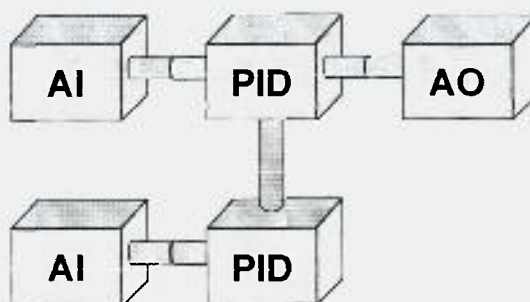


Figura 21: Aplicações de blocos de funções²⁰.



FIELD BUS CONTROLE CASCATA

Figura 22: Exemplo de aplicação de blocos de função²⁰.

Outros dezenove blocos adicionais para controle avançado estão definidos na parte 3 dessa mesma norma. Tais blocos possuem funções mais complexas do que as apresentadas anteriormente. Os blocos básicos contém o necessário sendo suficiente para que se possa construir uma função de controle automática.

Ao se analisar o exemplo de um relê com contatos normalmente abertos - NA, que ao ser energizado fecha tais contatos permitindo através destes a passagem de corrente e, assim, habilitando ou conectando um dispositivo à energia. No caso de falha deste componente, relê, ou do sistema de alimentação, a falha se dará no sentido da segurança, ou seja, desconectando o dispositivo supra mencionado da energia. No caso de um reator nuclear, por exemplo, permitiria um "scram" (queda com desligamento) das barras de controle. Se o exemplo fosse de um irradiador utilizando cobalto-60, a falha segura é no sentido de recolher a fonte radioativa ao seu encapsulamento, ou seja, faz com que o "rack" de fonte vá para a sua posição de segurança no fundo da piscina.

Nos sistemas onde novas tecnologias acabam introduzindo complexidades, como a inclusão de "softwares", facilitando a operação e controle de uma planta, a segurança intrínseca não fica bem clara. No caso dos relês é fácil associar a falta de energia ao desligamento deste sistema enquanto em outros, principalmente os computadorizados, essa associação não é imediata. Imaginar-se que ao falhar, por exemplo com a falta de energia, um controle eletrônico

levaria um "rack" de fonte ao fundo de sua piscina não é de tudo impossível, mas pode-se dizer também que isso não é óbvio.

A tecnologia do "Fieldbus" traz a vantagem de que a instalação reduz-se praticamente a um par de fios por onde transitam todos os dados de controle, sejam de medição ou de atuação. Traz também a simplicidade de geração das funções de controle através de seus blocos funcionais.

6 APLICAÇÃO DO "FIELD BUS" EM UM IRRADIADOR DE ^{60}Co

6.1 Introdução

Para que seja possível montar uma rede utilizando-se o protocolo "Fieldbus" são necessários alguns conhecimentos dos elementos que fazem parte dessa rede, as topologias possíveis e os sistemas capazes de suportarem tais predicados. Não pode-se deixar de lado a segurança necessária em uma instalação, principalmente em um irradiador gama, onde estar-se-á trabalhando nas malhas de controle e segurança dessa planta. Assim, após as definições, irá se analisar a melhor topologia e sistema aplicável a este caso, com as respectivas discussões e resultados.

6.1.1 Definição dos elementos "Fieldbus"

Os elementos que serão utilizados na rede "Fieldbus" passam a ser descritos:

6.1.1.1 BT : terminadores ("bus terminators")

O terminador é um elemento passivo conectado a linha para prevenir uma possível reflexão de sinal (casamento de impedância). Seu circuito elétrico é basicamente uma associação em série de um resistor e um capacitor. Um terminador deve estar localizado em ambas as extremidades da rede, sendo entre os condutores de sinal. O valor da impedância do terminador deve ser de 100Ω para as faixas de frequência compreendida entre 7,8kHz e 39kHz. Este valor é aproximadamente a impedância característica média dos cabos, aplicáveis as reflexões da linha de transmissão. O dreno de corrente direta através do terminador não deve exceder $100\mu\text{A}$. O terminador não deve ser polarizado.



BT-302
Terminador

Figura 23: Terminal de barramento²⁰.

6.1.1.2 FD : dispositivos de campo ("field devices")

Os dispositivos de campo podem ser alimentados pelo barramento ou alimentação independente. No caso de alimentação pelo barramento estes dispositivos devem ter um consumo operacional bastante estável e, quando no modo transmissão, controlar o consumo de corrente de modo a apresentar na linha uma variação de tensão da ordem de $1V_{FF}$ (1 volt pico-a-pico), significando um consumo quiescente (no ponto de operação) em uma linha com impedância da ordem de 50Ω . Alguns exemplos desses dispositivos podem ser os transmissores (são os sensores com eletrônica associada para produzir um sinal transmissível) de temperatura, detectores de radiação entre outros.

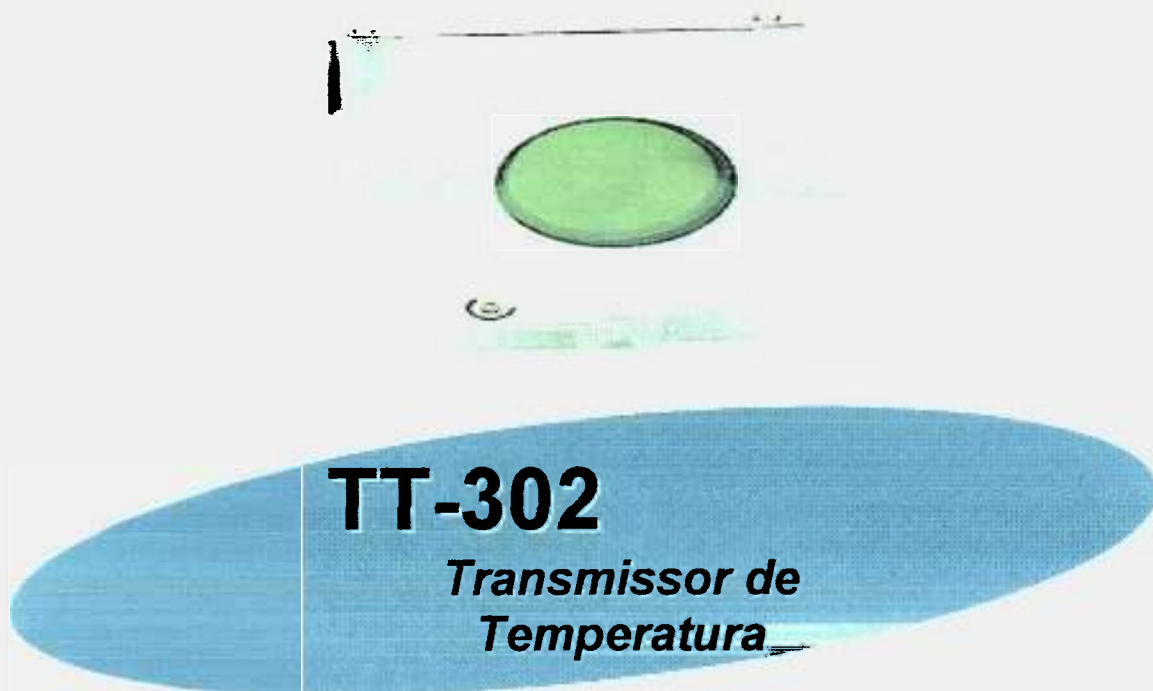
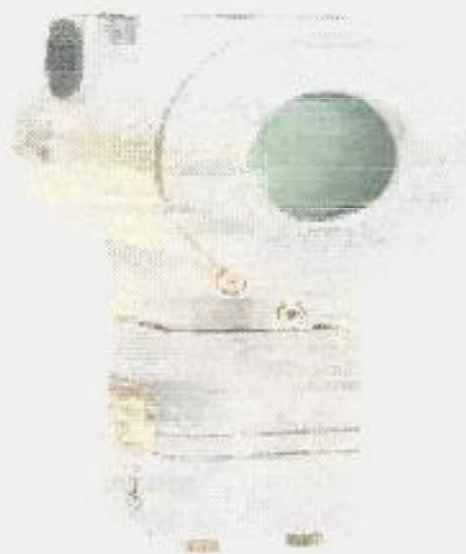


Figura 24: Transmissor de temperatura "Fieldbus"²⁰.



FP-302
Conversor
Fieldbus/Pressão

Figura 25: Conversor de sinal de "Fieldbus" em pressão²⁰.

6.1.1.3 PS : fonte de alimentação ("power supply")

A fonte de alimentação para a rede "Fieldbus" em nada difere de outras fontes de alimentação mas deve, em linhas gerais, ter um nível de ruído bem abaixo daquele

encontrado nas fontes de alimentação convencionais usadas em instrumentação. Esta fonte aceita como sinal de entrada um nível de tensão alternada variável de 90 a 260V e frequência entre 47 e 440Hz, ou entrada em tensão contínua compreendida pela faixa de 127 a 367V. Com saída em tensão contínua de 24V e 1% de precisão, tem potência de 45W e seu ruído é de 20mV.²⁰



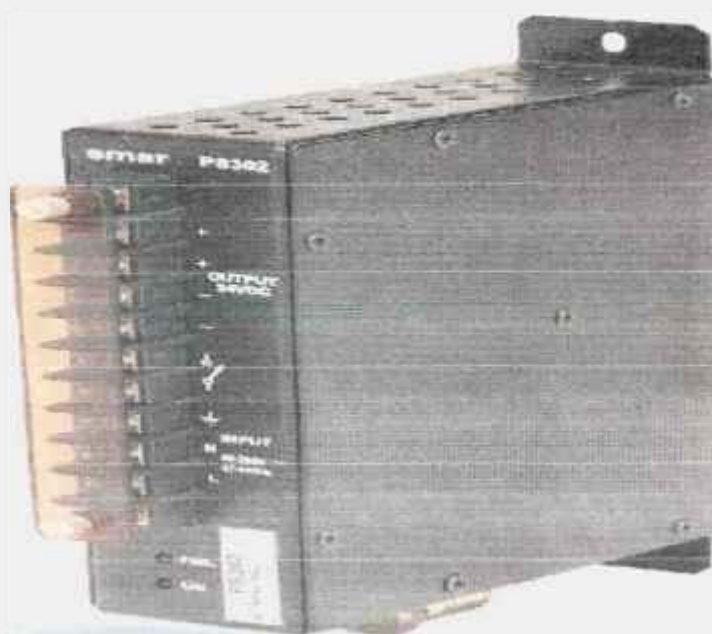
PS-302

Fonte de Alimentação

Figura 26: Fonte de alimentação "Fieldbus"²⁰.

6.1.1.4 PSI : impedância para fonte de alimentação ("power supply impedance")

A função deste circuito é implementar uma impedância de saída maior que $3k\Omega$ que, em paralelo com os terminadores (100Ω), resultará em uma impedância de aproximadamente 50Ω para que sejam evitadas ou minimizadas as reflexões eletromagnéticas na linha da rede. Este dispositivo admite entradas entre 24 e 32V com precisão de 10%, em corrente contínua, com saída de corrente de 340mA.



PS-302
Fonte de Alimentação

6.1.1.5 PCI : interface para controle de processo ("process control interface")

A interface para o controle do processo é feita através da placa de controle de processo - PCI que é também um gerenciador de comunicação multicanal que deve ser inserida em um conector ("slot") de um computador pessoal (tipo PC). Esta placa de controle é o elo de ligação entre os elementos de campo e o computador. Existem dois tipos de interfaces PCI no tocante ao computador onde esta estará inserida. A diferença básica consiste no padrão do protocolo desse computador. Essas versões disponíveis são do padrão ISA ou EISA (de 16 bits de comunicação com o computador) e outro padrão RISC CPU ("reduced instruction set computer central processor unit") de 32 bits.

Toda comunicação e controle de processo é executado internamente por essa placa, deixando o computador livre para executar a interface homem-máquina (IHM).

PCI

Interface de Controle de Processo

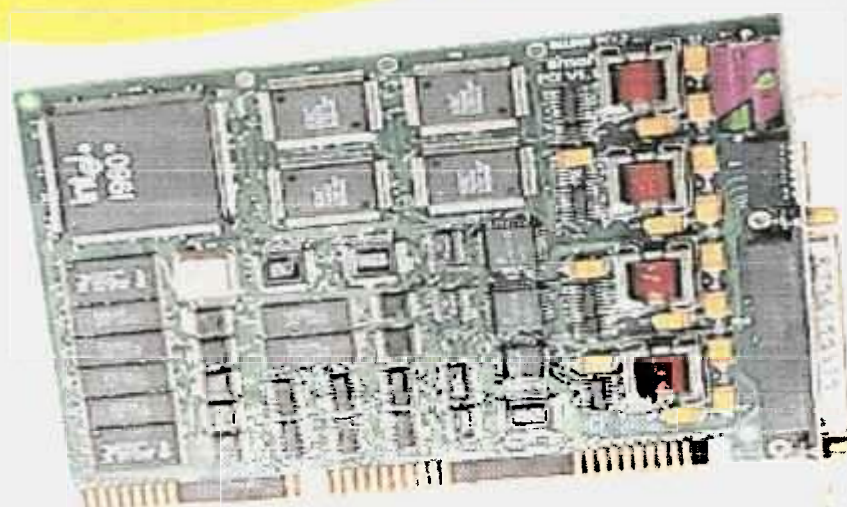


Figura 28: Interface de controle de processo "Fieldbus"²⁰.

6.2 Topologias de implementação da rede "Fieldbus"

A rede "Fieldbus" pode ser implementada com topologia em barramento ou com topologia em árvore, sendo a escolha da aplicação dependente do nível de dispersão dos equipamentos de campo, resultando em uma minimização dos

comprimentos dos cabos instalados. As Figuras 29 e 30 mostram, esquematicamente, os tipos de topologia que podem ser utilizados, salientando-se novamente que as interfaces de controle de processo, PCI, são instaladas internamente nos computadores.

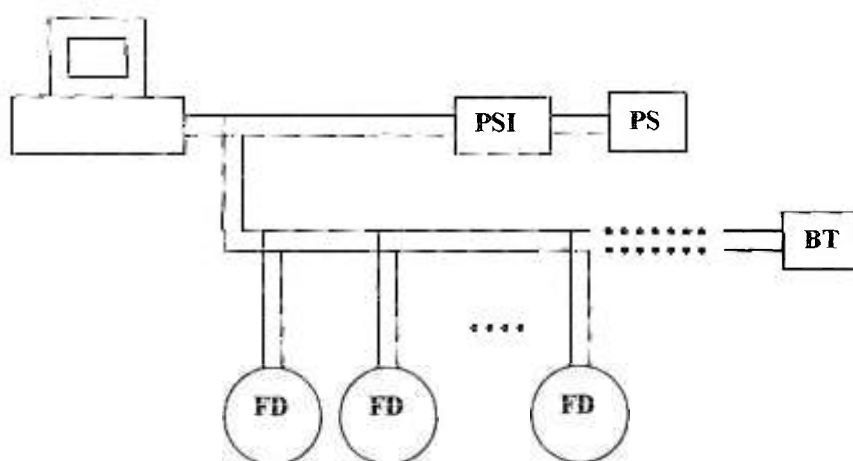


Figura 29: Topologia em barramento.

A topologia em barramento tem como característica a distribuição dos instrumentos de campo diluídas através do barramento propriamente dito. Já a topologia em árvore tem os dispositivos conectados à rede a partir de um único ponto, neste caso, o terminador.

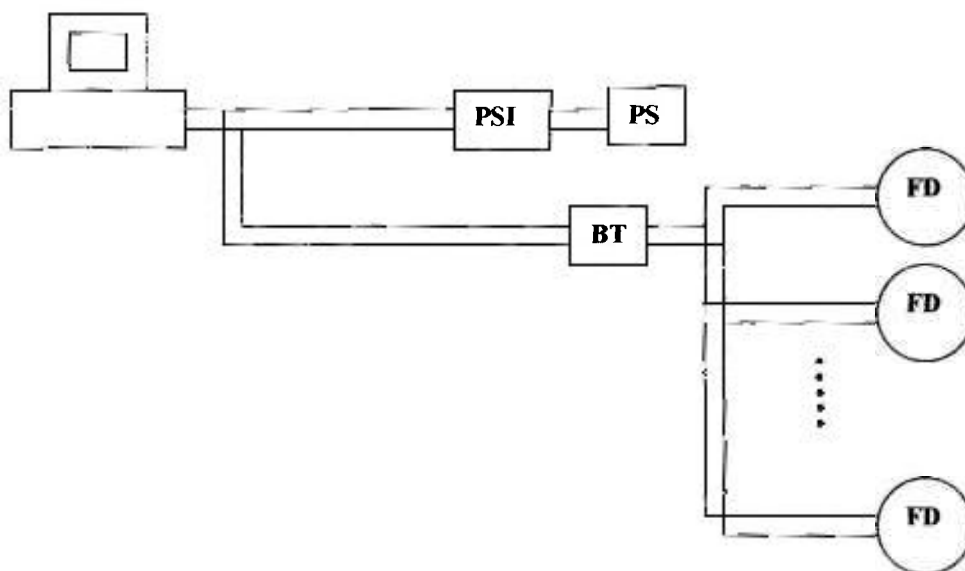


Figura 30: Topologia em árvore.

Duas possibilidades de aplicação da rede "Fieldbus" foram estudadas, a saber: sistema em anel e sistema em U. Ambas aplicações podem utilizar-se das topologias em árvore ou em barramento, visto que as distâncias a serem percorridas pelos cabos não são determinantes na instalação de um irradiador. A diferença existirá para o caso de falhas, razão pela qual a topologia em árvore se mostra a mais segura.

Ao se analisar os dois casos, na topologia em árvore tem-se para cada "ramo" um novo caminho de comunicação, ao contrário da topologia em barramento que, no mesmo caminho estar-se-á colocando um componente adicional. Para a avaliação de falhas basta que se olhe para o fato de

que essa falha só acontecerá na ocorrência de dois eventos (falha do barramento e do "ramo") para o caso em árvore e uma única no caso de barramento (falha do barramento). Desta maneira, a segurança, atribui-se a escolha dessa topologia em árvore.

6.3 Sistemas de aplicação da rede "Fieldbus"

6.3.1 Sistema em anel

Partindo-se da premissa de redundância, o primeiro sistema que aparece é aquele fechado em formato de um anel, onde a ruptura na rede não prejudicaria o trânsito de dados, permanecendo a comunicação com o computador por um dos lados do anel rompido.

Duas fontes de alimentação e duas impedâncias de fonte são colocadas de forma a ter-se a redundância de ambos componentes. De maneira análoga os terminadores são duplicados. Assim, para que a rede falhe é necessária a falha de dois componentes "gêmeos".

A formação em anel traz a vantagem de ter-se apenas uma placa PCI - "process control interface" e uma rede física intrinsecamente redundante, porém nesta configuração existe uma susceptibilidade a ruídos induzidos por interferência eletromagnética quando da ruptura do anel, visto que estará configurada uma antena. Tais ruídos podem vir a comprometer a comunicação da rede se estes forem de grande intensidade dependendo única e exclusivamente do ambiente eletromagnético em que esteja submetido.

Na Figura 31, a seguir, é mostrado o diagrama da aplicação do sistema em anel com topologia em árvore.

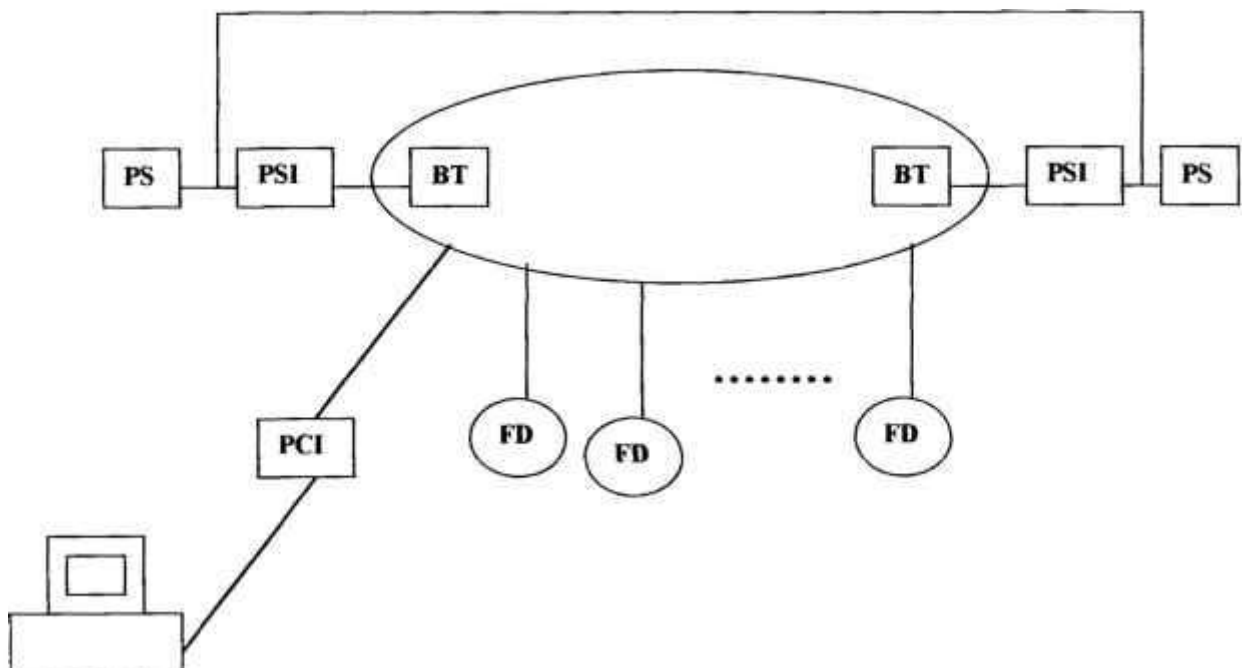


Figura 31: Sistema em anel (topologia em árvore).

A probabilidade de falha, que compreende neste caso a falha das duas fontes de alimentação, dos dois ramais do "Fieldbus" de comunicação, além de outros itens comuns (com relação à falha) ao sistema em U, calculada de acordo com os procedimentos que serão vistos a seguir no item 6.5, é de

$$F = 0,008 \text{ ou } 0,8\%.$$

6.3.1 Sistema em U

O sistema em U apresenta a vantagem de não ter susceptibilidade a interferências eletromagnéticas no caso de ruptura da rede, pois não estará, caso isto ocorra, configurada uma antena. A redundância de fontes e terminadores ocorre da mesma forma que no sistema em anel.

A diferença básica, que se caracteriza como desvantagem, é a necessidade de aplicação de duas placas de interface de controle de processo - PCI. Em tese seria possível a utilização de apenas uma placa PCI pois cada uma delas contém quatro canais de comunicação "Fieldbus" que suportam quatro redes. Porém, a configuração de uma única rede em dois canais distintos ocasiona um problema de conflito dado pelo fechamento de uma malha de terra, podendo provocar danos nesta placa.

A Figura 32 mostra o sistema configurado em U com topologia em árvore.

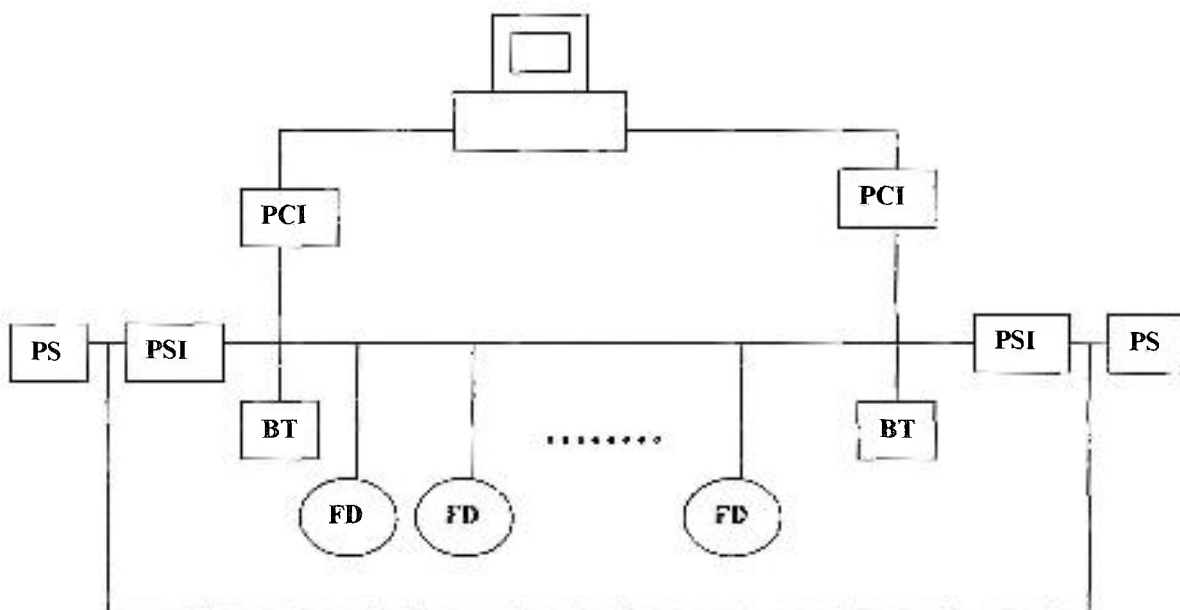


Figura 32: Sistema em U (topologia em árvore).

Neste caso a probabilidade de falhas, ainda de acordo com o item 6.5., é de $F = 0,003$ ou $0,03\%$, isto é, duas ordens de grandeza inferior ao caso anterior. Assim sendo, este é o sistema selecionado.

Cabe salientar que em ambas as configurações os princípios de segurança, descritos anteriormente, redundância, diversidade e independência estão presentes, garantindo um perfil de defesa em profundidade consideravelmente alto.

6.4 Definição da configuração

Pelas razões apresentadas optou-se pela formação da rede em U, onde existe redundância efetiva (PS+PSI+BT+PCI) e a partir daí a configuração final da rede mostrada na Figura 33, onde, TT referem-se a transmissores de temperatura, IF adaptador de corrente/"fieldbus" e DF adaptadores de variáveis digitais/"fieldbus". Estes são os elementos anteriormente definidos como de campo, FD.

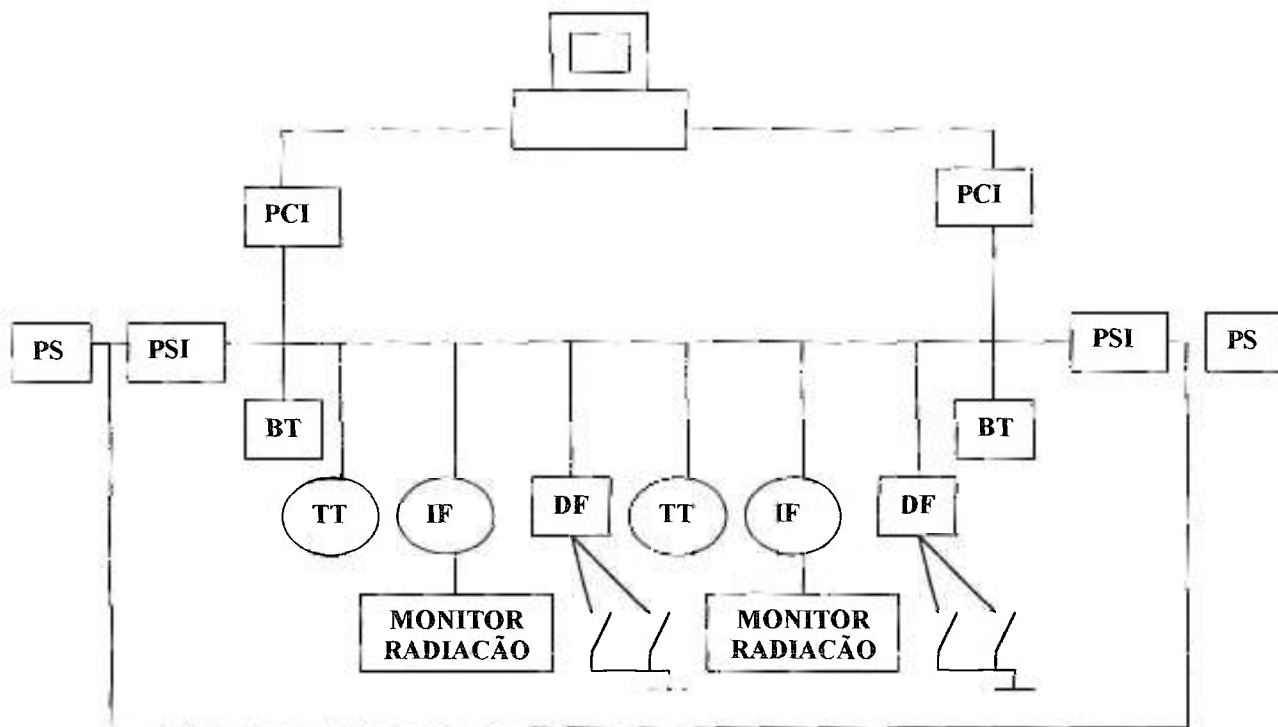


Figura 33: Rede "Fieldbus".

O diagrama unifilar da Figura 33 representa a conexão física de todo o sistema de controle do irradiador, onde os sensores são, temperatura, radiação e chaves indicadoras de condições. Por exemplo, o detector de radiação tem sua medida introduzida no sistema via um adaptador IF para então estar na rede "Fieldbus". Essa rede "Fieldbus" tornará possível a implementação de telas de controle no computador central, onde estará indicado o estado e valor de cada variável do processo.

Definida a configuração e respectiva topologia a ser aplicada, utilizou-se o "software" SYSCON - Configuração de Sistema para a elaboração do sistema de controle²⁹.

O SYSCON é uma ferramenta de "software" desenvolvida para fazer a configuração, manutenção e operação de equipamentos "Fieldbus" por meio de um computador pessoal (tipo PC) e sistema operacional "Windows". Este "software" possui uma Interface Homem-Máquina (MMI - "Man-Machine Interface") amigável, característica do ambiente "Windows", o que propicia uma interação produtiva sem a necessidade prévia de conhecimento ou treinamento deste aplicativo.

No desenvolvimento do sistema selecionado foram elaboradas várias configurações e telas sendo simuladas pelo "software" descrito (SYSCON) quanto a sua lógica, níveis de resposta e alarmes. As configurações dos quadros sinóticos estão baseados no "software" AIMAX e consideram uma planta de um irradiador hipotético. Cinco dessas telas são mostradas nas Figuras 32, 33, 34, 35 e 36.

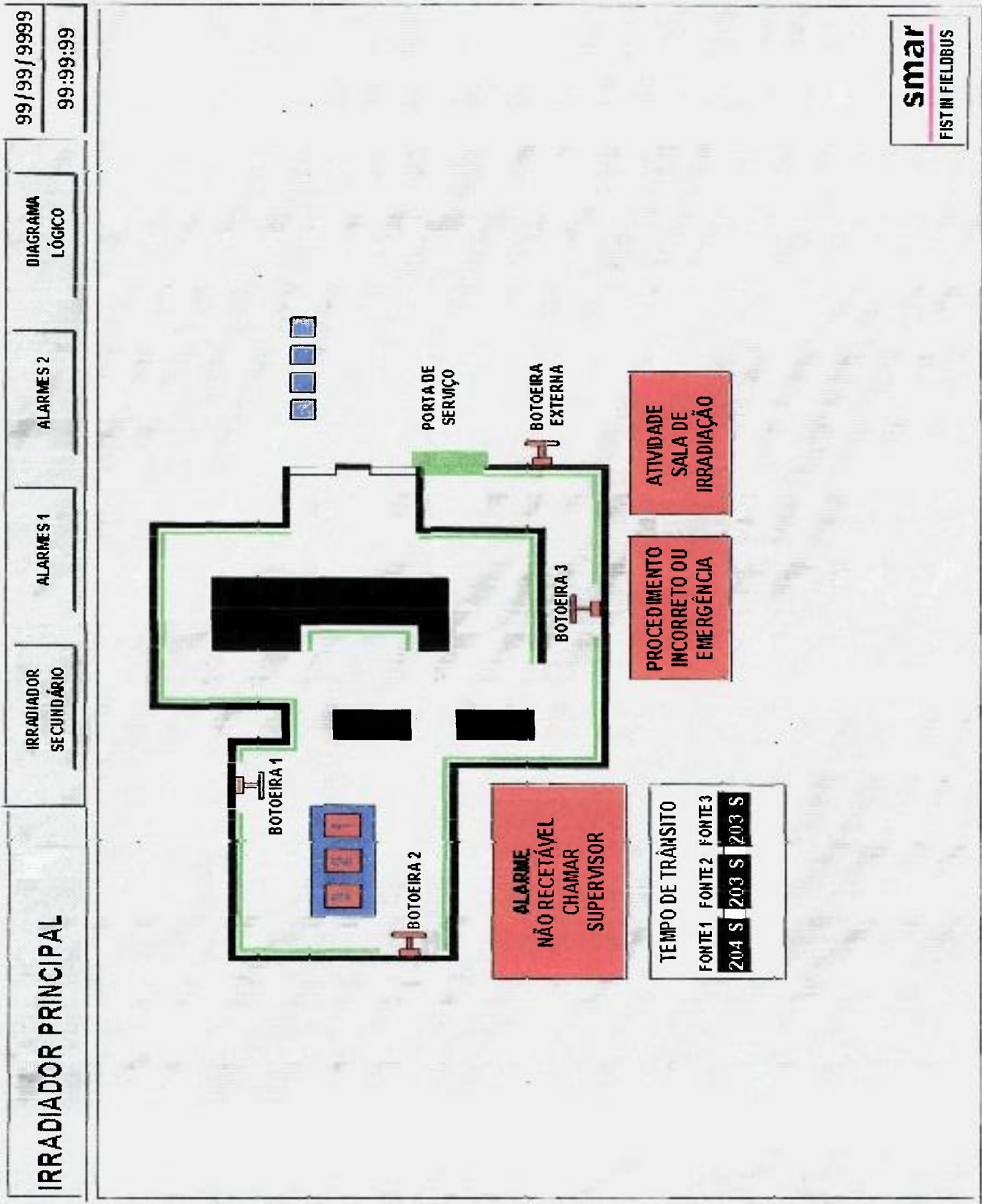


Figura 34: Quadro sinótico principal de operação.

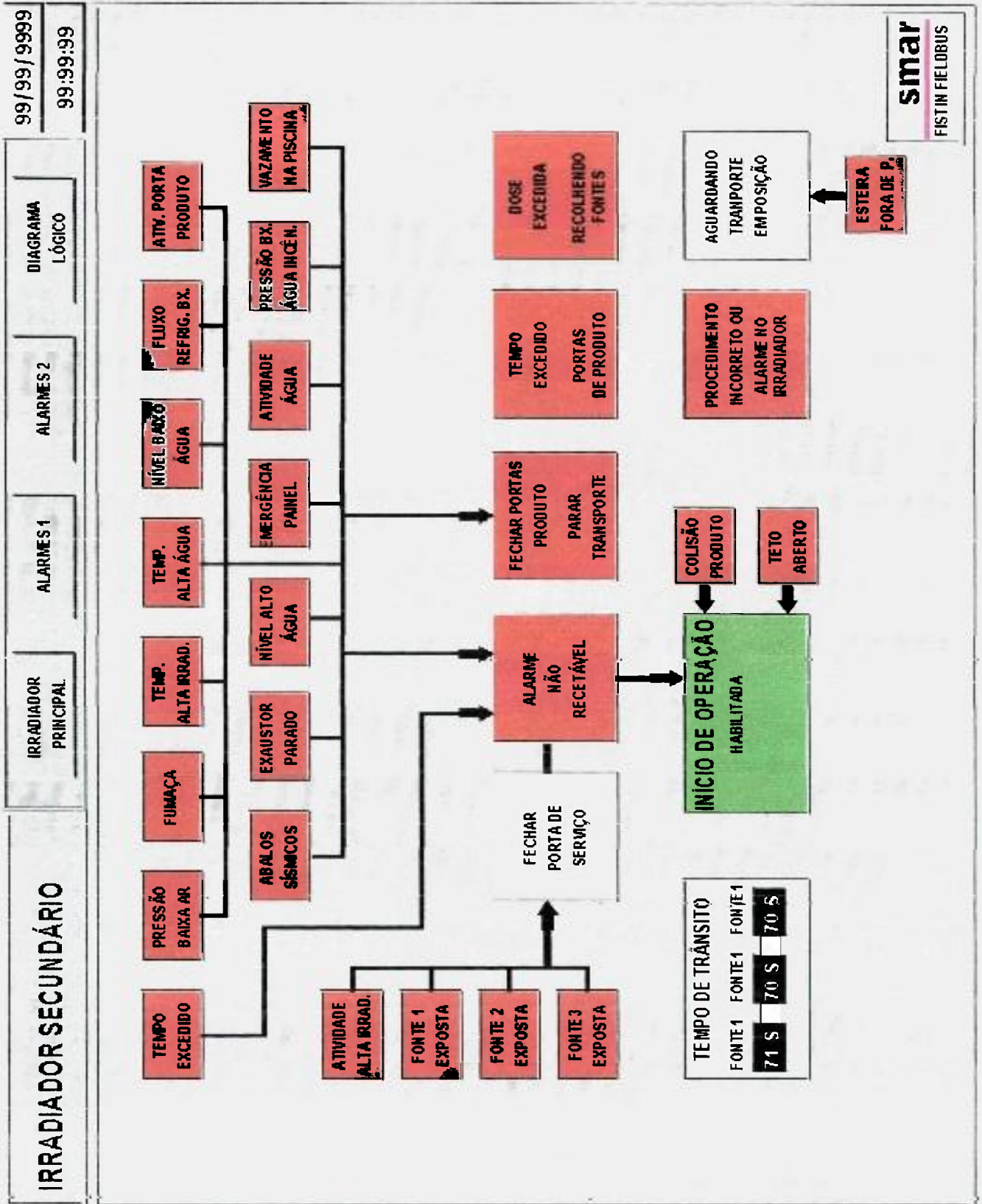


Figura 35: Quadro sinótico secundário de operação.

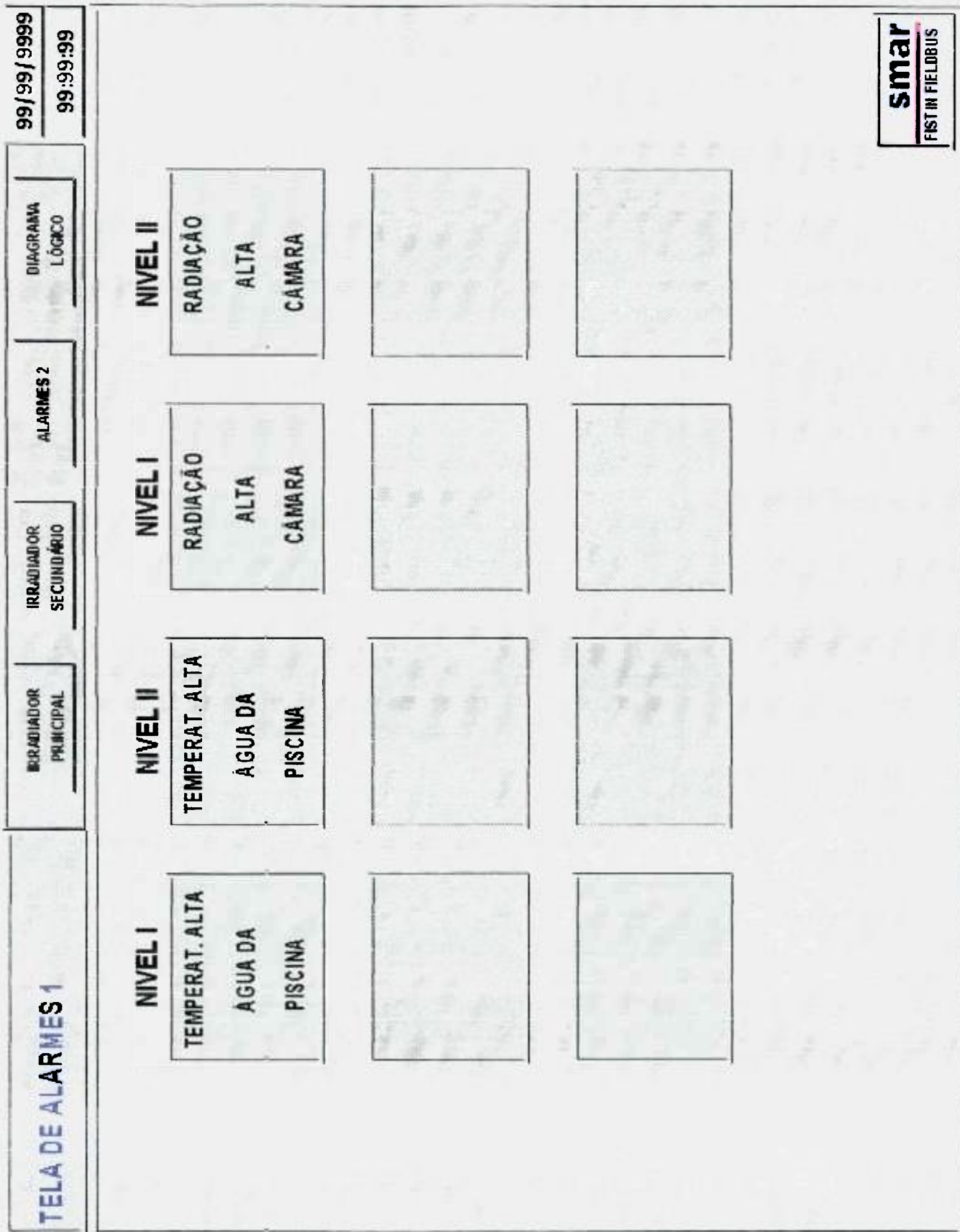


Figura 36: Quadro sinótico 1 de alarmes.

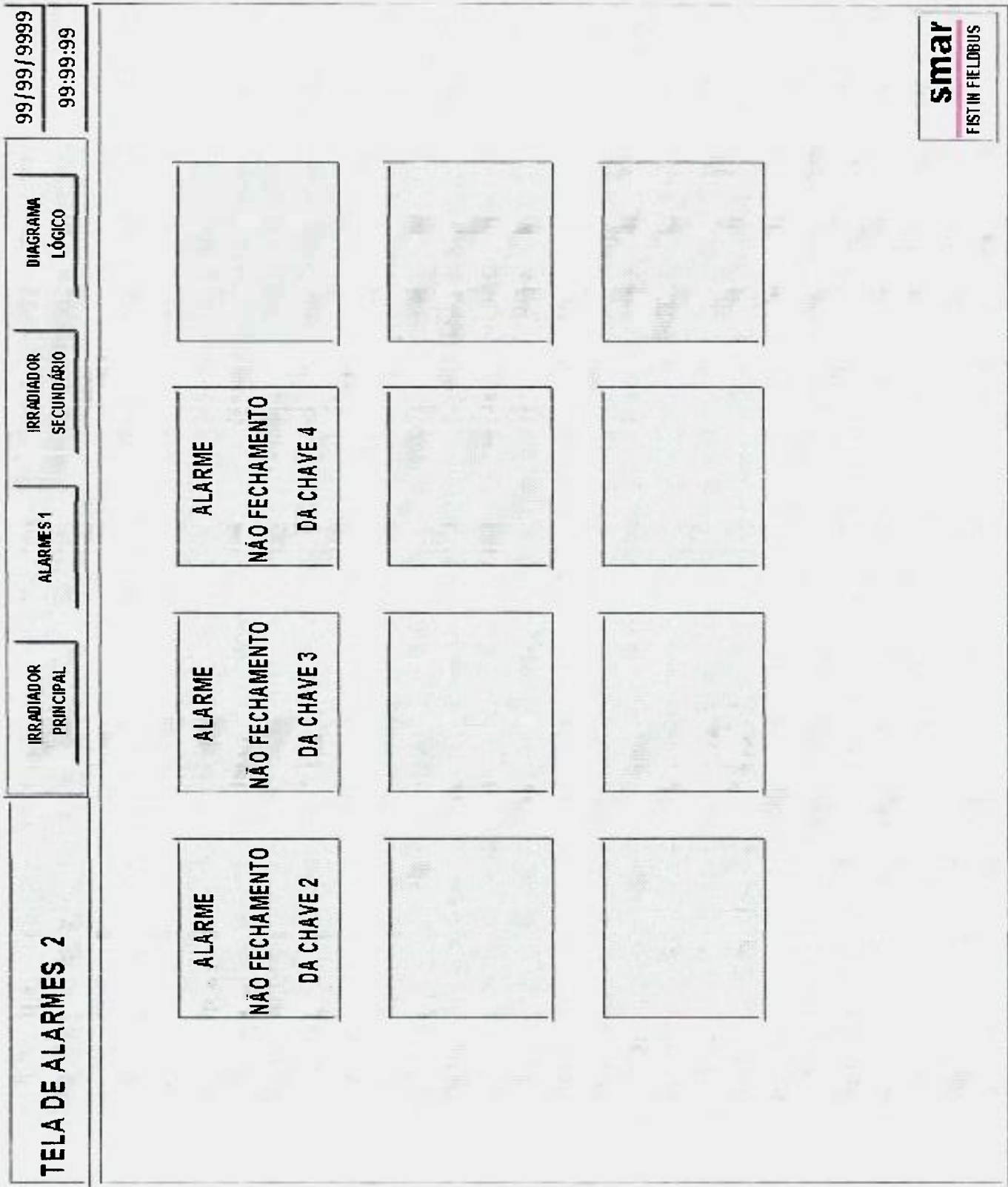


Figura 37: Quadro sinótico 2 de alarmes.

DIAGRAMA LÓGICO

IRRADIADOR PRINCIPAL ALARME 1 ALARME 2 IRRADIADOR SECUNDÁRIO

99/99/9999 99:99:99

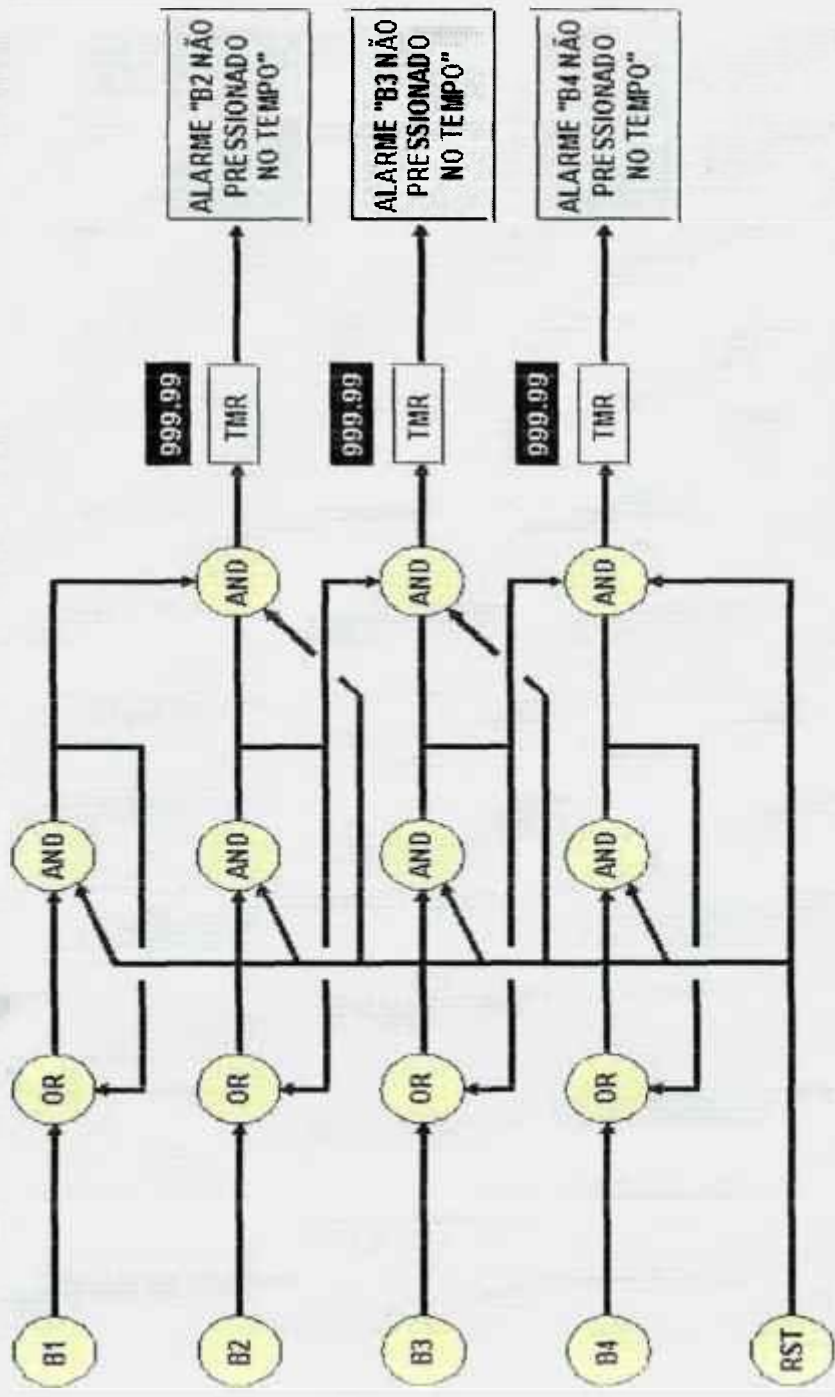


Figura 38: Diagrama de uso dos blocos funcionais.

6.5 Análise de falhas

A maioria das pessoas tem uma clara idéia do que significa ser confiável. Uma pessoa é dita confiável se faz as coisas certas, nas horas certas, trabalha consistentemente e termina suas tarefas nos prazos estipulados. Da mesma forma, uma peça confiável é aquela que é basicamente segura, está dentro das especificações de projeto e tem desempenho sem falhas em um determinado ambiente. Assim, uma máquina de lavar industrial deve ser mais robusta do que uma de uso doméstico.

Deve-se entender que o mundo real não é perfeito e, portanto, um componente ou equipamento tem uma vida finita e dentro desta, por melhor que seja o produto, uma susceptibilidade a falhas. Pode-se então definir confiabilidade como sendo um valor numérico capaz de expressar a probabilidade de um determinado item falhar trabalhando nas condições previstas. Assim, se este valor for 1 (100%) esse equipamento não falhará naquele período, se no entanto estiver entre 0 e 1 (0% e 100% respectivamente) significa que esta é a possibilidade (chance) desse equipamento falhar. Caso seja 0 (ou 0%) esse equipamento certamente falhará no período estipulado.

A confiabilidade está diretamente associada a economia, responsabilidade e, fundamentalmente, a segurança. Se, por suposição, um determinado equipamento tem confiabilidade 1, estar-se-á dizendo que ele não falha, logo é seguro e não colocará em risco nenhuma vida humana, ou meio ambiente, nem ao menos à instalação no qual está aplicado. Essa confiabilidade é o inverso da probabilidade de falhas.

Em suma, confiabilidade é a probabilidade que um componente, equipamento ou sistema desempenhará suas atividades sem falhas no tempo especificado quando operado corretamente dentro do ambiente sugerido.

Entre outros, um método para se determinar a confiabilidade de um processo, onde existam vários sistemas diferentes e conseqüentemente com diferenças nos modos de falhas, é a árvore de falhas. Tal análise permite identificar todas as possíveis causas (falhas de componentes ou outros eventos, agindo individualmente ou em conjunção) de uma falha no sistema e das bases para que se calcule a probabilidade de ocorrência de cada modo de falha.

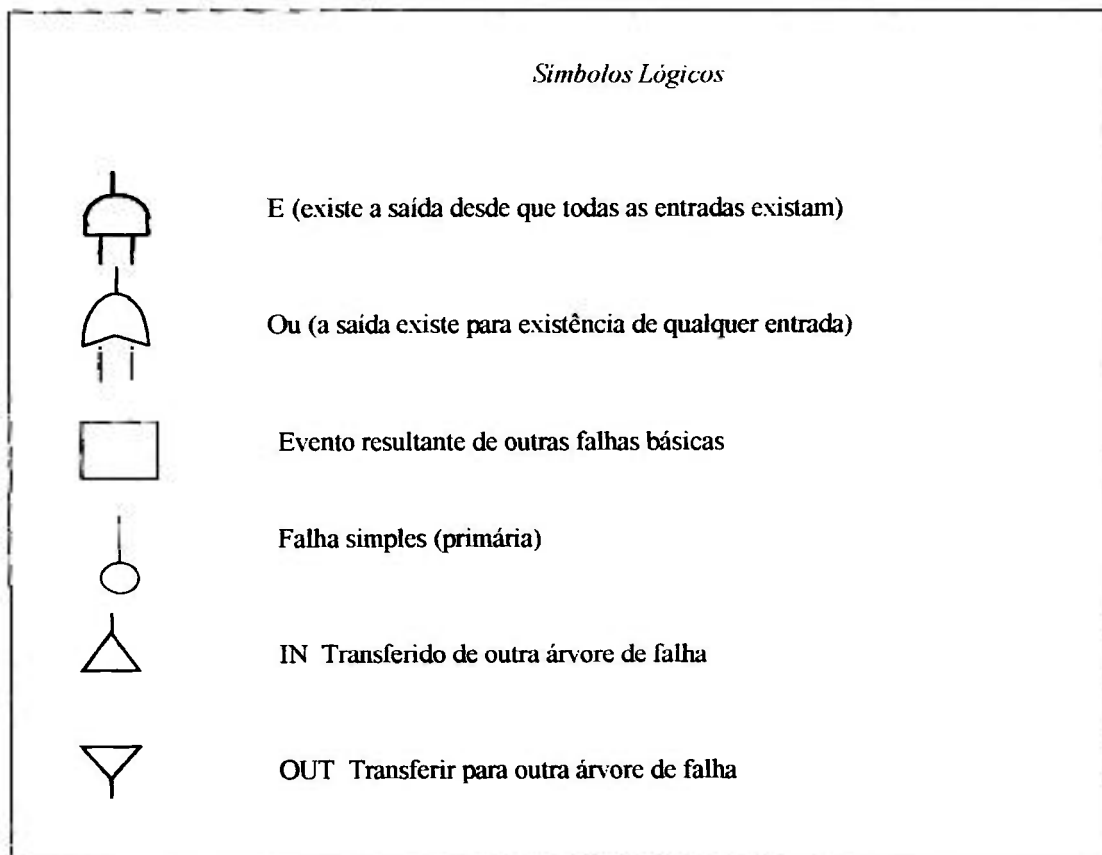


Figura 39: Símbolos lógicos para representação em árvores de falha.

Uma árvore de falhas mostra, na forma gráfica, a relação lógica entre um modo de falha maior ("top event") e as causas dessa falha ("prime event"), usando conectores "E" e "OU". Uma porta "E" denota que todos os eventos da entrada devem ocorrer para que ocorra o evento de saída e a porta "OU" significa que, basta uma das entradas estar presente para que seja verdadeira sua saída. Círculos são usados para representar uma causa básica de falha ("prime event"). Tais símbolos lógicos estão mostrados na Figura 39. Aqui é

necessário definir-se MTBF ("minimum time between fails" ou tempo mínimo entre falhas) que é o período estimado entre duas falhas consecutivas e pode ser determinado por T/x onde T é o período transcorrido dentro do qual ocorreram x falhas.

A probabilidade de uma falha básica ocorrer pode ser descrita por:

$$F = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

onde, t é o número de horas entre manutenções; λ é a taxa de falhas estimada e igual a x/T ou $1/MTBF$; x é o número de falhas ocorridas no período T e $MTBF$ o menor tempo entre duas falhas consecutivas ("minimum time between fails").

Considere o exemplo de um subsistema dado pela árvore de falhas da Figura 40 onde os valores de λ foram obtidos do OREDA Handbook³⁰ e estão expressos em falhas por hora (FPH).

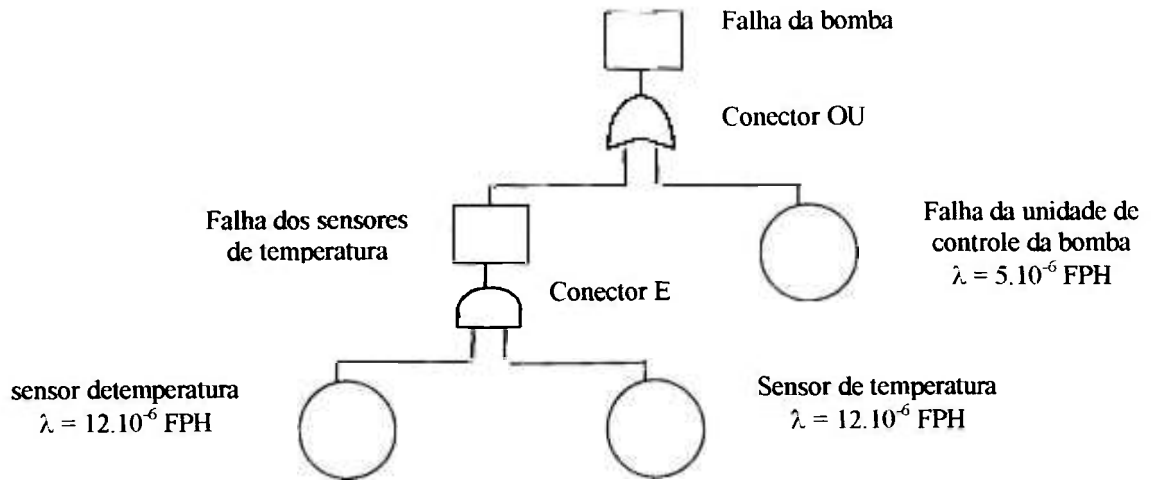


Figura 40: Árvore de falhas de um subsistema de controle de temperatura.

Assim, a probabilidade dos sensores de temperatura falharem dentro do período de um mês (30 dias com 24 horas), aplicando-se a expressão (1), é:

$$F = (1 - e^{-12.10E-6.24.30}) \cdot (1 - e^{-12.10E-6.24.30})$$

ou, simplesmente,

$$F = (1 - e^{-12.10E-6.24.30})^2$$

$$F = 7,401.10^{-5} \text{ ou } 0,007401\%$$

E, por fim, pode-se calcular a probabilidade da bomba falhar:

$$F = 7,401.10^{-5} + (1 - e^{-5.10E-6.24.30})$$

$$F = 3,667.10^{-3} \text{ ou } 0,3667\%$$

Isto significa que a bomba pode falhar se, o sensor de temperatura 1 falhar e o sensor de temperatura 2 falhar ou a unidade de controle da bomba falhar, e isto é igual a 0,3667% para o período de um mês.

Considerando-se uma parte do sistema "Fieldbus" utilizado, tem-se a árvore de falhas mostrada na Figura 41, e as probabilidades dessas ocorrerem em um período de trinta dias:

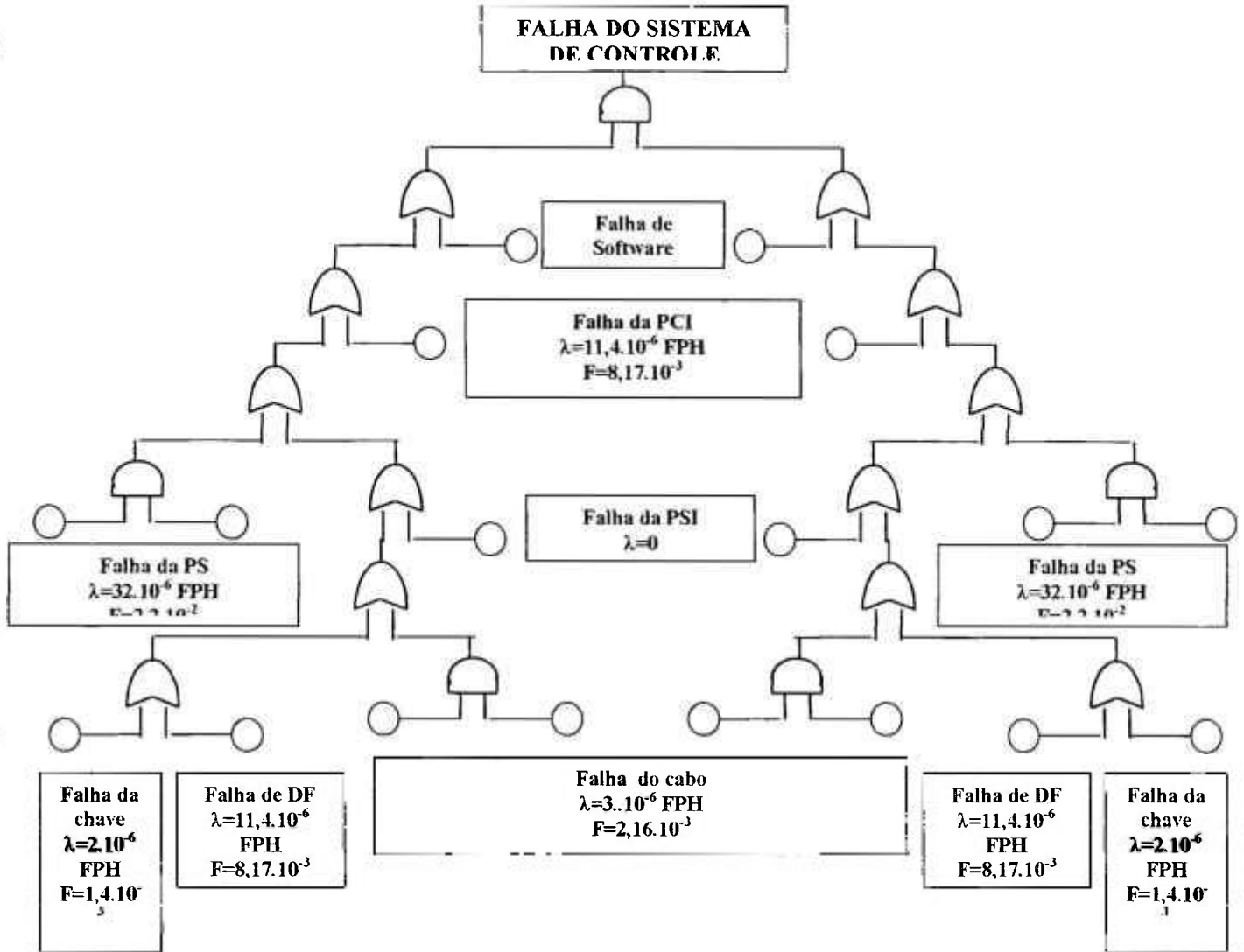


Figura 41: Árvore de falhas de um sistema "Fieldbus" para o ramal dos interruptores.

Desta forma, a probabilidade de que o sistema mostrado apresente falhas é igual a 0,0003, ou 0,03% no período especificado.

A topologia adotada permite que o sistema apresente falha apenas se as duas fontes de alimentação falharem ou houver falha em dois cabos, ou seja, o sistema em anel introduz um decréscimo na probabilidade de falhas devido à redundância da fonte de alimentação. Caso isso não acontecesse, a probabilidade de falha subiria de 0,0003 para 0,0019, isto é, de um fator de aproximadamente 60, para o período escolhido de trinta dias.

Se comparado com relês, no mesmo período considerado, tem-se a Árvore de Falhas mostrada na Figura 42.

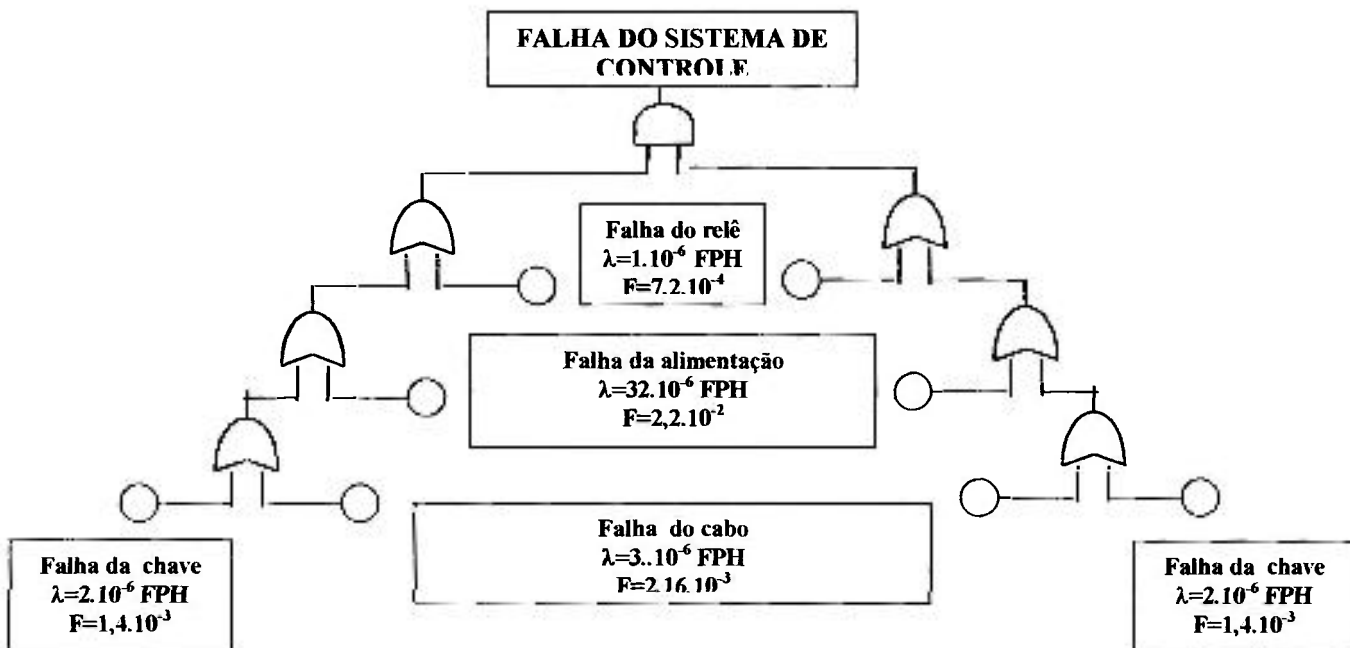


Figura 42: Árvore de falhas de um sistema com relês para o ramal dos interruptores.

Observe-se que esta situação considera apenas um relê e um cabo. Se supor-se que o número de relês é numericamente quatro, tem-se falha igual a $F = 0,0008$.

Partindo-se de uma árvore de falhas baseada em Controladores Lógicos Programáveis (Figura 43) e idêntico período de trinta dias para se fazer a devida comparação.

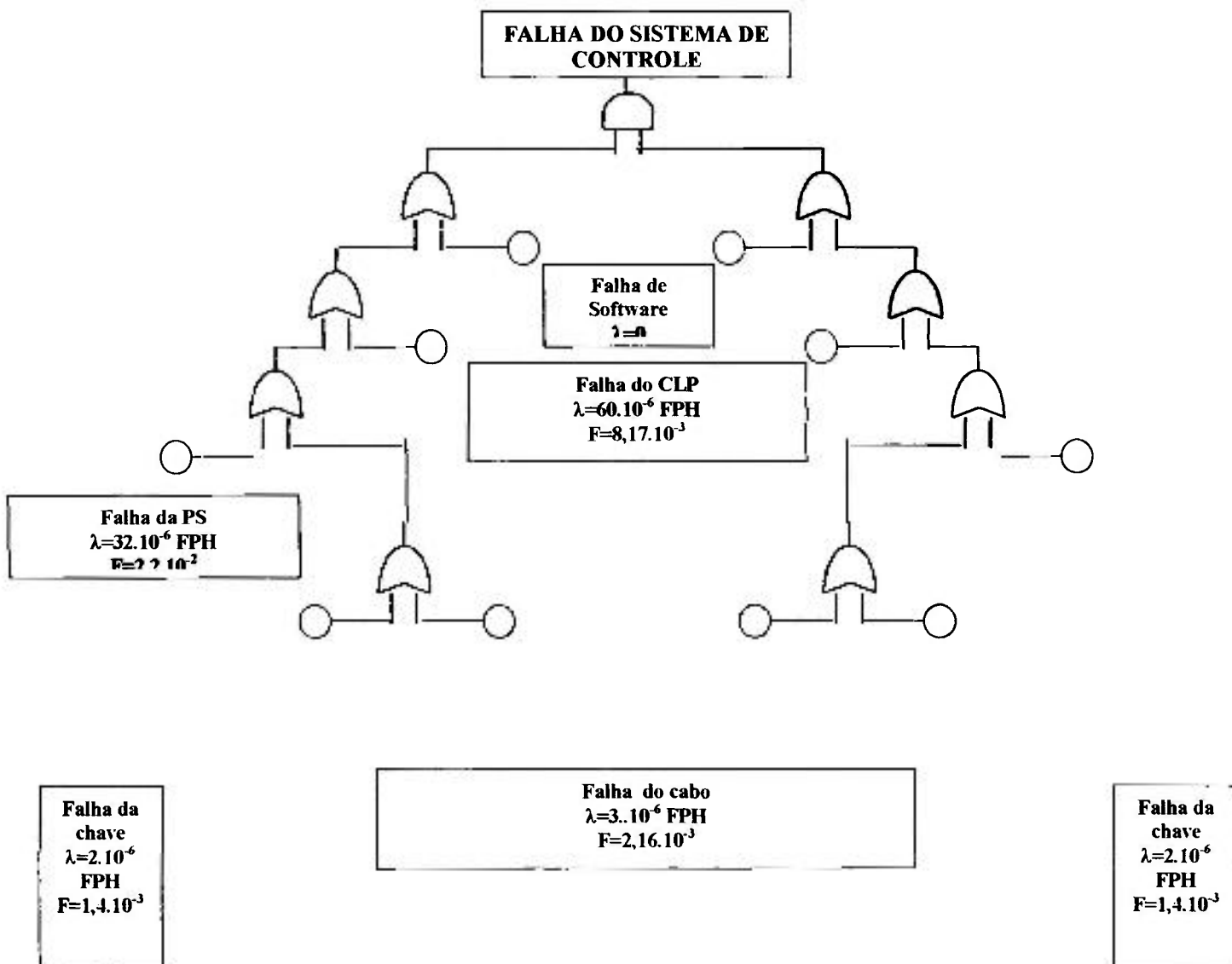


Figura 43: Árvore de falhas de um sistema CLP para o ramal dos interruptores.

No caso de um sistema híbrido (CLP com relês) e na melhor hipótese, ou seja, um único relê, tem-se em trinta dias uma probabilidade de falhas de 0,0018.

Observe-se que admitiu-se que, para o "Fieldbus" (PCI e DF) a taxa de falhas é de uma a cada dez anos (na literatura¹⁴ sistemas eletrônicos equivalentes como conversores eletrônicos tem taxa de falhas de $10 \cdot 10^{-6}$ FPH enquanto o adotado resulta em $11,4 \cdot 10^{-6}$ FPH), a impedância da fonte de alimentação PSI não falha pois compõe-se de apenas componentes eletrônicos passivos (resistores e capacitores) e os "softwares" também não falham. Esta última também foi aplicada ao caso dos CLP. Todos estes, são considerados no caso de trinta dias, e, esse tempo, quando de sua seleção, deve levar em consideração a periodicidade da manutenção preventiva. Neste caso apresentado estar-se-ia admitindo que a prevenção ocorre mensalmente, na forma de manutenção.

7 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Por ser o "Fieldbus" uma arquitetura aberta de sistema distribuído, o processamento e um certo grau de decisões são realizados localmente, sem que estas tenham que ser transmitidas à um computador central. Com isto, evita-se o custo de transmissão de dados desnecessários e a conseqüente perda de tempo dessas mesmas transmissões. Porém, a maior redução de custos não está centralizada nesse ponto, a grande vantagem do "Fieldbus", com relação aos custos, está focada na sua instalação e manutenção.

Ao admitir-se uma planta de um irradiador, como o da Figura 44, onde é possível verificar o labirinto que o material a ser irradiado percorrerá, passando pela câmara de irradiação e então dirigindo-se à saída. Note-se que as distâncias não são grandes, e portanto a instalação de um sensor através do sistema convencional, como um interruptor por exemplo, não requer grandes quantidades de cabos elétricos. Porém para cada sensor é necessário essa quantidade e o total de cabos elétricos será a somatória de todas as parcelas de cada sensor.



Figura 44: Planta baixa de um irradiador de ⁶⁰Co.

Uma instalação desse tipo e porte consome uma quantidade da ordem de 8.000m de cabos elétricos. Se o sistema adotado é o "Fieldbus", um único par de fios será lançado na instalação de forma que, grosseiramente, neste único lance de cabo estarão conectados todos os sensores do processo. Neste caso, a redução de quantidade, e também custo, de cabos é incontestável e significativa.

Os instrumentos de campo, como um transmissor de temperatura, custa em torno de US\$ 600,00 para aplicações em sistemas convencionais e US\$ 900,00 para "Fieldbus". Com a tecnologia ora estudada, "Fieldbus, os sinais advindos dos monitores de radiação devem passar por um adaptador, conforme descrito em capítulo anterior, o IF, de corrente em "Fieldbus", o que não se faz necessário para os sistemas convencionais que aceitariam a conexão direta desse instrumento, e o custo disso é de, aproximadamente, US\$ 650,00. A placa de comunicação com o computador, PCI, tem um custo de US\$ 1800,00 e o "software" SYSCON aproximadamente US\$ 2000,00.


Os sistemas supervisórios, que envolvem sistemas de computação e licença do uso de "softwares" têm valores de mesma ordem de grandeza a agregar, pois em ambas as aplicações tais sistemas se equiparam.

Na instalação, o custo dos cabos lançados diminui drasticamente, visto que apenas um par de fios (trançados, ou qualquer outro tipo) é utilizado para interligar todos os equipamentos em rede. É fácil visualizar-se isto quando comparamos com uma rede de computadores. Qual seria o custo de ter-se para cada estação de trabalho um par de fios saindo do servidor? Desta forma, para a instalação em lide, haverá uma redução do custo de investimento em automação, pois esta instalação é de pequeno porte e mesmo que os equipamentos tenham seus preços majorados, com relação aos sistemas convencionais, a redução do custo dos cabos compensa este acréscimo.

Há de se avaliar ainda as benesses não quantificáveis fisicamente, como é o caso daquelas oriundas de manutenção, diminuição do tempo de execução dessa manutenção e conseqüentemente a redução de seu valor. A possibilidade de se realizar remotamente (quando o sistema estiver interligado a uma rede corporativa como a internet) também reduz custos.

A SMAR²⁰, fabricante brasileiro de equipamentos "Fieldbus", contemporiza que a redução dos custos de uma instalação que se utilize da tecnologia "Fieldbus" atinge um fator cinco, sendo mostrado na Tabela 2 um quadro das estimativas de redução por disciplina do projeto.

Tabela 2: Quadro de redução de custos com "Fieldbus".



Pergunta:	Savings
Onde se obtém maior economia com o uso do FF?	
Engenharia	30 - 60%
Documentação	>30%
Cabos	>80%
Bornes e Terminações	>20%
Instalação e Partida	>30%
Manutenção	Reduz as exigências do serviço de campo

8 CONCLUSÕES

Os resultados da simulação do sistema em U e topologia em árvore demonstram que este sistema permite a redução de componentes se comparado com sistemas baseados em outras tecnologias, por exemplo Controladores Lógicos Programáveis - CLP. Além da redução citada outras também devem ser lembradas, como a de cabos da instalação. Esta última, a redução de cabos, além de significativa, simplifica a instalação, visto que a interligação entre elementos da rede é feita por intermédio de fios trançados, podendo cobrir distâncias de 1000m aproximadamente e velocidade de transmissão de dados de até 2,5Mbit/s. Tais parâmetros estão relacionados ao número de componentes conectados ao sistema, ou seja, inversamente proporcional ao número de instrumentos na rede. Vale a pena lembrar que, para efeitos de relatividade, a rede "Fieldbus" pode ser vista como uma Rede Local, do tipo LAN.

A substituição do par de fios trançados por um outro par de fios não trançados, como o de isolamento mineral aplicado a instalações onde os danos da radiação possam ser significativos, afetará diretamente os parâmetros citados, ficando restrito a distâncias de 90m, ressaltando-se que isto é mais do que razoável, visto que as distâncias em um irradiador não suplantam os 30m, e taxa de transmissão de

31,25kbis/s. Neste caso há de ser avaliado a indução de ruídos num par de fios não trançados.

A redução de cabos é, quantitativamente, a mais significativa vantagem do sistema "Fieldbus" e está diretamente relacionada ao custo da instalação. O valor financeiro reduzido com a instalação do "Fieldbus" atinge, comparado a outros sistemas, segundo a SMAR³², um fator cinco.

Para se comparar os resultados sob o aspecto segurança, comparação esta em relação as tecnologia ditas convencionais, foi elaborado um estudo de análise de risco utilizando-se a metodologia de "Árvore de Falhas". Disto conclui-se que , para o caso estudado, a tecnologia "Fieldbus" é menos susceptível a falhas, demonstrado numericamente pelo método citado.

Ainda com relação a taxa de falhas do sistema "Fieldbus", este é muito recente e, resulta disso o fato de estimar-se o Tempo Mínimo Entre Falhas - MTBF ("Minimum Time Between Failures"), de alguns de seus componentes, em dez anos. A estimativa refere-se apenas e tão somente em não haver dados estatísticos suficientes para se auferir estes índices de falhas e ser compatível com equipamentos eletrônicos similares, conforme DAVISON e HUNSLEY³¹. Mesmos com esses parâmetros conservadores, a malha com o "Fieldbus", proposta e estudada, apresentou uma probabilidade de falhas

menor que as outras, mostrando com isto que, em princípio é um sistema que pode ser utilizado em irradiadores.

A falta de dados históricos da tecnologia discutida, no caso nuclear uma única citação, dificulta a sua aplicação. Para a aplicação no irradiador do IPEN, apresentado no objetivo, há a necessidade de se fazer o estudo detalhado da análise de segurança do projeto real, ou seja, para se aplicar a tecnologia "Fieldbus" é preciso uma autorização da Comissão Nacional de Energia Nuclear que será concedida com base no relatório de segurança da instalação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - OMI, N.M. **Geração de um Aplicativo para Simulação de Doses em Sistemas de Irradiação Gama.** São Paulo: 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

2 - FAVERO, M.S. Liquid Chemical Sterilants in the Hospital. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTION AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings ...** Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 229-244.

3 - PFLUG, I.J. Wet-Heat Sterilization, Including Both the Design of the Process and Equipment used to Sterilize Product. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTION AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings ...** Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 40-89.

4 - DERISIO, R.J. Sterilization Concepts and Methods of Sterilization by the Hospital and Industry. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTION AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings ...** Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 17-31.

5 - CHRISTENSEN, E.A. Gaseous Methods of Sterilization. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTIOIN AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings** ... Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 90-103.

6 - ISHII, K. Sterilization by Filtration. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTIOIN AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings** ... Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 132-139.

7 - Fantinato, V. **Manual de Esterilização e Desinfecção em Odontologia**. 1. ed. São Paulo: Livraria Santos Editora, 1994.

8 - MORRISSEY, R.F.; BECK, J.A. An Overview of Radiation Sterilization Technology. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTIOIN AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings** ... Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 115-131.

9 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Manual on Radiation Sterilization of Medical and Biological Materials**. 1973. (IAEA Technical Reports Series no. 149, Vienna, 1973).

10 - YU-JING, L.; LAN-YING, D.; ZHI-TONG, X.; LIU-SHENG, C. The Application and Monitoring of Ultraviolet Desinfection. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTION AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings ...** Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 292-301.

11 - KHAN, F.M. **The Physics of Radiation Therapy**. 2. ed. USA: Willians & Wilkins, 1994.

12 - BORRELY, S. I. **Tratamento de Efluentes de Origem Doméstica com o Uso de Acelerador de Elétrons**. São Paulo: 1995. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

13 - MUKHERJEE, R. N. Status and Future of Radiation Processing of Medical Devices, Pharmaceuticals, Food and Toiletries. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON THE STERILIZATION OF MEDICAL PRODUCTS DESINFECTION AND PRESERVATION, October 28-31, 1986, Beijing. **Proceedings ...** Canada: Johnson&Johnson, 1986. p. 409-422.

14 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (MG) **A Irradiação de Alimentos: Ficção e Realidade**. Minas Gerais, 1991.

15 - BRASIL NUCLEAR. Rio de Janeiro: ABEN, n. 19, abr/jun. 1999.

16 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Manual of Food Irradiation Dosymetry** 1977. (IAEA Technical Reports Series no. 178, Vienna, 1977).

17 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities**. 1992. (IAEA Safety Series no. 107, Vienna, 1992).

18 - PASSOS, A.P. Fieldbus: A Nova Era da Automação Industrial. **Controle e Instrumentação**, dez., p. 17-21, 1995.

19 - PELUSO, M. Conhecendo o Fieldbus. **Instec**, mai., p. 14-18, 1994.

20 - SMAR **The Fieldbus Book**. [s.l.]: SMAR, 2000.

21 - MITTENDORFER, J.; ZWANZIGER, P. Application of Statistical Methods (SPC) for a Optimized Control of the Irradiation Process of High-Power Semiconductors. **Radiat. Phys. Chem.**, v.57, n. 3-6, p. 629-634, 2000.

22 - FRANCO, L.R.H.R. **Escalonamento de Mensagens para a Comunicação no Fieldbus**. São Paulo: 1998. Tese (Doutoramento) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

23 - MALUF, A.J.; MARTE, C.L.; MARTINI, J.S.C. **Fieldbus e Alternativas tecnológicas em Automação Predial e Residencial**. In: ISA SHOW BRASIL/95, Dezembro 15-17, 1995, São Paulo. **Anais** ... São Paulo: Isa South America Region, 1995.

24 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION **Fieldbus Part 2**. Sep., 1992. (IEC 1158-2).

25 - INTERNATIONAL SOCIETY OF MEASUREMENT AND CONTROL **Physical Layer Specification and Service Definition**. 1993. (ISA-S50-02-1992 Part 2).

26 - FIELDBUS FOUNDATION **Function Blocks - Part 2**. 1995, (Standard FF-891 FB - Part 2).

27 - ISP FOUNDATION **Fieldbus Specification, Function Block Application Process**. 1993. (92-40-01-rev 3.0).

28 - ISP FOUNDATION **Fieldbus Specification, System Architecture**. 1993. (92-01-02-rev 3.0).

29 - SMAR **Manual de Operação e instalação SYSCON - Configurador de Sistema**. v. 1, 1997.

30 - OREDA Offshore Reliability Data Handbook. In: DAVISON, J.; HUNSLEY, C. **The Reliability of Mechanical Systems**. London: MEP, 1995. p. 71-72

31 - DAVISON, J.; HUNSLEY, C. **The Reliability of Mechanical Systems**. 2. ed. London: MEP, 1995.