AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento de uma base de dados computacional para aplicação em Análise
Probabilística de Segurança de reatores nucleares de pesquisa**

VAGNER DOS SANTOS MACEDO

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

**Orientador:
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo
2016**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de uma base de dados computacional para aplicação em Análise
Probabilística de Segurança de reatores nucleares de pesquisa**

VAGNER DOS SANTOS MACEDO

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

Orientador:
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade

#

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2016

Dedico este trabalho à minha família, à
minha esposa Fernanda e aos meus filhos
Mariella e Victor Hugo por terem me
ajudado nessa difícil caminhada.

Agradecimentos

Ao IPEN-CNEN/SP por promover o desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade, pela orientação e suporte prestados durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Patrícia da Silva Pagetti de Oliveira, pela formulação do projeto e pela paciência e presteza durante o desenvolvimento deste trabalho.

A toda minha família e amigos, por acreditarem em mim e me apoiarem até aqui.

*"Quanto mais aprendemos, mais descobrimos o
quanto ainda temos que aprender".*
(José Isaque de Macedo)

**Desenvolvimento de uma base de dados computacional para aplicação em Análise
Probabilística de Segurança de reatores nucleares de pesquisa**

Vagner dos Santos Macedo

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar a base de dados que foi desenvolvida para armazenar dados técnicos e processar dados sobre operação, falha e manutenção de equipamentos dos reatores nucleares de pesquisa localizados no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo - SP. Os dados extraídos desta base poderão ser aplicados na Análise Probabilística de Segurança dos reatores de pesquisa ou em avaliações quantitativas menos complexas relacionadas à segurança, confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade destas instalações. Esta base de dados foi desenvolvida de modo a permitir que as informações nela contidas estejam disponíveis aos usuários da rede corporativa, que é a *intranet* do IPEN. Os profissionais interessados deverão ser devidamente cadastrados pelo administrador do sistema, para que possam efetuar a consulta e/ou o manuseio dos dados. O modelo lógico e físico da base de dados foi representado por um diagrama de entidades e relacionamento e está de acordo com os módulos de segurança instalados na *intranet* do IPEN. O sistema de gerenciamento da base de dados foi desenvolvido com o *MySQL*, o qual utiliza a linguagem *SQL* como interface. A linguagem de programação *PHP* foi usada para permitir o manuseio da base de dados pelo usuário. Ao final deste trabalho, foi gerado um sistema de gerenciamento de base de dados capaz de fornecer as informações de modo otimizado e com bom desempenho.

**Development of a computational database for application in Probabilistic Safety
Analysis of nuclear research reactors**

Vagner dos Santos Macedo

Abstract

The objective of this work is to present the computational database that was developed to store technical information and process data on component operation, failure and maintenance for the nuclear research reactors located at the Nuclear and Energy Research Institute (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN), in São Paulo, Brazil. Data extracted from this database may be applied in the Probabilistic Safety Analysis of these research reactors or in less complex quantitative assessments related to safety, reliability, availability and maintainability of these facilities. This database may be accessed by users of the corporate network, named IPEN intranet. Professionals who require the access to the database must be duly registered by the system administrator, so that they will be able to consult and handle the information. The logical model adopted to represent the database structure is an entity-relationship model, which is in accordance with the protocols installed in IPEN intranet. The open-source relational database management system called MySQL, which is based on the Structured Query Language (SQL), was used in the development of this work. The PHP programming language was adopted to allow users to handle the database. Finally, the main result of this work was the creation a web application for the component reliability database named PSADB, specifically developed for the research reactors of IPEN; furthermore, the database management system provides relevant information efficiently.

Key words: electronic database; specific reliability data; Probabilistic Safety Analysis; nuclear research reactor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Descrição Geral dos Conceitos Usados em Análise Probabilística de Segurança de Instalações Nucleares	1
1.2	Definição dos Principais Conceitos Usados em Análise de Dados de Confiabilidade de Componentes.....	7
1.3	Motivação do trabalho	15
1.4	Objetivo do trabalho	16
1.5	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	Histórico do desenvolvimento de bancos de dados computacionais	18
2.2	Histórico do desenvolvimento de bases de dados de confiabilidade	20
3	METODOLOGIA UTILIZADA	24
3.1	Sistema de Gerenciamento da Base de Dados de Confiabilidade de Componentes dos Reatores Nucleares de Pesquisa do IPEN	24
3.1.1	Definição conceitual do sistema de gerenciamento da base de dados.....	24
3.1.2	Definição do conteúdo e da estrutura da base de dados	25
3.1.2.1	Módulo de Usuários.....	26
3.1.2.2	Módulo de Cadastro de Itens	27
3.1.2.3	Módulo de Dados de Operação de Componentes.....	35
3.1.2.4	Módulo de Dados de Manutenção de Componentes	37
3.1.2.5	Módulo de Dados de Falha de Componentes	39
3.1.2.6	Módulo de Análise dos Dados e Geração de Relatório	44
3.1.3	Desenvolvimento do programa computacional para gerenciamento da base de dados	45
3.2	Levantamento e avaliação dos dados da experiência operacional dos reatores nucleares de pesquisa do IPEN.....	48
3.3	Análise estatística dos dados da experiência operacional para cálculo das estimativas dos parâmetros de confiabilidade dos componentes	51
3.3.1	Estimação da taxa de falha constante – Caso de amostra homogênea	51
3.3.2	Determinação do Intervalo de Confiança (IC) para a taxa de falha constante – Caso de amostra homogênea	52
3.3.3	Estimação da probabilidade de falha na demanda – Caso de amostra homogênea ..	53
3.3.4	Determinação do Intervalo de Confiança (IC) para a probabilidade de falha na demanda – Caso de amostra homogênea	54

3.3.5	Estimação da taxa de falha e da probabilidade de falha na demanda para o caso em que não há ocorrência de falhas do componente no período de tempo observado (“zero falhas” observadas).....	55
3.3.6	Determinação do Intervalo de Confiança para a taxa de falha e para a probabilidade de falha na demanda no caso de “zero falhas” observadas.....	55
3.3.7	Estimação do fator de erro para a taxa de falha e probabilidade de falha na demanda	56
3.3.8	Estimação do tempo médio de reparo (MTTR).....	56
4	DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BASE DE DADOS DE CONFIABILIDADE DE COMPONENTES DOS REATORES NUCLEARES DE PESQUISA DO IPEN	57
4.1	Principais características do sistema PSADB	57
4.2	Cadastro de usuário e atribuição do nível de acesso	58
4.3	Consulta aos dados armazenados em cada módulo.....	59
4.4	Funções que podem ser executadas em cada módulo.....	59
4.5	Geração do relatório contendo estimativas dos parâmetros de confiabilidade de componentes	64
5	CONCLUSÃO.....	69
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PARA CRIAÇÃO DAS TABELAS E OBJETOS DA BASE DE DADOS	71
	GLOSSÁRIO	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

Lista de Tabelas

<i>TABELA 1</i> - Exemplos de valores da distribuição de Qui-Quadrado calculados pela função INV.QUI do programa <i>Microsoft Office Excel</i>	53
<i>TABELA 2</i> - Exemplos de valores da distribuição F de Snedecor calculados pela função INVF do <i>Microsoft Office Excel</i>	55

Lista de Figuras

FIGURA 1 – Níveis de desenvolvimento da Análise Probabilística de Segurança (APS) de uma instalação nuclear	3
FIGURA 2 – Principais atividades realizadas durante o desenvolvimento do Nível 1 da Análise Probabilística de Segurança (APS Nível 1) de uma instalação nuclear	6
FIGURA 3 – Formulário para cadastro de usuários do PSADB.....	27
FIGURA 4 – Formulário para cadastro de uma instalação no PSADB	32
FIGURA 5 – Formulário para cadastro de uma área no PSADB	32
FIGURA 6 – Formulário para cadastro de um sistema no PSADB.....	33
FIGURA 7 – Formulário para cadastro de um subsistema no PSADB	33
FIGURA 8 – Formulário para cadastro de um componente no PSADB	34
FIGURA 9 – Formulário para registro dos dados de operação de um componente no PSADB	37
FIGURA 10 – Formulário para registro dos dados de manutenção de um componente no PSADB	39
FIGURA 11 – Formulário para registro dos dados de falha de um componente da instalação no PSADB	44
FIGURA 12 – Formulário para registro do período de observação a ser considerado na análise dos dados e geração do relatório pelo PSADB	45
FIGURA 13 - Modelo de Entidade e Relacionamento desenvolvido para o PSADB	46
FIGURA 14 - Tela de acesso ao sistema PSADB	57
FIGURA 15 – Tela de escolha do idioma a ser usado no PSADB.	58
FIGURA 16 - Tela de cadastro de usuários no sistema PSADB	59

<i>FIGURA 17</i> – Consulta aos dados armazenados no módulo “Cadastro de Itens” na opção “Instalação”	59
<i>FIGURA 18</i> – Exportação dos dados armazenados no PSADB para arquivos eletrônicos com outros formatos	60
<i>FIGURA 19</i> – Seleção de dados armazenados no PSADB para impressão	62
<i>FIGURA 20</i> – Tela que apresenta a impressão dos dados selecionados	64
<i>FIGURA 21</i> – Seleção da opção “exibir” para um registro armazenado no módulo “Dados de Operação → Componente”	64
<i>FIGURA 22</i> - Relatório de Taxas / Probabilidades de Falha de Componentes	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

APS	Análise Probabilística de Segurança
CEN	Centro de Engenharia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CRPq	Centro do Reator de Pesquisa
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Atômica)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
MER	Modelo de Entidade e Relacionamento
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i> (Tempo Médio entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (Tempo Médio de Reparo)
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i> (originalmente <i>Personal Home Page</i>)
RDBMS	<i>Relational Data Base Management System</i>
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)
U.S.NRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i> (Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos da América)
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WWW	<i>World Wide Web</i> (Rede Mundial de Computadores)

1 Introdução

1.1 Descrição Geral dos Conceitos Usados em Análise Probabilística de Segurança de Instalações Nucleares

A Análise Probabilística de Segurança (APS) consiste em uma avaliação global da segurança de uma instalação nuclear por meio da determinação dos cenários de acidentes que podem levar a danos indesejáveis nesta instalação ou, até mesmo, a um vazamento de radioatividade para o ambiente externo.

A APS se destaca por usar uma abordagem abrangente e estruturada na identificação e avaliação dos possíveis cenários de acidentes e constitui todo um ferramental conceitual e matemático para que o risco associado à operação da instalação nuclear seja estimado.

Os principais objetivos da APS são:

- Avaliar a segurança da instalação e compará-la com metas de segurança estabelecidas previamente;
- Avaliar a segurança da instalação e identificar áreas ou aspectos que podem ser melhorados;
- Avaliar a segurança da instalação para dar suporte à sua operação e manutenção.

Para o desenvolvimento da APS em um escopo completo, são necessárias muitas informações a respeito do projeto e da operação da instalação, além de dados extraídos de estudos de suporte e histórico de falhas e acidentes em instalações similares.

Assim, o conjunto básico de informações requeridas para uma APS é composto por:

- Dados sobre o local da instalação (sítio);
- Descrição e *layout* dos edifícios e dos sistemas da instalação;
- Estudos mecânicos e sísmicos das estruturas, sistemas e componentes da instalação;
- Procedimentos de operação e procedimentos de emergência da instalação;
- Análise de segurança da instalação por meio da abordagem determinística;
- Dados de confiabilidade de equipamentos / componentes da instalação;
- Dados da experiência operacional;
- Estudos fenomenológicos de acidentes severos;
- Análise dos termos fonte (*source terms*);
- Estudos das consequências radiológicas de acidentes.

Além disso, a APS pode ser desenvolvida em três níveis:

- APS Nível 1 – No primeiro nível da APS, são avaliados os cenários que tem origem em um evento iniciador e que podem progredir a um acidente com danos no núcleo do reator devido a uma sucessão de falhas nos sistemas de segurança da instalação e/ou erros do operador na execução de procedimentos operacionais. Na APS Nível 1, a probabilidade do evento indesejável é estimada pela frequência de danos no núcleo do reator. Com base nos resultados desta análise, é possível identificar pontos fortes e deficiências dos sistemas de segurança da instalação e propor melhorias na engenharia destes sistemas e/ou nos procedimentos de operação da instalação.
- APS Nível 2 – O segundo nível da APS é desenvolvido a partir dos resultados obtidos na APS Nível 1 e consiste na avaliação das características do material radioativo que poderá vazar em decorrência de um determinado acidente com danos no núcleo do reator e da probabilidade deste material ser liberado para fora da instalação. O principal resultado da APS Nível 2 é o cálculo dos termos fonte, os quais são agrupados de acordo com os seguintes parâmetros: quantidade de material liberado, duração da liberação e o risco associado a cada radionuclídeo gerado na liberação. Esta análise proporciona um conhecimento adicional sobre a importância dos sistemas de contenção e/ou confinamento da instalação e permite propor melhorias nos procedimentos associados ao gerenciamento de acidentes.
- APS Nível 3 – Neste último nível, desenvolvido a partir dos resultados obtidos na APS Nível 2, são avaliadas as consequências do acidente nuclear para a saúde dos trabalhadores e da população em geral, bem como os riscos ambientais, tais como contaminação do solo, da água e de alimentos.

Na FIGURA 1 é apresentado um diagrama que representa os níveis de desenvolvimento da APS de uma instalação nuclear.

FIGURA 1 – Níveis de desenvolvimento da Análise Probabilística de Segurança (APS) de uma instalação nuclear

Um dos primeiros documentos a apresentar o desenvolvimento de uma APS para as usinas nucleares comerciais americanas com reatores refrigerados a água leve foi o relatório WASH-1400 (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), publicado em 1975 e elaborado por um comitê de especialistas a serviço da Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos da América (*United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC*). Inicialmente, este relatório sofreu várias críticas da comunidade nuclear, mas após o acidente nuclear na usina de Three Mile Island (TMI), em março de 1979, passou a ser uma tradição aplicar este tipo de estudo em avaliações de segurança das plantas nucleares de potência americanas.

Desde a década de 1980, a APS tem sido aprimorada no que diz respeito às suposições adotadas nos modelos, metodologia, cálculos, procedimentos de revisão e objetividade. Organizações internacionais com reconhecida experiência na área nuclear têm publicado normas, guias e documentos técnicos que abordam o desenvolvimento de estudos de APS para instalações com reatores nucleares. Neste sentido, merecem destaque as seguintes publicações:

- Safety Series No 75-INSAG-6, *Probabilistic Safety Assessment*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992a)

- Safety Series No 50-P-4, *Procedures for conducting Probability Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1)*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992b)
- Safety Series No 50-P-8, *Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2)*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1995)
- Safety Series No 50-P-12, *Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 3)*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1996)
- IAEA-TECDOC-400, *Probabilistic Safety Assessments for Research Reactors*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1986)
- IAEA-TECDOC-1144, *Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants for Low Power and Shutdown Modes*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2000)
- Specific Safety Guide No SSG-3, *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2010a)
- Specific Safety Guide No SSG-4, *Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*, (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2010b)
- NUREG/CR-2300, *PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants*, (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1983)
- NUREG/CR-2815, *Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide*, (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1984)
- OECD-GD(97)198, *Level 2 PSA Methodology and Severe Accident Management*, (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 1997).

Em geral, o escopo mínimo de um estudo de APS é o desenvolvimento da APS Nível 1, considerando os eventos iniciadores de acidente que podem ocorrer durante a operação do reator em plena potência e que estejam associados às falhas no funcionamento dos sistemas

internos à instalação. Este estudo envolve a aplicação de algumas técnicas de análise e a realização das seguintes atividades:

- Levantamento dos dados de projetos e demais informações sobre a instalação;
- Identificação e análise dos eventos iniciadores de acidente na instalação;
- Determinação das funções que devem ser realizadas, envolvendo sistemas de segurança e ações do operador, para impedir que um determinado evento iniciador evolua para um acidente na instalação;
- Análise da interdependência entre sistemas da instalação, os quais devem atuar para impedir a evolução de um cenário acidental (sistemas de segurança x sistemas de segurança, sistemas de segurança x sistemas de suporte e sistemas de suporte x sistemas de suporte);
- Análise da interdependência entre sistemas de segurança e ações do operador;
- Análise das falhas de causa comum envolvendo eventos iniciadores, falhas de equipamentos, erros do operador, etc.;
- Determinação da evolução da sequência de eventos na instalação, a partir de um determinado evento iniciador de acidente, por meio da aplicação da técnica de Árvores de Eventos;
- Análise de confiabilidade dos sistemas de segurança e sistemas de suporte requeridos durante a evolução dos cenários acidentais por meio da aplicação da técnica de Árvores de Falhas;
- Análise das probabilidades de erros humanos durante a operação da instalação e durante a evolução dos cenários acidentais (Análise de Confiabilidade Humana);
- Quantificação das árvores de falhas e árvores de eventos para obtenção da probabilidade de ocorrência de cada cenário acidental;
- Cálculo da estimativa da frequência de danos no núcleo do reator;
- Análise estatística das incertezas envolvidas nos resultados quantitativos da APS;
- Cálculo de medidas de importância para os eventos que mais contribuem para a ocorrência de um acidente com danos do núcleo do reator;
- Análise de sensibilidade dos resultados obtidos na APS.

Na FIGURA 2 é apresentado um fluxograma esquemático das principais tarefas que devem ser realizadas durante o desenvolvimento da APS Nível 1.

- Dados sobre falhas dependentes (inclui dados sobre falhas de causa comum de componentes)
- Probabilidades de erros humanos.

Em geral, dados genéricos publicados na literatura especializada são usados para uma quantificação preliminar dos modelos desenvolvidos na APS de uma instalação nuclear, principalmente quando esta se encontra em fase de projeto. A partir do momento em que a instalação é comissionada e entra em operação, é desejável que dados específicos passem a ser coletados e sua própria base de dados seja formada. Neste caso, as incertezas em relação aos dados de entrada que serão usados na APS podem ser quantificadas e receber um tratamento estatístico para serem apresentadas com os resultados finais do estudo.

Além de servirem de entrada para a quantificação dos modelos da APS, os dados coletados a partir da experiência operacional de uma instalação nuclear podem ser usados em vários programas de melhoria da segurança, além de permitir o gerenciamento dos principais parâmetros de desempenho tais como confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade da instalação.

1.2 Definição dos Principais Conceitos Usados em Análise de Dados de Confiabilidade de Componentes

Para um melhor entendimento da análise estatística que deverá ser realizada com os dados específicos obtidos a partir da experiência operacional dos reatores nucleares de pesquisa estudados neste trabalho, alguns conceitos importantes precisam ser definidos.

Dentre as informações que compõem o conjunto de dados de confiabilidade/disponibilidade de componentes estão incluídas as ocorrências de falhas destes componentes. Assim, é importante explicar que as falhas de componentes podem ser agrupadas em duas categorias principais: falhas relacionadas ao tempo de operação (ou tempo de observação) e falhas relacionadas à demanda do componente. As falhas que ocorrem durante o período em que o componente se encontra em operação contínua na instalação devem ser classificadas como relacionadas ao tempo de operação (ou tempo de observação). Uma falha revelada no instante em que o componente é colocado em serviço após ter permanecido desligado ou em modo de espera (*standby*) deve ser classificada como falha relacionada à demanda. Considerando que um mesmo componente pode operar continuamente durante um período de observação e, em seguida, ser colocado em modo de espera, então este componente está sujeito à ocorrência de falhas relacionadas ao tempo de operação e falhas relacionadas à sua demanda.

Em alguns casos, pode-se efetuar uma análise de causa raiz das falhas de um componente. É possível que o resultado desta análise indique que algumas falhas do componente estão relacionadas ao tempo de operação, mas só foram detectadas quando o componente foi solicitado a entrar em funcionamento após um período em modo de espera. Em algumas situações, é difícil determinar se a falha de um componente em modo de espera se deve ao tempo que permaneceu em espera ou se a falha pode ser atribuída ao estresse aplicado ao componente na sua partida, ou seja, no instante em que é acionado para funcionar novamente. Uma falha relacionada ao tempo para um componente em modo de espera é considerada uma falha em espera (*standby failure*), e uma falha ocorrida durante sua operação contínua é denominada a uma falha em operação (*running failure*). Assim, dois modelos distintos devem ser determinados para que as estimativas das taxas/ probabilidades de falha deste componente sejam calculadas. Para o cálculo da estimativa da taxa de falha em espera de um componente é necessário conhecer, também, a frequência com que o componente é solicitado a funcionar e a frequência de testes / manutenção deste componente, caso aplicável.

Falhas relacionadas ao tempo de operação do componente

A modelagem de falhas relacionadas ao tempo está baseada em conceitos da teoria da confiabilidade. Em geral, os modelos estatísticos usados no tratamento de dados de falhas relacionadas ao tempo são mais complexos do que os de falhas relacionadas à demanda.

Conceito de Taxa de Falha

A função taxa de falha é usada para representar a probabilidade de que um componente que tenha sobrevivido sem falhar até o instante t apresente uma falha durante a próxima unidade de tempo Δt . Se o componente estiver se deteriorando, esta probabilidade irá aumentar com o tempo. Portanto, a função taxa de falha, em geral, é uma função dependente do tempo de vida (ou idade) do componente.

Para a representação matemática da função taxa de falha, é necessário definir a variável aleatória T , correspondente ao tempo de falha do componente, isto é, o tempo contado a partir do instante em que o componente é colocado em funcionamento até a ocorrência da primeira falha. A função taxa de falha, $\lambda(t)$, pode ser definida por:

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = \Pr(t < T \leq t + \Delta t / T > t) \quad (1)$$

O lado direito da equação (1) denota “a probabilidade de que o componente irá falhar no intervalo de tempo $(t, t + \Delta t)$, dado que o componente ainda está funcionando no instante t ” ou, em outras palavras, “a probabilidade de que um componente que atingiu a idade t falhará

no próximo intervalo $(t, t + \Delta t)$ ”. Se Δt for um intervalo de tempo muito pequeno, a seguinte aproximação pode ser considerada precisa para a definição da função taxa de falha:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad t \geq 0 \quad (2)$$

onde $f(t)$ é a função densidade de probabilidade do tempo de falha do componente e $F(t)$ representa a probabilidade de que o componente irá falhar antes do instante t (função de distribuição acumulada calculada no instante t).

Em algumas publicações, a função taxa de falha é denominada taxa de risco. A probabilidade de que o componente não falhará até o instante t , que é dada por $1 - F(t)$, é chamada a função de confiabilidade do componente calculada no instante t . Isto significa que:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

e

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad t \geq 0 \quad (4)$$

É comum considerar que a vida operacional de um componente pode ser dividida em três fases distintas: a fase de mortalidade inicial ou mortalidade infantil (*burn-in*), a fase de vida útil e a fase de desgaste (*wear-out*). A função taxa de falha pode apresentar formas diferentes nestas três fases. A função taxa de falha pode seguir a clássica curva da banheira, ou seja, decrescente na fase de mortalidade infantil, constante na fase de vida útil e crescente na fase de desgaste. Em geral, a curva da banheira é um modelo realista para a função taxa de falha de equipamentos mecânicos.

Outras definições relacionadas com o conceito de taxa de falha são:

a) a taxa de falha correspondente ao modo de falha denominado “todos os modos” é a soma das taxas de falha de uma combinação de modos de falha relevantes do componente;

b) dois tipos de taxas de falhas relacionadas ao tempo de operação do componente podem ser definidos:

taxa de falha em operação: a taxa de falha para um componente em operação contínua é o número esperado de falhas por unidade de tempo (falhas por hora ou por ano), enquanto o componente estiver em uso; e

taxa de falha em espera: a taxa de falha em espera é o número esperado de falhas por unidade de tempo para componentes que estiverem em modo de espera até serem testados ou solicitados para funcionar. Na prática, a estimativa da taxa de falha em espera é muito difícil de ser feita com base nos dados da experiência operacional do componente.

c) Em geral, a taxa de falha observada de um componente é estimada por meio da taxa de ocorrência de falhas, isto é, calculando-se a razão entre o número de falhas e o tempo total de operação do componente. Assim, a taxa de falha observada representa a taxa com que as falhas ocorrem no componente, considerando que este componente pode estar sujeito a atividades de manutenção preventiva. A taxa de falha real seria a taxa livre da influência das atividades de manutenção preventiva. No entanto, no processamento dos dados da experiência operacional é comum não se fazer distinção entre estes dois conceitos (taxa de falha observada e taxa de falha real), assumindo-se que a taxa de ocorrência de falhas críticas não é influenciada pela taxa de ocorrência de manutenções preventivas (COOKE et al., 1995).

Falhas relacionadas à demanda do componente

A falha na demanda é relevante para componentes que funcionam em ciclos ou em determinados modos de operação da instalação. A falha na demanda pode ocorrer quando o componente é solicitado a entrar em operação (falha na partida) ou mudar de estado para atuar em alguma outra função (falha para mudar de estado ou mudar de função).

Componentes não-deterioráveis: Quando os componentes sujeitos à demanda não se deterioram durante o modo de espera, a análise estatística dos dados de falha é bastante simples. Neste caso, cada demanda pode ser modelada como um arremesso de uma moeda. Supõe-se que, para cada tipo de componente, as probabilidades de falha na demanda são independentes e idênticas. Se a probabilidade de falha na demanda é denotada por p , então a probabilidade de se observar n_d falhas em d demandas é obtida pela distribuição binomial:

$$\Pr(n_d \text{ falhas em } d \text{ demandas} / p) = \binom{d}{n_d} p^{n_d} (1 - p)^{d-n_d} \quad n_d = 0, 1, \dots, d \quad (5)$$

Componentes deterioráveis: Alguns mecanismos de falha, em particular aqueles associados a desgaste, são desativados durante o período em que o componente permanece em modo de espera. Outros mecanismos, em especial aqueles associados a mudanças ambientais de temperatura, corrosão, oxidação ou fragilização continuam agindo sobre o componente durante o modo de espera. Por este motivo, os componentes em modo de espera são geralmente submetidos à manutenção. Para componentes em modo de espera, a probabilidade de falha na demanda é modelada como sendo a indisponibilidade no instante t ; isto é, a probabilidade de que o componente será encontrado em um estado de falha no instante t . Se t estiver distante do instante inicial de operação do componente, é comum usar a indisponibilidade em estado estacionário, que é a indisponibilidade média no limite ($t \rightarrow \infty$), como medida equivalente da probabilidade de falha na demanda.

A probabilidade de falha na demanda ou indisponibilidade do componente pode ser decomposta em duas parcelas, a saber: a indisponibilidade na demanda, Q_d e a indisponibilidade em modo de espera, Q_s , respectivamente.

A indisponibilidade na demanda é dada por:

$$Q_d = \frac{n_d}{d} \quad (6)$$

onde n_d é o número total de falhas na partida/ falhas para mudar de estado/ falhas para mudar de função após ocorrer uma demanda do componente e d é o número total de partidas/ mudanças de estado/ mudanças de função.

Se o componente se encontra em modo de espera e está sujeito a um regime de manutenção do tipo “teste-substituição”, entende-se que o componente é testado em intervalos regulares de duração τ e se for encontrado em um estado de falha, é substituído imediatamente por um novo componente do mesmo tipo. Se λ_s é a taxa de falha em espera, considerada constante, a probabilidade de falha na demanda (ou indisponibilidade em modo de espera) para demandas uniformemente distribuídas é dada por:

$$Q_s = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_s \tau}}{\lambda_s \tau} \cong \frac{\lambda_s \tau}{2} \quad \lambda_s \tau \leq 0,1 \quad (7)$$

Na prática, no entanto, é raro que as taxas de falha em espera λ_s sejam conhecidas. O fator 2 na equação (7) indica que, em média, o tempo que o componente pode permanecer em estado de falha equivale à metade do intervalo entre demandas/ testes deste componente. As contribuições conjuntas dos dois tipos de indisponibilidade Q_d e Q_s são combinadas para o cálculo da indisponibilidade total Q (falhas na demanda) de um componente em modo de espera.

$$Q = Q_d + Q_s \quad (8)$$

$$Q = \frac{n_d}{d} + \frac{\lambda_s \tau}{2} \quad (9)$$

O resultado acima incorpora o conceito de que existem dois mecanismos de falha distintos agindo sobre o componente no caso das falhas relacionadas à demanda, que são o mecanismo de falha relacionado ao estresse aplicado ao componente quando este é solicitado a funcionar e outro mecanismo de falha relacionado ao tempo em que o componente permanece em modo de espera.

As bases de dados genéricos costumam fornecer Q , que é a probabilidade observada de falha na demanda e que pode compreender ambas as contribuições, Q_d e Q_s . O uso de Q

como estimativa para o parâmetro de probabilidade de falha na demanda de um componente requer alguma cautela, pois o intervalo de teste do componente considerado em uma base de dados genéricos pode não corresponder ao intervalo de teste aplicável à instalação específica em estudo. O ideal seria que o analista pudesse extrair da base de dados genéricos os valores de Q_d , λ_s e τ aplicáveis ao componente em estudo e efetuasse, caso necessário, alguma correção apropriada. Caso a base de dados genéricos não forneça alguns dados relevantes, tais como a taxa de falha em espera λ_s e o intervalo de teste τ , então existe uma incerteza associada à utilização dos valores apresentados para Q , que podem corresponder predominantemente a Q_d ou a Q_s . É possível, também, que ambos os parâmetros, Q_d e Q_s , estejam contribuindo de maneira equilibrada.

Componentes reparáveis: Suponha que um componente com taxa de falha λ é colocado em funcionamento até que ocorra uma falha e, então, este componente é retirado de serviço para manutenção corretiva (reparo). Durante o reparo, o componente não está disponível e ocorreria uma falha na demanda se fosse solicitado a funcionar neste período. Supondo que o processo de reparo segue uma distribuição exponencial com taxa de reparo μ , pode-se deduzir que a probabilidade de falha na demanda equivale à indisponibilidade em estado estacionário, que é dada por:

$$Q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (10)$$

A equação (10) permanece válida nos casos em que as variáveis aleatórias “tempo de falha” e “tempo de reparo” não são exponencialmente distribuídas, pois as taxas λ e μ podem ser interpretadas como os inversos de “tempo médio até a falha” e “tempo médio de reparo”, respectivamente, para qualquer distribuição de probabilidade que seja ajustada a estas variáveis aleatórias.

A partir dos resultados discutidos nos tópicos anteriores, fica evidente que componentes idênticos sujeitos à degradação durante o modo de espera podem não apresentar a mesma probabilidade de falha na demanda, pois as políticas de manutenção e reparo aplicadas a estes componentes podem ser distintas.

Conceito de Taxa de Falha Constante

Considerar que a função taxa de falha é constante durante a fase de vida útil de um componente significa supor que não ocorre deterioração do componente durante esta fase. Significa, também, na análise estatística, que o tempo até a falha do componente, T , é uma variável aleatória exponencialmente distribuída.

Na prática, é possível que a deterioração seja iniciada quando o componente entrar na fase de desgaste. Muitos componentes incluídos em bases de dados genéricos estão sujeitos a alguma política de manutenção e substituição. É razoável supor que estes componentes sejam substituídos ou reformados antes de atingirem a fase de desgaste. O problema do *burn-in* (mortalidade infantil) pode ser causado por procedimentos errôneos de controle de qualidade na fabricação, instalação ou comissionamento do componente. Estes problemas, em geral, podem ser identificados e corrigidos durante a instalação inicial, comissionamento e períodos de teste. Portanto, dados de falha coletados durante o período de *burn-in* devem ser descartados. Estes dados não devem ser incluídos na base de dados, a menos que sejam relevantes para alguma atividade de comissionamento e a coleta oficial dos dados seja realizada a partir da fase de vida útil.

Se os principais eventos de falha considerados em uma base de dados são provenientes de registros efetuados na fase de vida útil dos componentes, é razoável supor que as taxas de falha sejam aproximadamente constantes. Ainda assim, recomenda-se que alguns testes estatísticos sejam realizados durante o processo de coleta dos dados, como por exemplo, uma análise de tendências, para verificar a validade da hipótese de que a função taxa de falha é constante. Uma suposição que decorre da hipótese de taxa de falha constante é que um componente pode ser considerado “tão bom como novo” enquanto está em funcionamento e, também, após ser restaurado de uma falha por meio de ação de reparo ou substituição. Finalmente, a suposição de taxa de falha constante implica na consideração de que as falhas ocorrem de modo aleatório e independente da idade do componente.

Os métodos de estimação que serão descritos na seção 3.3 estão baseados na hipótese de que a função taxa de falha é constante e independente do tempo, representada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (11)$$

e

$$\lambda(t) = \lambda \quad (12)$$

Avaliação das Incertezas Associadas aos Dados de Confiabilidade

Os resultados de uma APS invariavelmente contêm incertezas que surgem de muitas fontes. As incertezas associadas aos dados de entrada são questões importantes a serem consideradas durante o desenvolvimento da APS. Tais incertezas envolvem os dados de confiabilidade de componentes, frequências de eventos iniciadores de acidentes, probabilidades de falhas dependentes e probabilidades de falhas resultantes de ações humanas. As incertezas

estatísticas associadas às frequências de eventos iniciadores raros e probabilidades de erros humanos são, sem dúvida, as mais relevantes.

O método usado para gerar limites de incerteza associados aos parâmetros de confiabilidade de componentes não está padronizado em todas as bases de dados. No entanto, a maioria das fontes de dados fornece intervalos de confiança para os parâmetros conforme definidos na estatística clássica. Em alguns casos, a inferência estatística bayesiana é aplicada e os limites de incerteza são derivados a partir da distribuição *a posteriori* do parâmetro em estudo. Algumas bases de dados fornecem limites inferiores e superiores, sem fornecer informações sobre o método de obtenção destes limites.

Na maioria das bases de dados, a incerteza estatística para amostras pequenas de dados é calculada conforme será apresentado nas seções 3.3.2 e 3.3.4. Um intervalo de confiança de 90% para um parâmetro é determinado por meio do cálculo dos limites de confiança de 5% e 95% em torno do valor médio deste parâmetro. A determinação deste intervalo de confiança envolve a aplicação da distribuição de Qui-Quadrado para falhas relacionadas com o tempo de operação e da distribuição F de Snedecor para falhas relacionadas à demanda do componente.

Fator de Erro

O fator de erro (*FE*) é uma das medidas representativas da incerteza associada a um parâmetro de confiabilidade. Neste caso, o fator de erro é definido como a razão entre o percentil 95% da distribuição de probabilidade do parâmetro (λ_{95} ou n_{d95}) e o valor médio da taxa de falha (λ) ou do número (n_d) de falhas em d demandas. Assim, tem-se que:

$$FE(\text{taxa de falha}) = \frac{\lambda_{95}}{\lambda} \quad (13)$$

ou

$$FE(\text{falha na demanda}) = \frac{n_{d95}}{n_d} \quad (14)$$

Esta representação do fator de erro está baseada na suposição de que a incerteza na estimação do parâmetro de falha pode ser modelada segundo uma distribuição lognormal.

É importante destacar que a incerteza associada aos dados de confiabilidade de componentes extraídos de bases de dados genéricos e usados como dados de entrada na APS não é explicada totalmente pela incerteza estatística (fator de erro e/ou limites de confiança de 5% e 95%) decorrente do tamanho da amostra. A incerteza associada aos dados de confiabilidade pode envolver outros fatores, tais como:

- erros na coleta de dados ou imprecisões na compilação dos resultados apresentados na base de dados genéricos;

- inadequação dos dados genéricos em relação à instalação ou ao componente para o qual os dados serão aplicados;
- incompatibilidade entre as políticas de testes e manutenção dos componentes considerados na bases de dados genéricos e as dos componentes da instalação em estudo.

Finalmente, pode-se dizer que uma avaliação crítica de engenharia também é necessária para se atribuir o nível de incerteza adequado aos dados usados em uma APS.

1.3 Motivação do trabalho

O IPEN possui um grupo de pesquisadores que tem trabalhado no levantamento e análise de dados da experiência operacional dos reatores nucleares de pesquisa instalados em seu sítio, com ênfase em dados sobre falhas de componentes e incidentes ou ocorrências anormais durante a operação destes reatores.

No período de março de 2001 a junho de 2004, o IPEN manteve um contrato com a Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) para trabalhar no Projeto Coordenado de Pesquisa intitulado “Atualização e Expansão da Base de Dados de Confiabilidade da *IAEA* para Aplicação em Análise Probabilística de Segurança de Reatores de Pesquisa”. Participaram deste projeto onze países membros da *IAEA* e o Brasil foi representado por um grupo de nove profissionais do IPEN.

Com base nos objetivos estabelecidos pela *IAEA*, o grupo do IPEN desenvolveu uma Base de Dados de Confiabilidade de Componentes específica para os reatores de pesquisa IEA-R1 (tipo piscina – potência nominal máxima de 5 MW) e IPEN/MB-01 (conjunto crítico – potência nominal máxima de 100W). O trabalho elaborado no IPEN, o qual está documentado em relatórios técnicos e artigos científicos, (OLIVEIRA et al., 2002, 2005), abrange o levantamento e análise de dados de confiabilidade de componentes, eventos iniciadores de acidentes, falhas de causa comum e erros humanos.

A participação neste projeto de pesquisa visou atender às necessidades de várias áreas técnicas do IPEN: (1) a área de Análise Probabilística de Segurança do Centro de Engenharia Nuclear (CEN), que assumiu a função de coordenação local deste projeto, foi, sem dúvida, o que teve maior interesse, pois seus integrantes atuam na área de análise de confiabilidade dos sistemas dos reatores de pesquisa do instituto. Os dados de operação, falha e manutenção que vêm sendo armazenados, assim como as estimativas dos parâmetros de confiabilidade e disponibilidade de componentes gerados a partir destes dados, podem ser aplicados nas tarefas

realizadas por este grupo; e (2) as equipes de operação e manutenção dos reatores IEA-R1 e IPEN/MB-01, para os quais houve uma oportunidade no sentido de modernizar e melhorar o processo de registro de dados das instalações e, principalmente, obter informações que auxiliem na revisão das rotinas operacionais e na otimização das atividades de manutenção de seus sistemas e componentes.

Para o projeto da *IAEA*, os dados referentes ao Reator IEA-R1 foram compilados com base no histórico operacional do período de janeiro de 1999 a dezembro de 2003. No caso do reator IPEN/MB-01, os dados foram coletados a partir do histórico de operação entre outubro de 1997 e março de 2004 (OLIVEIRA et al., 2004).

No que diz respeito ao Reator IEA-R1, o processo de coleta e análise dos dados de operação, falha e manutenção dos componentes não foi interrompido e é incentivado pela gerência da instalação. Os dados vêm sendo atualizados em planilhas eletrônicas do *Microsoft Office Excel*, específicas para armazenar os registros de ocorrências e efetuar os cálculos dos tempos de operação e do número de demandas dos principais equipamentos da instalação. As informações obtidas neste levantamento passam por uma avaliação preliminar e os eventos considerados relevantes para a segurança da instalação são incluídos no Relatório Mensal de Atividades do Reator IEA-R1, que é um documento interno gerado mensalmente no Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN.

A motivação deste trabalho de mestrado surgiu da necessidade e da importância de se desenvolver um programa computacional capaz de efetuar o gerenciamento da base de dados de confiabilidade dos componentes do Reator IEA-R1. Este sistema passou a ser considerado imprescindível para o armazenamento e processamento seguros dos dados coletados, além de possibilitar sua consulta e uso pelos profissionais do IPEN, os quais poderão acessá-lo por meio da *intranet*.

1.4 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema capaz de fazer o armazenamento e processamento dos dados referentes à operação, falha e manutenção de componentes dos reatores nucleares de pesquisa do IPEN, visando sua utilização no desenvolvimento da APS destas instalações ou em outras avaliações quantitativas relacionadas à sua segurança, confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Esta base de dados deve ser gerenciada por um programa computacional que permita que as informações nela contidas estejam disponíveis para os usuários da rede corporativa

(*intranet* do IPEN) e sejam consultadas e/ou manuseadas por profissionais devidamente cadastrados e controlados por um administrador do sistema.

Este sistema de gerenciamento da base de dados deverá ser uma ferramenta de grande importância para o núcleo de pesquisadores do IPEN envolvidos na condução do programa de levantamento e análise de dados específicos dos reatores nucleares de pesquisa desta instituição.

No âmbito deste trabalho, foram considerados os dados de confiabilidade de componentes do Reator IEA-R1, os quais foram obtidos de um levantamento dos registros efetuados a partir de janeiro de 1999, referentes à experiência operacional desta instalação.

1.5 Estrutura do trabalho

Na seção 2 é apresentada a revisão da literatura, incluindo citações a trabalhos relacionados ao desenvolvimento de bancos de dados computacionais e bases de dados de confiabilidade na área nuclear.

Na seção 3 são apresentadas as definições conceituais referentes a sistemas de gerenciamento de banco de dados e a metodologia adotada neste trabalho para o desenvolvimento do sistema que faz o armazenamento e processamento de dados de confiabilidade dos reatores de pesquisa do IPEN. Além disso, são descritos o procedimento para levantamento dos dados dos reatores, assim como a análise estatística aplicada para cálculo das estimativas de taxas e probabilidades de falha de componentes.

Na seção 4 é descrito o funcionamento do sistema de gerenciamento da base de dados, detalhando as tarefas de inclusão de dados, atualização, consulta e impressão dos dados armazenados. Além disso, é dada uma explicação detalhada sobre o processamento dos dados para geração de relatórios do sistema.

A conclusão deste trabalho e as propostas para trabalhos futuros são apresentadas na seção 5.

No Apêndice A é apresentado o código fonte para criação das tabelas e objetos da base de dados desenvolvidos neste trabalho.

2 Revisão da Literatura

2.1 Histórico do desenvolvimento de bancos de dados computacionais

O avanço na tecnologia de armazenamento de dados, o qual resultou em aumento da capacidade de armazenamento, programas computacionais mais velozes e custos mais baixos, contribuiu para a geração de um grande volume de dados por empresas e organizações (DATE, 2004). Com o aumento do volume de dados, os usuários passaram a necessitar de ferramentas que simplificassem seu manuseio e tornassem mais eficiente seu gerenciamento.

Por definição, um banco de dados é um conjunto de informações organizadas que expressam as atividades de uma ou mais instituições relacionadas entre si. Além disso, uma forma bastante criteriosa, segura e eficiente para armazenar e disponibilizar a informação mediante a busca é o *Relational Data Base Management System (RDBMS)*, conhecido no idioma português como Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), ou simplesmente, banco de dados.

Um SGBD permite que os usuários de um sistema específico possam realizar uma série de operações sobre um banco de dados, tais como inclusão de registros novos, recuperação e modificação de dados existentes em arquivos, assim como exclusão de dados do sistema. Deste modo, um SGBD é capaz de realizar funções pré-estabelecidas, as quais consistem, basicamente, em gerenciar operações de inclusão, atualização, exclusão e projeção (consulta) dos dados armazenados (ELMASRI e NAVATHE, 2002).

Os sistemas computacionais tiveram sua grande explosão em meados de 1960, quando grandes volumes de dados precisavam ser administrados com mais rapidez e precisão. Assim, grandes empresas como a IBM (INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES, 1998), entre outras, passaram a produzir equipamentos com maior capacidade de processamento e armazenamento, para acompanhar o aumento do volume de informações gerenciadas pelas empresas projetistas de sistemas.

Ainda nesta época surgiram os primeiros SGBDs, os quais eram desenvolvidos com base em sistemas de arquivos. Para ELMASRI e NAVATHE (2002), as principais e mais importantes características destes SGBDs eram o controle de concorrência (uso simultâneo por mais de um usuário), garantia da segurança e gerenciamento do relacionamento dos dados, recuperação de erros (falhas) e controle da integridade referencial do banco de dados.

Além das características citadas anteriormente, o gerenciamento de transações é a que merece maior destaque em um SGBD. Uma transação pode ser considerada como um conjunto

de tarefas de escrita ou leitura realizadas no banco de dados, tarefas estas que servem para efetuar uma função específica do SGBD. As transações têm papel importante no processamento interno do banco de dados e permitem garantir a consistência dos dados. Os seguintes requisitos devem ser cumpridos em um SGBD:

- Atomicidade: as operações internas de uma transação devem ser executadas de modo completo ou, se a transação for interrompida por algum motivo, todas as operações internas associadas devem ser desfeitas.
- Consistência: o banco de dados deve estar consistente antes da transação e, após a transação, o banco deve permanecer consistente sem problemas de integridade.
- Isolamento: nenhuma transação deve ser interrompida por outra até que seja completada.
- Durabilidade: a informação armazenada no banco de dados deve permanecer inalterada até que alguma outra transação de atualização ou exclusão possa afetá-la.

Em 1970, Edgar Codd, que trabalhava em um laboratório de pesquisa da IBM, propôs uma nova estrutura chamada modelo de dados relacional, o qual foi considerado um marco inicial histórico para o desenvolvimento de bancos de dados (Codd, 1970). Deste modo, os SGBDs passaram por um grande aprimoramento e uma maior utilização nos setores corporativos, tornando-se uma prática padrão.

Conforme ALVES (2004), um banco de dados relacional é uma ferramenta considerada de fácil manuseio, eficiente e financeiramente acessível se comparada aos bancos de dados hierárquicos da época, sendo capaz de armazenar grande volume de informação e que possui mecanismos de expurgo e recuperação.

É importante citar que, a robustez e a simplicidade de um SGBD relacional permitiram que seu uso fosse expandido e disseminado no mercado mundial. No entanto, ao mesmo tempo em que os programas para gerenciar os bancos de dados tornaram-se mais comuns, foi surgindo a necessidade de se trabalhar com novos tipos e formatos de dados, tais como imagens, vídeos e outros. Além disso, com o surgimento da rede mundial de computadores, *World Wide Web* (*www*), o uso da internet fez com que o volume de dados aumentasse significativamente, trazendo novos padrões e requisitos para estes dados.

2.2 Histórico do desenvolvimento de bases de dados de confiabilidade

Em termos gerais, dados de confiabilidade de componentes podem ser classificados em dois tipos principais: específicos ou genéricos. Os dados específicos são compilados a partir da experiência operacional de uma determinada instalação, com base em registros efetuados pelas equipes que trabalham em sua operação e manutenção, indicando falhas de componentes, indisponibilidades de sistemas, ocorrências de incidentes e atividades de teste, manutenção preventiva ou corretiva em equipamentos. Os dados genéricos são compilações de dados de confiabilidade obtidos em registros de várias instalações, referentes a componentes que apresentam as mesmas condições operacionais ou de uso. As fontes de dados genéricos são, normalmente, publicações na literatura especializada, estudos de risco/ confiabilidade disponíveis para consulta ao público, dados fornecidos por grupos de fabricantes, dados compilados por operadores de instalações ou agências reguladoras, etc.

Os primeiros projetos de banco de dados de falhas foram desenvolvidos nas indústrias automobilística e aeronáutica, na época em que estes meios de transporte passaram a ser usados por uma parcela maior da população mundial. Os dados coletados serviam para gerar estimativas de parâmetros associados à segurança e à manutenção destes meios de transportes (AKHMEDJANOV, 2001).

A primeira geração de fontes de dados de falhas foi marcada pela publicação do manual intitulado *Martin Titan Handbook*, nos Estados Unidos da América, em 1959, (TITAN, 1959). No Titan Handbook foram apresentadas taxas de falha para uma grande variedade de dispositivos elétricos, eletrônicos, eletromecânicos e mecânicos e que, pela primeira vez, foram apresentadas de modo padronizado, com base em número de falhas por 10^6 horas. As taxas de falha compiladas no *Titan Handbook* eram usadas como estimativas do parâmetro do modelo exponencial adotado para explicar o comportamento probabilístico do tempo de falha de componentes. No modelo exponencial, supõe-se que a taxa de falha do componente é constante no tempo.

Na segunda geração, as publicações mais importantes foram: (1) o *Military Handbook 217*, *MIL-HDBK-217* (UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE, 1984), com a primeira versão publicada em 1962 e que apresenta dados sobre componentes eletrônicos usados em equipamentos militares; (2) o *Failure Rate Data Bank*, *FARADA*, o qual foi criado no âmbito de um programa denominado *Government-Industry Exchange Program* (GIDEP, 2007), desenvolvido pelos governos americano e canadense e organizações associadas. Foi o primeiro banco de dados computacional e, atualmente, pode ser acessado pela *internet*

exclusivamente por membros do GIDEP; e (3) o *RADC, Rome Air Development Center Nonelectronic Reliability Notebook* (COTTRELL, 1969), o qual apresenta a coleta e análise de dados de falha de componentes não-eletrônicos, incluindo a descrição de métodos analíticos que correspondem ao estado da arte na análise de confiabilidade de componentes deste tipo. Estas publicações continuam sendo usadas por especialistas da área e estão baseadas no uso do modelo exponencial com taxa de falha constante.

Na terceira geração de fontes de dados de confiabilidade, os pesquisadores passaram a se preocupar em melhorar as estimativas apresentadas, procurando solucionar os problemas relacionados à inadequação de se usar um único modelo de falha para todo o espectro de condições ambientais e causas de falhas de componentes. As bases de dados passaram a incluir intervalos para as estimativas dos parâmetros de falha, considerando sub-populações heterogêneas de componentes. As estimativas dos parâmetros foram separadas em duas categorias: falhas relacionadas ao tempo de operação e falhas relacionadas à demanda dos componentes. Os modos de falha foram divididos em: falhas críticas/ catastróficas; falhas degradadas; e falhas incipientes. Além disso, foram aprimoradas as técnicas de análise de dados de falha, com a publicação de importantes manuais sobre este assunto, e as novas ferramentas de *hardware* e *software* aumentaram o desempenho das bases de dados. Nesta geração, existiu muito esforço por parte das indústrias (em especial, a nuclear comercial, *off-shore* de petróleo e química) no desenvolvimento de bases de dados (FULLWOOD, 1999) (AKHMEDJANOV, 2001).

As bases de dados genéricos mais relevantes e que costumam ser aplicadas em APSs de reatores nucleares são:

- *European Industry Reliability Data Bank (EIREDA)*, publicado por JRC & EDF, 1998, (EIREDA, 1991)
- *OREDA Handbook, Offshore and Onshore Reliability Project* (Det Norske Veritas), (OREDA, 2002)
- **IEEE Standard 500-1984**, *IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations*, desenvolvido pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1984)
- *Centralized Reliability and Events Database (ZEDB)*, publicado por VGB PowerTech e.V., (AKHMEDJANOV, 2001)

- **T-book**, *Reliability data of components in Nordic nuclear power plants*, 6. Ed, publicado por Swedpower AB, Stockholm (Sweden). TUD Office; Poern Consulting, Nykoeping (Sweden), (CARLSON, 1987)
- Bases de Dados publicadas pela **U.S.NRC**:
 - NUREG-75/014 (**WASH-1400**), *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants - Apêndice III*, publicado pela U.S.NRC, 1975 (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975). Fornece dados de confiabilidade de algumas plantas nucleares de potência dos Estados Unidos da América. Atualmente, estes dados são considerados antigos e obsoletos, mas ainda é de interesse para alguns estudos como levantamento de histórico.
 - **NUREG/CR-6823**, *Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment*, publicado pelo Sandia National Laboratory em 2003, (ATWOOD et al., 2003).
 - **NUREG-CR-6268**, *Common-Cause Failure Database and Analysis System: Event Data Collection, Classification, and Coding*, publicado pelo Idaho National Laboratory em 2007, (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2007b).
 - **NUREG/CR-6928**, *Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, publicado pelo Idaho National Laboratory em 2007, (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2007a).
 - **NUREG/CR-6936**, *Probabilities of Failure and Uncertainty Estimate Information for Passive Components - A Literature Review*, publicado pelo Pacific Northwest National Laboratory em 2007, (GOSSELIN et al., 2007).
 - **CCF Parameter Estimations 2012 Update**, publicado pela U.S. Nuclear Regulatory Commission (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2012).
 - **NUREG-1275**, *Operating Experience Feedback Reports*. Foram publicados mais de 500 relatórios, desde 1980 (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1997).
- Bases de Dados publicadas pela **IAEA**:

- **IAEA-TECDOC-478**, *Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment*, 1988 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1988);
- **IAEA-TECDOC-504**, *Evaluation of Reliability Data Sources*, 1989 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1989a);
- **IAEA-TECDOC-508**, *Survey of Ranges of Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment*, 1989 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1989b);

O documento técnico **IAEA-TECDOC-930** (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997), publicado pela *IAEA* e intitulado "*Generic component reliability data for research reactor PSA*", tem sido usado como referência na obtenção de dados de confiabilidade genéricos para componentes dos principais sistemas dos reatores de pesquisa. Para a coleta e análise de dados específicos deste tipo de instalação, alguns métodos foram sugeridos no **IAEA-TECDOC-636**, "*Manual on reliability data collection for research reactor PSA*" (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992c).

É importante destacar que os principais fatores que explicam as diferenças entre os dados apresentados pelas diversas fontes disponíveis para consulta são:

- Diferenças na qualidade dos componentes;
- Diferenças nas políticas de testes e manutenção dos componentes;
- Diferenças nos fatores ambientais associados aos componentes;
- Diferenças nas solicitações ou cargas impostas aos componentes; e
- Diferenças na delimitação das fronteiras dos componentes.

Deste modo, os dados genéricos disponíveis na literatura podem não ser aplicáveis para a análise de uma instalação específica. Neste caso, os dados específicos da instalação representarão melhor o comportamento das ocorrências de falhas dos componentes.

Por outro lado, deve-se destacar que o número total de observações de falhas de componentes para formação de uma base de dados específicos de uma instalação pode ser pequena, implicando numa incerteza maior em relação às estimativas obtidas. Falhas muito improváveis ou os denominados eventos raros dificilmente são observados em levantamentos de dados específicos de confiabilidade de componentes de uma instalação.

3 Metodologia Utilizada

3.1 Sistema de Gerenciamento da Base de Dados de Confiabilidade de Componentes dos Reatores Nucleares de Pesquisa do IPEN

3.1.1 Definição conceitual do sistema de gerenciamento da base de dados

Conforme descrito por KENNETH e LAUDON (2011), um sistema de informação pode ser definido como um conjunto de componentes inter-relacionados para coletar, recuperar, processar, armazenar e distribuir informações, com a finalidade de facilitar o planejamento, controle, coordenação, análise e tomada de decisão em organizações. Além disso, um sistema de informação computacional, genericamente chamado de sistema da informação, utiliza a tecnologia da computação para executar as tarefas mencionadas acima, (TURBAN et al., 2004). Este sistema pode ser composto por um computador pessoal e um *software* ou pode incluir vários computadores de diversos tamanhos e configurações, impressoras e outros equipamentos, assim como redes de comunicação e bancos de dados. Atualmente, a maior parte dos sistemas de informação é desenvolvida em plataforma de *internet*, na qual vários usuários podem, simultaneamente, consultar e manipular informações armazenadas em um banco de dados, por meio da rede de comunicações disponível.

O sistema de informação desenvolvido neste trabalho é baseado em um SGBD e possui as seguintes funções principais:

- Armazenar os dados relacionados aos reatores nucleares de pesquisa do IPEN que sejam relevantes para a APS ou para outras avaliações que envolvam medidas de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade destas instalações;
- Permitir o gerenciamento dos dados por meio das telas apresentadas no programa computacional;
- Processar os dados e gerar relatórios com informações que sirvam para aplicação em APS ou em outras avaliações de interesse.

Este sistema foi denominado PSADB e suas características foram determinadas com base nos tipos de dados selecionados para serem armazenados e manuseados, assim como no fluxo de informações realizado no IPEN, que é a organização operadora do sistema.

A definição do conteúdo e da estrutura propostos para a base de dados de confiabilidade de componentes são apresentados na seção 3.1.2 e o desenvolvimento do programa de gerenciamento do PSADB está descrito na seção 3.1.3.

3.1.2 Definição do conteúdo e da estrutura da base de dados

O conteúdo proposto para a base de dados de confiabilidade de componentes dos reatores nucleares de pesquisa do IPEN abrange as seguintes informações:

- Descrição resumida da instalação
- Caracterização das diferentes áreas que compõem a instalação
- Descrição resumida dos sistemas que compõem a instalação e indicação da localização destes sistemas nas diferentes áreas da instalação
- Descrição resumida dos subsistemas que compõem um determinado sistema da instalação (caso aplicável)
- Dados técnicos dos componentes que compõem um determinado sistema/subsistema da instalação
- Dados de operação dos componentes da instalação
 - tempo total de operação do componente em um determinado período de observação
 - número total de demandas do componente em um determinado período de observação
- Dados de manutenção dos componentes
 - descrição de cada atividade de manutenção efetuada no componente: data, tipo, duração, etc.
- Dados de falhas dos componentes
 - descrição da falha do componente: data, possíveis causas, efeitos, etc.
- Dados de confiabilidade/ disponibilidade de componentes
 - taxas de falha e intervalos de confiança associados
 - probabilidades de falha na demanda e intervalos de confiança associados
- Arquivos de imagens (desenhos / fluxogramas / fotos) dos itens da instalação.

Um formato modular foi adotado para classificar e armazenar os dados na base de dados, seguindo uma lógica e uma estrutura pré-definidas.

Os módulos que compõem a base de dados desenvolvida neste trabalho são:

1. USUÁRIOS
2. CADASTRO DE ITENS (Instalação / Área / Sistema / Subsistema / Componente)
3. DADOS DE OPERAÇÃO DE COMPONENTES
4. DADOS DE MANUTENÇÃO DE COMPONENTES
5. DADOS DE FALHA DE COMPONENTES
6. ANÁLISE DOS DADOS E GERAÇÃO DE RELATÓRIO

3.1.2.1 Módulo de Usuários

Este módulo contém o cadastro completo dos usuários que podem acessar o PSADB. Para acessar o sistema, o usuário deverá possuir credenciais (*login* e senha) previamente cadastradas por um usuário com o perfil administrador. Os perfis dos usuários do PSADB são:

- Administrador do sistema: possui privilégios de acesso a todos os módulos e recursos disponíveis no sistema, além de ter a responsabilidade de cadastrar os demais usuários.
- Usuário – entrada de dados: possui privilégios de consulta e inclusão de dados em alguns módulos específicos do sistema, assim como tem permissão para solicitar a geração de relatórios com os dados de interesse.
- Usuário – consulta de dados: possui apenas privilégios de consulta aos dados do sistema e pode solicitar geração de relatórios com os dados de interesse. Este usuário não terá permissão para incluir, alterar ou excluir dados da base de dados.

Atualmente, o sistema PSADB está instalado em um computador localizado nas dependências do IPEN, em servidor com acesso à *intranet*. Em princípio, qualquer profissional do IPEN poderá acessar o PSADB, desde que previamente autorizado e cadastrado pelo administrador do sistema.

O formulário a ser preenchido pelo administrador do sistema para cadastrar um novo usuário é apresentado na *FIGURA 3*:

FIGURA 3 – Formulário para cadastro de usuários do PSADB

3.1.2.2 Módulo de Cadastro de Itens

Este módulo contém o inventário de descrições, arquivos de imagens e dados técnicos dos itens cadastrados no PSADB, que são: instalação, área, sistema, subsistema e componente.

É importante destacar que o cadastro de itens no PSADB deve obedecer a uma ordem hierárquica. Esta hierarquia favorece a modelagem da instalação em estudo para representação na base de dados, que é:

Instalação → Área → Sistema → Subsistema → Componente

Assim, tem-se que:

1. Para cadastrar um novo componente, é necessário que os dados de instalação, área, sistema e subsistema (opcional) já estejam cadastrados.
2. Para cadastrar um novo subsistema, é necessário que os dados de instalação, área e sistema já estejam cadastrados.
3. Para cadastrar um novo sistema, é necessário que os dados de instalação e área já estejam cadastrados.
4. Para cadastrar uma nova área, é necessário que os dados de instalação já estejam cadastrados.
5. Para cadastrar dados de operação, manutenção e falha de um componente, é necessário que os dados técnicos do componente já estejam cadastrados.

Fronteiras dos itens

Em estudos de APS ou em análises de confiabilidade, todos os itens são importantes e devem ser considerados como partes integrantes de uma instalação. Portanto, é fundamental definir o nível de detalhamento que se deseja atingir nestas análises (sistema, subsistemas, componentes, subcomponentes, peças, etc.) e delinear as fronteiras que delimitam os principais itens que serão usados para representar a instalação. Esta tarefa tende a facilitar o desenvolvimento de modelos de árvore de falhas ou outros modelos usados em estudos de APS. Além disso, o PSADB permite que sejam armazenados arquivos de imagens (fluxogramas esquemáticos, desenhos, fotos, etc.) para ilustrar os itens cadastrados e suas respectivas fronteiras.

Fronteiras de um Sistema

Na definição das fronteiras de um sistema devem ser incluídos todos os itens que são necessários para que sua função seja cumprida. Caso existam sistemas de interface ou sistemas de suporte essenciais para seu funcionamento, então estes devem ser considerados e suas fronteiras também identificadas, para que possíveis falhas ou atividades de manutenção não sejam classificadas de modo errôneo em um sistema ou interface ou suporte. Por exemplo, dispositivos de instrumentação e controle dedicados exclusivamente a determinados componentes, tais como motores, bombas e ventiladores, devem ser incluídos nas fronteiras do sistema principal. A alimentação elétrica para um sistema pode incluir uma fonte de alimentação externa, a qual deve ser considerada separadamente. Por outro lado, os disjuntores de entrada antes dos barramentos, *switches* e cabos podem ser incluídos ou não nas fronteiras do sistema principal. Para um sistema de resfriamento, o trocador de calor, válvulas e tubulações devem ser incluídos no sistema principal.

Fronteiras de um Subsistema

Um subsistema é composto por um grupo de componentes e dispositivos associados que são necessários e suficientes para a execução de uma determinada função do sistema principal. As interfaces dos subsistemas podem incluir componentes mecânicos, elétricos e dispositivos de instrumentação e controle. Existem sistemas que não podem ser divididos em subsistemas com funções claramente definidas.

Fronteiras de um Componente

As fronteiras de um componente devem representar claramente todas as suas partes e interfaces com outros itens da instalação. O componente pode ser dividido em subcomponentes. A definição dos limites de um componente é uma tarefa importante na estruturação e alimentação dos dados na base de dados de confiabilidade. Ao selecionar os dados para uma

APS, o analista deve conhecer os limites do componente e ter garantias de que os dados de falha armazenados correspondem aos itens classificados em suas fronteiras.

Tipos de componentes

As bases de dados genéricos costumam adotar algum tipo de codificação para identificar os itens armazenados. Neste trabalho, optou-se pela codificação de tipo de componente definida no documento IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997).

Dados técnicos dos itens

Assim, os dados de entrada no módulo de cadastro de itens do PSADB são:

Instalação

- Instalação (nome oficial da instalação)
- Código da Instalação (codificação usada para simplificar a denominação da instalação)
- Descrição da Instalação (breve descrição da instalação, incluindo principais características de projeto)
- Imagem da Instalação (foto / desenho atualizado da instalação)

Área

- Instalação
- Código / Nome da Área (denominação usada para identificar a área)
- Descrição da Área (breve descrição da área, indicando a localização na instalação)
- Imagem da Área (foto / desenho atualizado da área)

Sistema

- Instalação
- Área
- Sigla do Sistema (iniciais usadas para representar o nome do sistema)
- Nome do Sistema (denominação usada para identificar o sistema)
- Descrição do Sistema (descrição da função do sistema e de suas fronteiras / interfaces)
- Imagem do Sistema (diagrama esquemático / fluxograma atualizado do sistema)
- Nomes dos Subsistemas
- Siglas dos Subsistemas

Subsistema^(*)

- Instalação
- Área
- Sistema
- Sigla do Subsistema (iniciais usadas para representar o nome do subsistema)
- Nome do Subsistema (denominação usada para identificar o subsistema)
- Descrição do Subsistema (descrição da função do subsistema e de suas fronteiras / interfaces)
- Imagem do Subsistema (diagrama esquemático / fluxograma atualizado do subsistema)

(*) Se um sistema não puder ser subdividido em subsistemas, deve-se abrir uma ficha de subsistema com a sigla “N/A” e o nome “Não Aplicável”.

Componente^()**

- Instalação
- Área
- Sistema
- Subsistema
- “TAG” do Componente (codificação usada na instalação para identificar o componente)
- Nome do Componente (denominação usada para identificar o componente)
- Tipo^(**) / Subtipo de Componente:
 - código - segue padrão do documento IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997)
 - descrição - segue padrão do documento IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997)
 - subtipo (número sequencial para distinguir grupos de componentes do mesmo tipo)

(**) Na base de dados PSADB foi adicionado um tipo de componente denominado “all components” com o código “all” e que não aparece na lista do IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997). Este tipo foi criado para permitir a inclusão de um “supercomponente” denominado “Reator”, o qual engloba todos os componentes que compõem a instalação. Foi um artifício usado para permitir que os dados de operação (tempo de operação) do reator sejam armazenados na base de dados.

- Função do Componente (descrição da função do componente no que diz respeito ao funcionamento geral do sistema)
- Limites do Componente (descrição das fronteiras do componente e/ou itens de interface)
- Fabricante
- Modelo
- N° serial
- Principais características (dimensões / material / potência / corrente / tensão / temperatura / pressão / fluxo de operação / etc.)
- Data de Instalação
- Data de Início da Operação
- Data de Substituição
- Procedimento de teste do componente
Caso exista uma atividade programada de teste / manutenção do componente, indicar Especificação Técnica / Rotina / Instrução de Trabalho (IT) que defina esta atividade.
- Imagem do Componente (foto / desenho esquemático do componente).

Os formulários que devem ser preenchidos pelo usuário do PSADB para cadastrar os itens de uma instalação são apresentados nas *FIGURA 4* a *FIGURA 8*.

Instalação, Novo Registro

Instalação *

Código *

Instalação

Descrição

Instalação

Imagem

Instalação

Arraste os arquivos aqui

FIGURA 4 – Formulário para cadastro de uma instalação no PSADB

Área, Novo Registro

Instalação *

Código Área *

Descrição Área

Imagem Área

Área

Arraste os arquivos aqui

FIGURA 5 – Formulário para cadastro de uma área no PSADB

Sistema, Novo Registro

Instalação *

Área *

Sigla Sistema *

Nome Sistema *

Descrição Sistema

Imagem Sistema

Arraste os arquivos aqui

FIGURA 6 – Formulário para cadastro de um sistema no PSADB

Subsistema, Novo Registro

Instalação *

Área *

Sistema *

Sigla Subsistema *

Nome Subsistema *

Descrição Subsistema

Imagem Subsistema

Arraste os arquivos aqui

FIGURA 7 – Formulário para cadastro de um subsistema no PSADB

Componente, Novo Registro

Instalação

Favor Selecionar

Área

Favor Selecionar

Sistema

Favor Selecionar

Subsistema

Favor Selecionar

Tag Componente

Nome Componente

Tipo / Subtipo Componente

Favor Selecionar

Sub-Tipo

Função Componente

Limites Componente

Fabricante

Modelo

No. Serial

Especif. Técnicas

Data Instalação

Início Funcionamento

Procedimento Teste

Data Substituição

Imagem Componente

Adicionar arquivos

Arraste os arquivos aqui

Salvar

Voltar à Lista

FIGURA 8 – Formulário para cadastro de um componente no PSADB

3.1.2.3 Módulo de Dados de Operação de Componentes

Este módulo permite a entrada dos dados referentes à operação dos componentes da instalação. Em geral, os componentes podem apresentar três tipos diferentes de modos de operação, a saber:

- i. Operação contínua
Componentes “rotativos / ativos” (*running component*) operam continuamente durante o período de operação normal do sistema. Componentes “estáticos / passivos” (*static / passive components*) funcionam continuamente durante todo o período de operação do sistema. Em geral, as bases de dados fazem esta distinção em relação aos termos “operação” e “funcionamento”.
- ii. Operação em espera (*standby*)
Componentes que operam em modo de espera e podem ser solicitados a entrar em operação e realizar sua função em caso de teste ou para cumprir alguma demanda real do sistema. Em geral, os componentes em modo de espera permanecem desligados / inativos durante este período.
- iii. Operação na demanda
Este modo de operação corresponde ao caso de componentes que se encontram em um estado operacional e são solicitados a mudar de estado durante a operação.
- iv. Operação alternada (ou intermitente)
No modo alternado, um componente pode estar em operação contínua ou em modo de espera. Em geral, isto acontece nos casos em que dois ou mais componentes (redundantes ou não) estão disponíveis para executar uma única função, mas apenas um é requerido num determinado período para atender aos requisitos do sistema.

Dados de operação de componentes

Assim, os dados de entrada no módulo de dados de operação de componentes do PSADB são:

- Instalação
- Área
- Sistema
- Subsistema

- Nome do Componente
- “TAG” do Componente
- Tipo / Subtipo de Componente
- Modo de Operação do Componente:
 - operação contínua
 - operação em espera (*standby*)
 - operação em demanda
 - operação intermitente
 - outro
- Tempo de operação anterior à instalação de horímetro (aplicável apenas ao caso de componentes cujo tempo de operação é monitorado por horímetro)
- Número de demandas anterior à instalação de contador (aplicável apenas ao caso de componentes cuja demanda / solicitação é monitorada por contador)
- Data de instalação do horímetro (aplicável apenas ao caso de componentes cujo tempo de operação é monitorado por horímetro)
- Data de instalação do contador (aplicável apenas ao caso de componentes cuja demanda / solicitação é monitorada por contador)
- Data da leitura (aplicável apenas ao caso de componentes cujo tempo de operação é monitorado por horímetro e cuja demanda / solicitação é monitorada por contador)
- Horímetro (horas)
- Contador (número de demandas)
- Tempo de Operação Acumulado (horas) - corresponde ao total de horas de operação do componente em um período de observação definido - dd/mm/aaaa a dd/mm/aaaa
- Número de Demandas Acumulado - corresponde ao total de ciclos / demandas do componente em um período de observação definido - dd/mm/aaaa a dd/mm/aaaa
- Observações gerais sobre a operação do componente.

O formulário a ser preenchido pelo usuário do PSADB para registrar os dados de operação de um componente da instalação é apresentado na *FIGURA 9*.

Operação Componente, Novo Registro

Instalação: Favor Selecionar *

Área: Favor Selecionar *

Sistema: Favor Selecionar *

Subsistema: Favor Selecionar *

Nome Componente: Favor Selecionar *

Tag Componente: Favor Selecionar *

Tipo / Subtipo Componente: Favor Selecionar

Modo de Operação: Favor Selecionar

Tempo Oper. Anterior Instal. Horímetro:

Número Demandas Anterior Instal. Contador:

Data Instalação - Horímetro: [] [] [] []

Data Instalação - Contador: [] [] [] []

Data Atual: [] [] [] []

Leitura Horímetro (horas):

Leitura Contador (número de demandas):

Tempo de Operação Acumulado (horas): *

Número de Demandas Acumulado: *

Observações:

Salvar Voltar à Lista

FIGURA 9 – Formulário para registro dos dados de operação de um componente no PSADB

3.1.2.4 Módulo de Dados de Manutenção de Componentes

Este módulo do sistema PSADB permite a entrada de informações sobre agendamentos preventivos ou manutenções preditivas, assim como ações corretivas e substituições aplicadas aos componentes da instalação.

Dados de manutenção de componentes

Assim, os dados de entrada no módulo de dados de manutenção de componentes do PSADB são:

- Instalação
- Área
- Sistema
- Subsistema
- Nome do Componente

- “TAG” do Componente
- Tipo / subtipo de Componente
- Registro de Manutenção (Nº Ficha)
- Data / Hora de Início da Manutenção
- Data / Hora de Término da Manutenção
- Tipo de Manutenção
 - Preventiva
 - Preditiva
 - Corretiva
 - Outro
- Setor de Manutenção
 - Mecânica
 - Elétrica
 - Hidráulica
 - Eletrônica
 - Outro
- Atividade de Manutenção ^(***)
 - Teste
 - Inspeção Visual
 - Calibração
 - Aferição
 - Verificação
 - Ajuste
 - Substituição / Troca
 - Reparo
 - Limpeza
 - Lubrificação
 - Análise de Vibração
 - Outra
- Observações

^(***) 1 - é possível que mais de uma atividade de manutenção seja executada numa determinada data e registrada numa mesma ficha; neste caso, todas as atividades realizadas devem ser indicadas no campo “Observações”; 2 – quando aplicável, indicar o “estado” da instalação durante a realização da atividade de

manutenção; 3 - quando aplicável, incluir no campo “Observações”, a Especificação Técnica / Rotina / Instrução de Trabalho (IT) que defina a atividade de teste / manutenção associada ao componente.

O formulário a ser preenchido pelo usuário do PSADB para registrar os dados de manutenção de um componente da instalação é apresentado na *FIGURA 10*.

Manutenção Componente, Novo Registro

Instalação: Favor Selecionar ▼ *

Área: Favor Selecionar ▼ *

Sistema: Favor Selecionar ▼ *

Subsistema: Favor Selecionar ▼ *

Nome Componente: Favor Selecionar ▼ *

Tag Componente: Favor Selecionar ▼

Tipo / Subtipo Componente: Favor Selecionar ▼

Tipo Manutenção: Favor Selecionar ▼

Setor Manutenção: Favor Selecionar ▼

Atividade Manutenção: Favor Selecionar ▼

Registro Manutenção (Nº Ficha):

Data / Hora Início Manutenção:

Data / Hora Término Manutenção:

Observações:

Salvar Voltar à Lista

FIGURA 10 – Formulário para registro dos dados de manutenção de um componente no PSADB

3.1.2.5 Módulo de Dados de Falha de Componentes

Este módulo do PSADB permite que o usuário registre com detalhes todos os eventos de falha associados a cada componente da instalação e ocorridos durante um período de observação pré-definido. Neste tópico, os seguintes conceitos devem ser explicados:

Falha

Uma falha é definida como a perda da capacidade de um item para executar sua função. A falha representa um estado irreversível do item, exigindo que seja realizada alguma ação corretiva (substituição ou reapro) para que o item volte a cumprir sua função. Na descrição da falha de um item é importante que sejam indicados os efeitos nos demais itens da instalação.

As falhas podem ser classificadas como anunciadas (reveladas) ou não anunciadas (não reveladas), dependendo do modo de detecção; como falhas primárias ou secundárias, de acordo com a causa induzida; e como catastrófica, degradada ou incipiente pelo grau de dano causado no item.

Modos de falha e Mecanismos de Falha

Os modos de falha descrevem a maneira pela qual um item pode falhar, considerando seu aspecto funcional. Torna-se necessário distinguir os modos de falha nos casos em que as consequências de uma falha dependem desta descrição. Por exemplo, uma bomba motorizada pode falhar na partida ou falhar no desligamento, e é bem provável que as consequências destes dois modos de falha sejam bem diferentes. Alguns modos de falha estão associados a mecanismos de falha. Os mecanismos de falha descrevem os processos físicos reais que conduzem a uma falha do item. Corrosão, desgaste, vibração excessiva, rachaduras, trincas e oxidação são processos típicos que podem desempenhar um papel relevante no fenômeno físico da falha de um item.

Dados de falha de componentes

Assim, os dados de entrada no módulo de dados de falha de componentes do PSADB são:

- Instalação
- Área
- Sistema
- Subsistema
- Nome do Componente
- “TAG” do Componente
- Tipo / subtipo de Componente
- Data de ocorrência da falha
- Data de registro da falha
- Descrição da falha (descrição sucinta da falha do componente – este campo pode ser usado para reproduzir a descrição da falha com base no que foi registrado pelo pessoal da instalação)
- Modo de Falha – código do modo de falha

A Todos os modos (All Modes)

B	Degradado (Degraded)
C	Falha para mudar posição (Failure to change position)
D	Falha para permanecer na posição (Failure to remain in position)
E	Falha para fechar (Failure to close)
O	Falha para abrir (Failure to open)
F	Falha para funcionar (Failure to function)
G	Falha no aterramento (Short to ground)
H	Curto circuito (Short circuit)
I	Circuito aberto (Open circuit)
Q	Bloqueio (Plugged)
K	Funcionamento espúrio (Spurious function)
R	Falha durante a operação (Failure to run)
S	Falha na partida (Failure to start)
X	Outras falhas críticas (Other critical faults)
Y	Vazamento (Leakage)
J	Ruptura (Rupture)
M	Falha na barra de controle (Control rod failure)
N	Sinal errôneo (Erroneous Signal)

- Causa da Falha

1. Deficiências relacionadas ao componente / material
 - 1.1. Projeto
 - 1.2. Fabricação
 - 1.3. Instalação
 - 1.4. Especificação de material
2. Deficiências relacionadas à operação / manutenção
 - 2.1. Erro do operador
 - 2.2. Erro no procedimento
 - 2.3. Falta de procedimento
 - 2.4. Ajuste / alinhamento errado (problema mecânico)
 - 2.5. Calibração / ajuste errado (problema elétrico)
 - 2.6. Erro durante teste / outra tarefa (pessoal da instalação)
 - 2.7. Falta de manutenção
 - 2.8. Trabalho executado por pessoal externo

3. Causas relacionadas aos limites operacionais
 - 3.1. Limites operacionais excedidos
 - 3.2. Estresses não previstos
 - 3.3. Depósito de impurezas
 - 3.4. Itens estranhos à operação do componente
 - 3.5. Uso normal em serviço / ocorrência normal
 - 3.6. Corrosão
 - 3.7. Fadiga
4. Causas variadas
 - 4.1. Falha secundária (causada por outra falha)
 - 4.2. Falha de proteção
 - 4.3. Curto circuito
 - 4.4. Falha de aterramento / isolamento
 - 4.5. Variação de tensão
 - 4.6. Influência externa (fogo, explosão, alagamento, etc.)
 - 4.7. Causa desconhecida

- Efeito da Falha

1. Liberação de radioatividade / exposição à radiação
2. SCRAM automático do reator
3. SCRAM manual do reator
4. Desligamento manual (normal) do reator
5. Instalação fora de serviço
6. Instalação parcialmente fora de serviço
7. Redução da potência do reator
8. Perda da função do sistema
9. Isolamento do sistema
10. Função degradada do sistema
11. Perda de redundância dentro do sistema
12. Isolamento do componente
13. Dano a outro equipamento
14. Desarme da turbina (não aplicável para reatores de pesquisa)
15. Nenhum efeito

- Ações Corretivas
 1. Substituição de componente
 2. Substituição de partes do componente
 3. Modificação de procedimento
 4. Modificação de projeto
 5. Reparo sem remoção do componente
 6. Reparo com remoção do componente
 7. Reparo de emergência
 8. Ajuste / calibração
 9. Lubrificação / limpeza
 10. Inspeção especial
 11. Não foram tomadas ações corretivas
 12. Outras

- Data de recuperação do componente (reinstalação / retorno ao serviço)

Se a data da ocorrência da falha e/ou a data de recuperação do componente não forem conhecidas, pode-se repetir nestes campos a data do registro da falha.

- Observações

Neste campo pode ser citada, por exemplo, a fonte de informação do registro da falha: *Logbook*, Folha de dados de operação, Registro de Manutenção, Livro de Instrumentação, etc. Além disso, podem ser incluídas outras informações necessárias para um melhor entendimento da falha e da condição de operação da instalação no momento da ocorrência da falha.

O formulário a ser preenchido pelo usuário do PSADB para registrar os dados de falha de um componente da instalação é apresentado na *FIGURA 11*.

Falha Componente – Novo registro

Instalação: Favor Selecionar *

Área: Favor Selecionar *

Sistema: Favor Selecionar *

Subsistema: Favor Selecionar *

Nome Componente: Favor Selecionar *

Tag Componente: Favor Selecionar *

Tipo / Subtipo Componente: Favor Selecionar

Data Falha: [dropdown] [dropdown] [dropdown] [calendar icon]

Data Registro: [dropdown] [dropdown] [dropdown] [calendar icon]

Descrição Falha: [text input]

Modo de Falha: Favor Selecionar

Causa Falha: Favor Selecionar

Efeito Falha: Favor Selecionar

Ações Corretivas: Favor Selecionar

Data Retorno ao Serviço: [dropdown] [dropdown] [dropdown] [calendar icon]

Observações: [text area]

Salvar Voltar à Lista

FIGURA 11 – Formulário para registro dos dados de falha de um componente da instalação no PSADB

3.1.2.6 Módulo de Análise dos Dados e Geração de Relatório

Este módulo do PSADB consiste no processamento e análise estatística dos dados armazenados nos demais módulos e permite que o usuário obtenha um relatório contendo estimativas dos parâmetros de confiabilidade / disponibilidade específicas para os componentes dos reatores de pesquisa do IPEN. Para atender ao objetivo proposto neste trabalho, os dados apresentados no relatório consistem em valores pontuais e intervalos de confiança associados às taxas de falha ou probabilidades de falha na demanda, calculados para um determinado período de observação e baseados nos dados armazenados nos módulos de dados de operação, manutenção e falha de componentes. Estes dados poderão ser usados diretamente na APS das instalações ou em outros estudos envolvendo avaliações de segurança, confiabilidade e disponibilidade. Na seção 3.2 são descritos os procedimentos adotados no IPEN para levantamento e interpretação dos dados da experiência operacional dos reatores de pesquisa do

IPEN. Após esta etapa, os dados podem ser inseridos na base de dados e seu processamento para geração do relatório está baseado na metodologia de análise descrita na seção 3.3.

O campo a ser preenchido pelo usuário do PSADB para que o período de observação dos dados seja especificado é apresentado na *FIGURA 12*.

O formulário, intitulado "Período de Observação, Editar registro [ID:1]", possui dois campos principais para a seleção de datas. O campo "Data Inicial" contém os valores "1", "Janeiro" e "1999", cada um em um seletor de lista, seguido por um ícone de calendário. O campo "Data Final" contém os valores "31", "Dezembro" e "2009", também em seletores de lista, seguidos por um ícone de calendário. Na base do formulário, há quatro botões: "Salvar", "Limpar", "Voltar à Lista" e "Exibir".

FIGURA 12 – Formulário para registro do período de observação a ser considerado na análise dos dados e geração do relatório pelo PSADB

3.1.3 Desenvolvimento do programa computacional para gerenciamento da base de dados

A metodologia de Engenharia da Informação, que é adequada para o planejamento, análise, projeto e implementação de sistemas de informação para uma rede corporativa, foi aplicada no desenvolvimento do PSADB. Esta metodologia tem sido amplamente usada em projetos de bancos de dados, pois dispõe de técnicas para definição das entidades (tabelas de dados), análise de processos e gerenciamento do fluxo de dados (MACEDO; OLIVEIRA; ANDRADE, 2015).

O método denominado MER, Modelo de Entidade e Relacionamento (DATE, 2004), foi usado para determinar as tabelas que compõem os módulos do sistema PSADB e o tipo de relação existente entre estas tabelas. Neste caso, as principais tabelas são usadas para armazenar as características gerais e os dados técnicos dos itens da instalação, assim como características operacionais, dados sobre as atividades de manutenção e falhas de alguns itens.

As tabelas do PSADB são compostas de linhas (registros) e colunas que, por sua vez, podem ser chaves primárias e permitir que os dados sejam identificados exclusivamente nas tabelas. As colunas definidas como chaves primárias determinam a relação entre as tabelas, que pode ser do tipo 1:1 (um para um) ou 1:N (um para muitos).

A *FIGURA 13* ilustra o resultado da aplicação do Modelo de Entidade e Relacionamento no desenvolvimento do PSADB.

FIGURA 13 - Modelo de Entidade e Relacionamento desenvolvido para o PSADB

O programa computacional, o qual executa suas funções em plataforma de *internet*, deve estar conectado a uma base de dados para que possa efetuar a consulta e o gerenciamento destes dados. Esta tarefa é executada no sistema operacional *Microsoft Windows 7*, o qual está instalado em um computador do IPEN usado como servidor. Além disso, o *hardware* necessário para a instalação do programa também está disponível nas dependências do IPEN. O acesso ao PSADB é feito por meio da *intranet* do IPEN e é permitido somente para usuários identificados. Para acessos externos, ou seja, fora das dependências do IPEN, o usuário deverá possuir autorização e fazer o acesso via VPN (*Virtual Private Network*).

O *software* comercial adequado para atender aos requisitos de armazenamento e processamento dos tipos de dados tratados neste trabalho foi selecionado após a definição da estrutura da base de dados. Neste caso, optou-se pelo uso do software *MySQL*, o qual é consistente com o uso da linguagem de programação *Hypertext Preprocessor, PHP* (ACHOUR et al., 2006). A *PHP* é uma linguagem de *script* (rotinas computacionais que executam uma série de instruções) de propósito geral, amplamente utilizada no desenvolvimento de programas que rodam em plataforma de *internet*, pois permite que os desenvolvedores escrevam páginas geradas dinamicamente. Além disso, a linguagem universal para acesso a bancos de dados conhecida como *Structured Query Language (SQL)* é uma ferramenta poderosa para controlar e gerenciar dados complexos armazenados em diferentes tipos de tabelas de sistemas de bancos de dados (DATE, 1997).

O desenvolvimento do sistema PSADB teve por base uma arquitetura de trabalho constituída de *scripts* e serviços de protocolo que executam tarefas de envio e entrega de pacotes de dados através de uma rede HTTP (*HyperText Transfer Protocol*). Estes protocolos atuam sobre outros protocolos de serviços de rede denominados IP (*Internet Protocol*).

Para a execução do PSADB, foram necessárias as instalações dos seguintes itens de *software*:

- Servidor de *internet* - O servidor de *internet* é o programa responsável pela apresentação de documentos, imagens ou qualquer outro objeto que possa ser acessado por um usuário por meio de um navegador na *internet*. O servidor de *internet* escolhido para este trabalho foi o XAMPP, o qual é compatível com o uso da linguagem *PHP* e banco de dados *MySQL*.
- Sistema Operacional - O sistema operacional é o programa de controle do computador, o qual é responsável por alocar os recursos do computador e escalonar tarefas. Este programa deve fornecer uma interface para o usuário, permitindo que este tenha acesso aos recursos do computador. O sistema operacional *Microsoft Windows*, o qual se encontra

instalado nos computadores do IPEN, foi escolhido para trabalhar em conjunto com o servidor de *internet* XAMPP.

3.2 Levantamento e avaliação dos dados da experiência operacional dos reatores nucleares de pesquisa do IPEN

O levantamento e a avaliação dos dados da experiência operacional dos reatores de pesquisa do IPEN são fundamentais para o desenvolvimento das APSs destas instalações. Os dados necessários para esta análise são, em especial, taxas / probabilidades de falha de componentes, frequências e duração de testes e manutenções, frequências de erros humanos na execução de procedimentos e frequências de ocorrência de eventos anormais ou não usuais que possam iniciar um acidente e comprometer a operação segura do reator. Estes dados são extraídos dos registros efetuados durante a operação do reator e durante as atividades da equipe de manutenção.

No caso do Reator IEA-R1, a coleta de dados da experiência operacional vem sendo conduzida semanalmente pelo pessoal de operação e manutenção desta instalação. Após efetuada uma avaliação por um especialista em APS do IPEN, estes dados podem ser usados na atualização do conteúdo da base de dados do PSADB, nos módulos referentes aos dados de operação, dados de manutenção e dados de falha de componentes.

Apesar do Reator IEA-R1 operar há mais de 50 anos, não foi possível recuperar toda a informação referente à sua experiência operacional, pois os registros mais antigos são incompletos e de difícil interpretação. Além disso, em 1976, o Reator IEA-R1 já havia passado por uma reforma significativa, inclusive com a duplicação de seu Sistema de Resfriamento. Outra reforma importante ocorreu em 1996, na qual as alterações visaram o aumento da potência de operação de 2MW para 5MW. Conforme combinado com o setor de operação e manutenção do Reator IEA-R1, considerou-se razoável estabelecer como meta a recuperação do histórico desta instalação a partir do ano de 1999.

Os tempos acumulados de operação dos principais componentes são obtidos por meio da leitura de horímetros (*time counter*) instalados no reator e são registrados, semanalmente, em planilhas específicas. Do mesmo modo, os números acumulados de demandas dos componentes são registrados nestas planilhas, após a leitura de contadores (*counter*). A tarefa de leitura de horímetros e contadores nas áreas do reator IEA-R1 é realizada por operadores desta instalação duas vezes por semana: na segunda-feira, antes do início das atividades no reator; e na sexta-feira, após o encerramento do expediente na instalação. Atualmente,

encontram-se instalados 21 horímetros no reator IEA-R1, para a obtenção dos tempos exatos de operação de seus principais componentes e 16 contadores para obtenção do número exato de demandas de alguns componentes. Além disso, semanalmente é feita uma anotação do tempo de operação do reator, obtido a partir dos registros manuais feitos nas folhas de operação. Estes registros podem ser usados para se estimar o tempo de operação e o número de demandas de componentes que não possuem horímetros ou contadores instalados. Com base nestas informações, é possível atualizar o módulo de dados de operação de componentes do PSADB e obter resultados semanais, mensais e anuais relacionados ao tempo de operação do reator e ao tempo de operação e número acumulado de demandas dos principais componentes.

Para que os dados da experiência operacional possam ser usados em análises de segurança e de confiabilidade da instalação é necessário que seja efetuada uma avaliação preliminar de todos os eventos anormais / ocorrências não usuais ocorridas durante a operação do reator e de atividades de manutenção. Nesta etapa do processo, os seguintes procedimentos e critérios básicos devem ser seguidos:

- Os dados sobre ocorrências anormais / não usuais são extraídos dos registros de operação e manutenção da instalação (*logbook*, folhas de operação, registros de manutenção corretiva, etc.).
- A entrada destes dados numa planilha editada no *Microsoft Office Excel* segue uma ordem cronológica da ocorrência dos eventos e as seguintes informações são coletadas: número da operação do reator em que a ocorrência foi registrada; data / hora em que a ocorrência foi registrada; e breve descrição (conforme registro efetuado pelo pessoal de operação / manutenção do reator).
- Em seguida, é feita uma avaliação preliminar do evento no que diz respeito à sua importância para a segurança do reator. Além disso, quando aplicável, é indicada a data / hora em que o componente / sistema / reator voltou ao estado normal para operação (término da manutenção, recuperação da condição normal de um sistema, reator religado, etc.).
- Os dados sobre ocorrências anormais / não usuais são interpretados pelo especialista em APS, com auxílio do pessoal da instalação, para que os eventos recebam uma classificação em uma ou mais das seguintes categorias: evento iniciador de acidente; falha de componente; erro humano; falha de causa comum; “SCRAM” (ou desligamento não programado); perda de energia elétrica externa; e atividade de manutenção.

- Falhas de componentes detectadas na manutenção preventiva ou no desligamento do reator devem ser computadas, caso haja indícios de que estas falhas possam ser reveladas na próxima etapa operacional do componente. Além disso, falhas detectadas durante as atividades de manutenção, geralmente, estão associadas à degradação do componente ou são falhas incipientes, que também são do interesse do pessoal da manutenção.
- As ocorrências relacionadas a desligamentos não programados / inadvertidos do reator (“SCRAM”) são compiladas para que se tenha o registro do número de demandas do Sistema de Proteção do Reator.
- As ocorrências referentes a desligamentos não programados / inadvertidos do reator (“SCRAM”) causados por variação excessiva de tensão ou perda de energia da rede elétrica externa são compiladas para que se possa estimar o número de demandas dos sistemas elétricos de emergência.
- Alguns dados adicionais são coletados para que se faça uma investigação mais detalhada das ocorrências associadas a falhas de componentes, identificando-se: número do registro de manutenção corretiva – RMC (caso aplicável); sistema do reator associado à ocorrência; TAG e/ou identificação do componente envolvido; tipo de componente; código do tipo de componente, conforme codificação padronizada no IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997); modo de falha observado (os modos de falha dos componentes também são identificados e, em seguida, codificados segundo padronização do IAEA-TECDOC-930 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997)).
- Neste ponto, muita atenção deve ser dada à interpretação dos registros da instalação, para garantir que uma falha atribuída a um determinado tipo de componente ocorreu, de fato, em algum item incluído em sua fronteira.
- As ocorrências avaliadas como eventos precursores de um iniciador de acidente podem ser classificadas em categorias, seguindo, por exemplo, a lista de categorias de acidentes da base de projeto estabelecida no Relatório de Análise de Segurança (RAS) da instalação.
- Erros humanos ocorridos durante a execução de procedimentos operacionais ou atividades de manutenção são identificados separadamente, podem ser classificados em categorias e devem ser interpretados de modo adequado para que não sejam computados erroneamente no cálculo das taxas / probabilidades de falha dos componentes.

Portanto, todas as informações reunidas neste processo de levantamento e compilação de dados da experiência operacional que estiverem associadas às falhas e às atividades de manutenção de componentes da instalação devem ser usadas na atualização dos módulos de dados de manutenção e dados de falha do sistema PSADB.

3.3 Análise estatística dos dados da experiência operacional para cálculo das estimativas dos parâmetros de confiabilidade dos componentes

Nesta seção são apresentados os tópicos relacionados à análise estatística dos dados obtidos a partir dos registros da instalação. Para que esta análise seja efetuada, as seguintes etapas de levantamento e avaliação dos dados devem ser cumpridas, conforme descrito na seção 3.2:

- Seleção dos eventos anormais / ocorrências não usuais na instalação que podem estar associados a falhas de componentes;
- Definição dos componentes da instalação e modos de falha que são relevantes para a APS da instalação;
- Determinação do número de falhas ocorridas para cada modo de falha do componente; e
- Determinação do tempo de operação e/ou número de demandas associados a cada componente.

É importante ressaltar a importância da aplicação da análise estatística com o propósito de gerar as estimativas das taxas e probabilidades de falha de componentes. Os conceitos necessários para um melhor entendimento desta análise foram definidos na seção 1.2. As seções a seguir detalham os procedimentos da Estatística Clássica que foram implementados no PSADB para estimação dos parâmetros de confiabilidade dos componentes.

3.3.1 Estimação da taxa de falha constante – Caso de amostra homogênea

A taxa de falha constante é denotada por λ e o tempo médio até a falha (*MTTF*) de um componente pode ser calculado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Quando os dados disponíveis correspondem a componentes idênticos que funcionam sob as mesmas condições operacionais e ambientais, tem-se uma amostra homogênea de dados

de falha de componentes. Neste caso, a média da taxa de falha, λ , pode ser estimada pela razão entre o número observado de falhas, n , e o tempo total em operação, T .

O estimador de máxima verossimilhança de λ é dado por:

$$\hat{\lambda} = \frac{\text{número de falhas}}{\text{tempo total em operação}} = \frac{n}{T} \quad (6)$$

O tempo total em operação, T , pode ser determinado pelo tempo calendário ou pelo tempo efetivo em que o componente esteve em operação na instalação.

É importante destacar que a equação (14) é válida somente nas seguintes situações:

- Os instantes de falha para um determinado número de componentes, os quais apresentam a mesma taxa de falha λ , podem ser obtidos a partir dos registros da instalação (todos os componentes devem pertencer a uma mesma população de itens).
- Os instantes de falha de um único componente são registrados durante um determinado período de tempo e sua taxa de falha λ é constante durante este período.
- Uma combinação das duas situações descritas nos itens anteriores, ou seja, vários componentes são observados, cada um pode apresentar várias falhas e estas falhas são registradas na instalação.

3.3.2 Determinação do Intervalo de Confiança (IC) para a taxa de falha constante – Caso de amostra homogênea

A incerteza associada à estimativa da média da taxa de falha pode ser representada por um intervalo de confiança $(1 - \alpha) 100\%$. Este intervalo é definido por limites de confiança inferior e superior (λ_L, λ_U), tais que o “verdadeiro valor” de λ satisfaça à seguinte equação:

$$\Pr(\lambda_L \leq \lambda \leq \lambda_U) = (1 - \alpha)100\% \quad (7)$$

Considerando a ocorrência de n falhas do componente durante um tempo total em operação T , o intervalo de confiança $(1 - \alpha) 100\%$ para λ é formado pelos seguintes limites de confiança inferior e superior (λ_L, λ_U), (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992c) e (KAPUR; LAMBERSON, 1977):

$$\left[\frac{1}{2T} \cdot \chi^2_{1-(\frac{\alpha}{2}), 2n}, \frac{1}{2T} \cdot \chi^2_{(\frac{\alpha}{2}), 2(n+1)} \right] \quad (8)$$

onde $\alpha = 0.10$ para um intervalo de confiança de 90% e $\chi^2_{0.05, v}$ e $\chi^2_{0.95, v}$ correspondem aos percentis 5% e 95%, respectivamente, da distribuição de Qui-Quadrado (χ^2) com v graus de liberdade.

A função INV.QUI (ou CHIINV) do *Microsoft Office Excel* pode ser usada no cálculo dos percentis 5% e 95% da distribuição de Qui-Quadrado. Deve-se entrar com o valor de probabilidade (0.95 ou 0.05) e o número v ($2n$ ou $2(n+1)$) de graus de liberdade, para se obter o respectivo valor da distribuição de Qui-Quadrado. Alguns exemplos dos valores de Qui-Quadrado calculados pelo algoritmo INV.QUI do *Microsoft Office Excel* são mostrados na TABELA 1.

TABELA 1 - Exemplos de valores da distribuição de Qui-Quadrado calculados pela função INV.QUI do programa *Microsoft Office Excel*

n (# falhas)	INV.QUI (0.95, v) $\chi^2_{0.95, 2n}$	INV.QUI (0.05, v) $\chi^2_{0.05, 2(n+1)}$
1	0.103	9.488
2	0.711	12.592
3	1.635	15.507
4	2.733	18.307
5	3.940	21.025

3.3.3 Estimação da probabilidade de falha na demanda – Caso de amostra homogênea

Quando os dados disponíveis correspondem a componentes idênticos que funcionam sob as mesmas condições operacionais e ambientais, tem-se uma amostra homogênea de dados de falha de componentes. Neste caso, a média da probabilidade de falha na demanda, p , pode ser estimada pela razão entre o número observado de falhas na demanda, n_d , e o número total d de demandas requeridas do componente. A probabilidade de falha na demanda está sempre associada a modos de falha específicos do componente, tais como falha na partida, falha para abrir, falha para mudar de estado, etc.

O estimador de máxima verossimilhança de p é dado por:

$$\hat{p} = \frac{n_d}{d} \quad (9)$$

onde n_d é o número de falhas observadas e d é o número total de demandas.

3.3.4 Determinação do Intervalo de Confiança (IC) para a probabilidade de falha na demanda – Caso de amostra homogênea

A distribuição Binomial pode ser usada para descrever o processo de falha ou sucesso nas demandas relacionadas a um componente da instalação. A função de probabilidade Binomial permite que seja calculada a probabilidade p de ocorrência de n_d falhas a partir de uma amostra de d demandas do componente. Esta função é dada por:

$$P(n_d \text{ falhas em } d \text{ demandas}/p) = \binom{d}{n_d} p^{n_d} (1-p)^{d-n_d} = \frac{d!}{n_d!(d-n_d)!} p^{n_d} (1-p)^{d-n_d} \quad (10)$$

para $n_d = 0, 1, \dots, d$.

O método mais usado para a determinação de um intervalo de confiança para $\hat{p}$ envolve o cálculo de percentis da distribuição F de Snedecor.

O limite de confiança inferior P_L para $\hat{p}$ é dado por:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left[\frac{d-n_d+1}{n_d} \right] \cdot F_L\left(\frac{\alpha}{2}, 2(d-n_d+1), 2n_d\right)} \quad (11)$$

onde F_L é o valor da distribuição F de Snedecor para um nível de confiança α e graus de liberdade $v_1 = 2(d - n_d + 1)$ e $v_2 = 2n_d$.

O limite de confiança superior P_U para $\hat{p}$ é dado por:

$$P_U = \frac{1}{1 + \left[\frac{d-n_d}{n_d+1} \right] \cdot \frac{1}{F_U\left(\frac{\alpha}{2}, 2(n_d+1), 2(d-n_d)\right)}} \quad (12)$$

onde F_U é o valor da distribuição F de Snedecor para um nível de confiança α e graus de liberdade $v_1 = 2(n_d + 1)$ e $v_2 = 2(d - n_d)$.

A função INVF (ou FINV) do *Microsoft Office Excel* pode ser usada no cálculo dos percentis 5% e 95% da distribuição F de Snedecor. Deve-se entrar com o valor de probabilidade (se $\alpha = 0.10$, deve-se entrar com o valor 0.05 no campo correspondente ao valor de probabilidade) e os números v_1 e v_2 de graus de liberdade, para se obter o respectivo valor da distribuição F. Alguns exemplos dos valores de F calculados pelo algoritmo INVF do *Microsoft Office Excel* são mostrados na TABELA 2.

TABELA 2 - Exemplos de valores da distribuição F de Snedecor calculados pela função INVF do *Microsoft Office Excel*

Valor de probabilidade da distribuição acumulada F	Graus de Liberdade (v_1)	Graus de Liberdade (v_2)	INVF (0.05, v_1 , v_2)
0.05	2660	122	1.257
0.05	124	2658	1.224

3.3.5 Estimação da taxa de falha e da probabilidade de falha na demanda para o caso em que não há ocorrência de falhas do componente no período de tempo observado (“zero falhas” observadas)

No caso de “zero falhas”, as estimativas da média da taxa de falha $\hat{\lambda}$ e da média da probabilidade de falha na demanda $\hat{p}$ não podem ser determinadas pelas equações (14) e (17), respectivamente.

A abordagem estatística usada no caso de não ocorrerem de falhas no período de observação considerado é explicada nas referências (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992c) e (KAPUR; LAMBERSON, 1977). Se não ocorrerem falhas, então a média da taxa de falha $\hat{\lambda}$ e da probabilidade de falha na demanda $\hat{p}$ são, respectivamente, dadas por:

$$\hat{\lambda} = \frac{\chi^2(0.5,2)}{2T} = \frac{0.693}{T} \quad (13)$$

e

$$\hat{p} = \frac{\chi^2(0.5,2)}{2d} = \frac{0.693}{d} \quad (14)$$

onde $\hat{\lambda}$ é a média da taxa de falha, $\hat{p}$ é a média da probabilidade de falha na demanda e $\chi^2(0.5, 2)$ é o percentil 50% da distribuição de Qui-Quadrado com 2 graus de liberdade.

3.3.6 Determinação do Intervalo de Confiança para a taxa de falha e para a probabilidade de falha na demanda no caso de “zero falhas” observadas

Não há uma interpretação estatística adequada para o cálculo de um limite de confiança inferior para o caso de “zero falhas” observadas. Deste modo, a partir das equações (16) e (20), podem ser determinados os limites superiores dos intervalos de confiança associados às estimativas das médias de λ e p , que são, respectivamente:

$$\lambda_U = \frac{1}{2T} \chi_{\frac{\alpha}{2}, 2}^2 \quad (15)$$

e

$$P_U = \frac{1}{1 + \frac{d}{F_U[\frac{\alpha}{2}, 2, 2d]}} \quad (16)$$

onde $\chi_{\alpha/2, 2}^2$ corresponde ao percentil $(\alpha/2 \times 100)\%$ da distribuição de Qui-quadrado com 2 graus de liberdade e F_U é o percentil $(\alpha/2 \times 100)\%$ da distribuição F de Snedecor para 2 e $2d$ graus de liberdade.

3.3.7 Estimação do fator de erro para a taxa de falha e probabilidade de falha na demanda

Os fatores de erro para a taxa de falha e probabilidade de falha na demanda podem ser estimados com base nas estimativas de $\hat{\lambda}_{95\%}$ e $\hat{p}_{95\%}$, respectivamente.

$$FE(\text{taxa de falha}) = \frac{\hat{\lambda}_{95\%}}{\hat{\lambda}} \quad (17)$$

ou

$$FE(\text{probabilidade de falha na demanda}) = \frac{\hat{p}_{95\%}}{\hat{p}} \quad (18)$$

3.3.8 Estimação do tempo médio de reparo (MTTR)

O tempo médio de reparo de um componente pode ser denotado por $MTTR$ e é estimado por:

$$MTTR = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_k)}{k} \quad (19)$$

onde t_i é o tempo de reparo observado após a ocorrência da i -ésima falha e k é o número de falhas para os quais os tempos de reparo são registrados. Assim, a taxa de reparo μ pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{k}{(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_k)} \quad (20)$$

4 Descrição do Funcionamento do Sistema de Gerenciamento da Base de Dados de Confiabilidade de Componentes dos Reatores Nucleares de Pesquisa do IPEN

4.1 Principais características do sistema PSADB

O sistema PSADB é um sistema de informações que garante ao usuário final o ciclo de vida completo dos dados, desde sua coleta até o armazenamento, processamento e visualização dos dados por consulta na tela ou emissão de relatórios. O sistema é apresentado de forma modular por meio de um *menu* principal, o qual está dividido em grandes grupos (módulos), conforme detalhado e descrito na seção 3.1.2 deste trabalho.

A entrada inicial do sistema se dá por meio do acesso a um endereço disponibilizado em um servidor na *intranet* do IPEN, com o seguinte formato *http://<endereço_ip_servidor>:8085/login.php*.

Após o acesso a este endereço eletrônico, disponibilizado através de um IP em um dos servidores do IPEN, o usuário será redirecionado à tela de entrada do sistema, conforme mostra a *FIGURA 14*. Esta tela permite que o usuário se identifique para ter acesso aos demais módulos.

A imagem mostra a interface de login do sistema PSADB. O formulário tem um cabeçalho azul escuro com o texto "Login - IPEN" em branco. Abaixo, há campos para "Username:" e "Password:", ambos com caixas de texto brancas. Segue um campo "Language:" com uma lista suspensa mostrando "English". Abaixo disso, há o texto "Remember Password:" seguido de uma caixa de seleção desmarcada. No rodapé do formulário, há um botão azul com o texto "Submit" em branco.

FIGURA 14 - Tela de acesso ao sistema PSADB

O sistema PSADB foi desenvolvido de modo a permitir a utilização de dois idiomas: o “Português” e o “Inglês”. Para selecionar o idioma, basta alterar a opção “Idioma” no canto superior esquerdo da tela principal, como mostra a *FIGURA 15*.

FIGURA 15 – Tela de escolha do idioma a ser usado no PSADB.

4.2 Cadastro de usuário e atribuição do nível de acesso

A base de dados foi programada de modo a permitir que as informações nela contidas sejam consultadas por todos os usuários da rede corporativa (*intranet*) do IPEN, por meio de um sistema que será gerenciado por um administrador e acessado por indivíduos que estejam devidamente cadastrados.

Dependendo do perfil definido pelo administrador do sistema, o usuário possuirá atribuições e visualizações diferentes dos módulos do sistema, conforme detalhado anteriormente na seção 3.1.2.1.

O usuário com perfil “*administrador do sistema*” é o único que terá acesso irrestrito a todos os módulos do sistema e poderá realizar ações de inclusão, alteração e exclusão de dados do PSADB. O usuário com perfil “*usuário – entrada de dados*” poderá atualizar, com a supervisão do administrador, dados de operação, falha e manutenção de componentes. O usuário com perfil “*usuário – consulta de dados*” poderá consultar os dados armazenados no PSADB e solicitar a geração de um relatório com as estimativas dos parâmetros de confiabilidade de componentes. Um exemplo da tela que apresenta a lista de usuários cadastrados e seus respectivos perfis é mostrado na FIGURA 16.

É importante citar que o usuário que tiver permissão para atualizar a base de dados (incluir / alterar / excluir registro) deverá conhecer a estrutura do PSADB no que diz respeito à hierarquia dos dados, visto que a eliminação dos dados deverá ser realizada da hierarquia mais baixa para a hierarquia mais alta (Componente → Subsistema → Sistema → Área → Instalação).

Idioma: Português(Brasil) ▼	Adicionar Novo	Elimina Seleccionados	Exportação selecionada	Impressão selecionada
Logado Como patricia Log Out				
Usuários				
Cadastro de Itens »				
Dados de Operação »				
Dados de Manutenção »				
Dados de Falha »				
Relatórios »				

	Nome	Função	Imagem	Data Início
	☐ patricia	administrador		25/01/2015
	☐ vagner	user	foto_vagner.png	25/01/2015
	☐ Delvonei	consulta		07/04/2015
	☐ Terremoto	user	homem_certificado2.jpg	17/11/2015
	☐ christian	consulta		13/04/2016
	☐ Antonio Souza	consulta		10/05/2016

FIGURA 16 - Tela de cadastro de usuários no sistema PSADB

4.3 Consulta aos dados armazenados em cada módulo

Ao acessar a tela principal do sistema, qualquer um dos menus selecionados levará à tela de consulta de cada módulo. A FIGURA 17 mostra a tela de consulta dos dados referentes ao módulo principal “Cadastro de Itens”, com a seleção da opção “Instalação”.

Idioma: Português(Brasil) ▼	Adicionar Novo	Elimina Seleccionados	Exportação selecionada	Impressão selecionada
Logado Como patricia Log Out				
Usuários				
Cadastro de Itens » Instalação »				
Dados de Operação »				
Dados de Manutenção »				
Dados de Falha »				
Relatórios »				

	Instalação	Código Instalação	Descrição Instalação	Imagem Instalação
	☐ Reator de Pesquisa IEA-R1	IEA-R1	Reator tipo piscina aberta Combustível tipo MTR (Materials Testing Reactor) Po Mais...	Reator IEA-R1 - todas as áreas.jpg
	☐ Reator de Pesquisa IPEN/MB-01	IPEN/MB-01	Reator de pesquisa potência zero; unidade crítica	reator6.jpg

FIGURA 17 – Consulta aos dados armazenados no módulo “Cadastro de Itens” na opção “Instalação”

4.4 Funções que podem ser executadas em cada módulo

Para cada uma das telas do PSADB, existem opções padronizadas para a execução de funções, tais como:

- Adicionar Novo: permite ao usuário incluir um novo registro em algum módulo do sistema.

- Elimina Seleccionados: permite ao usuário excluir algum registro armazenado em algum módulo do sistema.

- Exportação Seleccionada: permite ao usuário exportar registros selecionados na tela de algum módulo do PSADB para armazenamento em arquivos com outros tipos de formato, conforme apresentado na *FIGURA 18*.

FIGURA 18 – Exportação dos dados armazenados no PSADB para arquivos eletrônicos com outros formatos

- Impressão Seleccionada: permite ao usuário imprimir os dados selecionados na tela de algum módulo do PSADB, conforme mostrado na *FIGURA 19* e na *FIGURA 20*.

- Funções associadas aos ícones apresentados na tela do PSADB:

- Lápis (editar): o ícone “editar” permite que os dados referentes a um registro específico sejam alterados.

- Duplicar (copiar): o ícone “copiar” permite que os dados referentes a um determinado registro sejam duplicados, de modo a facilitar o preenchimento de novos dados com as mesmas características.

- Lupa (exibir): o ícone “exibir” permite que os dados referentes a um determinado registro sejam apresentados num formato adequado para sua leitura na tela do PSADB, conforme mostrado na *FIGURA 21*.

Imprimir esta página Importar Exportar os Resultados

Ítems Encontrados: 12 Página 1 de 1 Registros por Página: 20

Impressão selecionada

Exportação selecionada

Elimina Seleccionados

Adicionar Novo

Instalação	Área	Síglia Sistema	Nome Sistema	Descrição Sistema	Imagem Sistema
☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio Energia Elétrica - Sala dos Geradores	EE	Distribuição Elétrica Essencial	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: Mais....
☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Cabine de Alta Tensão	EN	Distribuição Elétrica Normal	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: Mais....
☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio Energia Elétrica - Sala dos Geradores	EV	Distribuição Elétrica Vital	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: Mais....
☐ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio do Reator	IEAR1-sist	Reator IEA-R1 - todos os sistemas	xxx
☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio do Reator - Casa de máquinas	RA	Retratamento de Água	xxx
☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio do Reator	SRE	Sistema de Resfriamento de Emergência	A função do SRE é resfriar o núcleo no caso de ocorrência de um acidente de perd Mais....

☐ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio do Reator - Casa de máquinas	SRR	Sistema de Resfriamento do Reator	Sistema cuja função é remover o calor gerado no núcleo do reator e transferir es Mais....

☒ Reator de Pesquisa IEA-R1	Torres de Resfriamento	SRR-TR	SRR - Torres de Resfriamento	xxx
☐ Reator de Pesquisa IEA-R1	Prédio do Reator - SVAC	SVAC - IR	Insuflamento e Recirculação	Ativar o Windows Acesse Configurações para ativar o Windows.	

FIGURA 19 – Seleção de dados armazenados no PSADB para impressão

Sigla Sistema	Nome Sistema	Descrição Sistema	Imagem Sistema
EE - Sala dos	Distribuição Elétrica Essencial	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: ...	
EN - Sala dos	Distribuição Elétrica Normal	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: ...	
EV - Sala dos	Distribuição Elétrica Vital	The electric distribution system is categorized as normal, essential, and vital: ...	
Casa de máquinas	Retratamento de Água	xxx	
SRE	Sistema de Resfriamento de Emergência	A função do SRE é resfriar o núcleo no caso de ocorrência de um acidente de perd ...
SRR-TR	SRR - Torres de Resfriamento	xxx	

FIGURA 20 – Tela que apresenta a impressão dos dados selecionados

Operação Componente, Exibir Registro [Id:29, Modo Operação:Operação contínua]	
Instalação	Reator de Pesquisa IEA-R1
Área	Prédio do Reator - Casa de máquinas
Sistema	Sistema de Resfriamento do Reator
Subsistema	Circuito Primário
Nome Componente	bomba hidráulica B101-A
Tag Componente	CP-BOM-01
Tipo / Subtipo Componente	PMA01 - pump - motor driven
Modo de Operação	Operação contínua
Tempo Oper. Anterior Instal. Horímetro	4.309,87
Número Demandas Anterior Instal. Contador	138
Data Instalação - Horímetro	29/03/2002
Data Instalação - Contador	09/05/2013
Data Atual	29/03/2002
Leitura Horímetro (horas)	0,00
Leitura Contador (número de demandas)	0
Tempo de Operação Acumulado (horas)	4.309,87
Número de Demandas Acumulado	138,00
Observações	tempo de observação iniciado em 01/01/1999
<div> Voltar à Lista Editar >>> </div>	

FIGURA 21 – Seleção da opção “exibir” para um registro armazenado no módulo “Dados de Operação → Componente”

4.5 Geração do relatório contendo estimativas dos parâmetros de confiabilidade de componentes

O principal relatório do sistema PSADB é gerado a partir dos dados armazenados nos módulos de cadastro de itens, dados de operação e dados de falhas de componentes. Este relatório é de fundamental importância para que os dados armazenados no PSADB sejam processados e forneçam as estimativas dos parâmetros de confiabilidade / disponibilidade que serão usados nas avaliações de segurança dos reatores de pesquisa em estudo.

A **FIGURA 22** ilustra a saída do relatório denominado “Relatório 1 - Taxas / Probabilidades de Falha de Componentes”.

# Componente	Tempo Operação Acumulado	# Demandas	Modo de Falha	# Falhas	Taxa de Falha (1/h)	Probabilidade de Falha (1/demanda)	IC 90% Limite Inferior	IC 90% Limite Superior	Data Atual
	2.536460e+4	707	A - Todos os modos (All Modes)	0	2.730000e-5	9.801980e-4	0.000000e+0	1.180000e-4	2009-12-31 00:00:00
	1.093610e+4	357	B - Degradado (Degraded)	2	1.830000e-4	0.000000e+0	3.250702e-5	5.757000e-4	2009-12-31 00:00:00
	1.093610e+4	357	R - Falha durante a operação (Failure to run)	3	2.740000e-4	0.000000e+0	7.475242e-5	7.090000e-4	2009-12-31 00:00:00
	0.000000e+0	357	S - Falha na partida (Failure to start)	1	0.000000e+0	2.801120e-3	1.437224e-4	1.356077e-2	2009-12-31 00:00:00
	2.528567e+4	926	B - Degradado (Degraded)	15	5.930000e-4	0.000000e+0	3.656814e-4	8.656000e-4	2009-12-31 00:00:00
	2.528567e+4	926	R - Falha durante a operação (Failure to run)	2	7.900000e-5	0.000000e+0	1.405935e-5	2.490000e-4	2009-12-31 00:00:00
	0.000000e+0	926	S - Falha na partida (Failure to start)	1	0.000000e+0	1.079914e-3	5.541406e-5	5.262965e-3	2009-12-31 00:00:00
	2.528567e+4	926	Y - Vazamento (Leakage)	26	1.028000e-3	0.000000e+0	3.656814e-4	8.656000e-4	2009-12-31 00:00:00

FIGURA 22 - Relatório de Taxas / Probabilidades de Falha de Componentes

Para a geração deste relatório, os seguintes passos devem ser executados pelo programa para reunir e processar as informações armazenadas no PSADB, considerando o modelo de representação deste sistema ilustrado na FIGURA 13:

Coluna 1: Tipo / Subtipo de Componente

Nesta coluna do relatório devem ser listados todos os tipos/subtipos de componentes cadastrados no PSADB. Assim, esta coluna é preenchida a partir da junção de dois campos da tabela *tab_operation_component*, cujos conteúdos são representados pelos campos *component_type_description* (armazenamento da descrição de cada tipo de componente) e *sub_type* (armazenamento da informação indicando o código do tipo e o subtipo de cada componente).

Coluna 2: Código da Instalação

Esta coluna do relatório é preenchida a partir da informação armazenada na tabela *tab_installation*, cujo conteúdo é representado pelo campo *installation_code*, o qual armazena o código da instalação à qual cada tipo/subtipo de componente está associado.

Coluna 3: # Componentes

Nesta coluna deve ser computado o número total de componentes da instalação que foram classificados em cada tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. Estes componentes podem possuir identificações (TAGs) diferentes na instalação, mas neste relatório são agrupados de acordo com o tipo/subtipo de componente em que foram classificados.

Coluna 4: Tempo Operação Acumulado

Esta coluna deve ser preenchida com o resultado da soma das leituras de todos os horímetros associados ao tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. Nesta soma são considerados os valores armazenados no campo *Leitura Horímetro (horas)* somados aos valores armazenados no campo *Tempo Oper. Anterior Instal. Horímetro*. Ambos os campos pertencem à tabela *tab_operation_component*.

Coluna 5: # Demandas

Esta coluna deve ser preenchida com o resultado da soma das leituras de todos os contadores associados ao tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. Nesta soma são considerados os valores armazenados no campo *Leitura Contador (número de demandas)* somados aos valores armazenados no campo *Número Demandas Anterior Instal. Contador*. Ambos os campos pertencem à tabela *tab_operation_component*.

Coluna 6: Modo de Falha

Esta coluna é preenchida com a informação contida na tabela *tab_component_failure_event*, em especial no campo *failure_mode*. Esta informação está associada com a possibilidade de ocorrerem diferentes modos de falha para cada tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. Caso algum tipo/subtipo de componente não tenha apresentado falhas no período observado, a coluna 6 será preenchida com a opção “A - Todos os modos (*All Modes*)” e a coluna 7, a qual contem o registro do número observado de falhas, será preenchida com o valor 0 (zero).

Coluna 7: # Falhas

Esta coluna é preenchida com o número total de falhas ocorridas para o tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1, considerando o modo de falha indicado na coluna 6. Este cálculo deve ser efetuado pelo programa, considerando o número de repetições registradas para cada modo de falha armazenado no campo *failure_mode* da tabela *tab_component_failure_event*.

Coluna 8: Taxa de Falha (1/h)

Esta coluna deve ser preenchida com a estimativa da taxa de falha associada ao modo de falha indicado na coluna 6 do tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. A taxa de falha é o parâmetro de interesse para modos de falha que estão relacionados ao tempo de operação do componente. A estimativa da taxa de falha é calculada substituindo os valores apresentados nas colunas 7 e 4 na equação (6). Caso o valor indicado na coluna 7 seja igual a 0 (zero falhas), a estimativa da taxa de falha deve ser calculada pela equação (13).

Coluna 9: Probabilidade Falha na Demanda (1/d)

Esta coluna deve ser preenchida com a estimativa da probabilidade de falha na demanda associada ao modo de falha indicado na coluna 6 do tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1. A probabilidade de falha é o parâmetro de interesse para modos de falha que estão

relacionados à demanda do componente. A estimativa da probabilidade de falha na demanda é calculada substituindo os valores apresentados nas colunas 7 e 5 na equação (9). Caso o valor indicado na coluna 7 seja igual a 0 (zero falhas), a estimativa da taxa de falha deve ser calculada pela equação (14).

Coluna 10: Limite inferior do Intervalo de Confiança de 90% para o parâmetro calculado na Coluna 8 / Coluna 9

No caso em que a taxa de falha (valor apresentado na coluna 8) é o parâmetro de interesse associado ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite inferior para o Intervalo de Confiança de 90% para este parâmetro deve ser calculado com base na expressão atribuída a λ_L na equação (8).

No caso em que a probabilidade de falha na demanda (valor apresentado na coluna 9) é o parâmetro de interesse associado ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite inferior para o Intervalo de Confiança de 90% para este parâmetro deve ser calculado com base na equação (11).

No caso em que não tenham sido observadas falhas do tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1 em relação ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite inferior do parâmetro calculado na coluna 8 / coluna 9 deve-se ser igual a 0 (zero).

Coluna 11: Limite superior do Intervalo de Confiança de 90% para o parâmetro calculado na Coluna 8 / Coluna 9

No caso em que a taxa de falha (valor apresentado na coluna 8) é o parâmetro de interesse associado ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite superior para o Intervalo de Confiança de 90% para este parâmetro deve ser calculado com base na expressão atribuída a λ_U na equação (8).

No caso em que a probabilidade de falha na demanda (valor apresentado na coluna 9) é o parâmetro de interesse associado ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite superior para o Intervalo de Confiança de 90% para este parâmetro deve ser calculado com base na equação (12).

No caso em que não tenham sido observadas falhas do tipo/subtipo de componente indicado na coluna 1 em relação ao modo de falha indicado na coluna 6, o limite superior do parâmetro calculado na coluna 8 / coluna 9 deve-se ser calculado com base nas equações (15) / (16), respectivamente.

5 Conclusão

Neste trabalho foram descritos o projeto conceitual, o conteúdo e a estrutura do sistema de gerenciamento da base de dados desenvolvida no IPEN, cujas principais funções são armazenar e processar dados relevantes para aplicação em Análise Probabilística de Segurança dos reatores nucleares de pesquisa em operação nesta instituição. Estes dados compreendem, principalmente, descrições dos itens das instalações, características técnicas de componentes, informações sobre operação, ocorrências anormais, falhas e atividades de manutenção executadas em componentes, estimativas dos parâmetros de confiabilidade e disponibilidade de componentes, assim como arquivos de imagens que ilustrem os itens em estudo.

Um sistema informatizado para gerenciamento desta base de dados foi desenvolvido, ou seja, o programa computacional que realiza as funções de armazenamento, recuperação, controle, eliminação e processamento dos dados e que pode ser executado na rede corporativa (*intranet*) do IPEN. Foi usada a linguagem de programação *PHP* para acesso e manuseio da base de dados em *MySQL*, considerando a linguagem de consulta estruturada *SQL*.

O aspecto mais importante do sistema computacional descrito neste trabalho é sua capacidade de integrar o trabalho de levantamento e avaliação da grande quantidade de informações provenientes da experiência operacional dos reatores de pesquisa do IPEN com a metodologia de análise de dados de confiabilidade. O PSADB, como é denominado o sistema de gerenciamento da base de dados de confiabilidade de componentes dos reatores nucleares do IPEN, aprimorou a tarefa de atualização dos dados e permitiu que os dados obtidos fossem processados para aplicação nos cálculos de estimativas dos parâmetros de confiabilidade e disponibilidade dos componentes. Cabe citar que, antes do desenvolvimento deste sistema, todos os dados citados anteriormente eram armazenados e processados em planilhas eletrônicas do Microsoft Office Excel e não podiam ser acessados, de modo direto e seguro, por outros usuários da rede corporativa do IPEN.

A estrutura modular da base de dados e os recursos de programação disponíveis para o PSADB permitem, também, que sejam desenvolvidos módulos adicionais para compilação dos dados sobre eventos iniciadores de acidente, falhas de causa comum de componentes e falhas atribuídas a fatores humanos. Estes módulos adicionais estão fora do escopo deste projeto acadêmico, porém estão nos planos da equipe responsável pela análise de segurança dos reatores do IPEN.

O desenvolvimento deste trabalho, além de atender às necessidades dos especialistas em Análise Probabilística de Segurança e das equipes de operação e manutenção dos reatores nucleares de pesquisa do IPEN, estabelece neste instituto um sistema moderno para que dados específicos sobre a segurança de suas instalações sejam processados.

Finalmente, este trabalho está inserido em uma linha de pesquisa que ainda pode ser explorada em trabalhos acadêmicos futuros. Dentre os projetos que podem dar continuidade a este estudo, pode-se citar a inclusão de um módulo na base de dados que permita a aplicação da metodologia de atualização Bayesiana dos dados de confiabilidade de componentes gerados no sistema atual. A motivação para o uso de técnicas Bayesianas está na possibilidade de gerar distribuições de probabilidade para a incerteza associada aos parâmetros estimados, uma vez que os métodos da estatística clássica abordam somente a determinação de intervalos de confiança. Outro ponto importante na abordagem Bayesiana é a possibilidade de considerar na análise estatística uma eventual falta de informações a respeito das falhas de determinados componentes e computar eventos ocorridos em outras instalações, com componentes similares e que operam nas mesmas condições ambientais.

Apêndice A – Código fonte para criação das tabelas e objetos da base de dados

```
SET @OLD_UNIQUE_CHECKS=@@UNIQUE_CHECKS, UNIQUE_CHECKS=0;
SET @OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS=@@FOREIGN_KEY_CHECKS,
FOREIGN_KEY_CHECKS=0;
SET @OLD_SQL_MODE=@@SQL_MODE,
SQL_MODE='TRADITIONAL,ALLOW_INVALID_DATES';
```

```
-----
```

```
-- Schema ipen
```

```
-----
```

```
CREATE SCHEMA IF NOT EXISTS `ipen` DEFAULT CHARACTER SET latin1 ;
USE `ipen` ;
```

```
-----
```

```
-- Table `ipen`.`tab_installation`
```

```
-----
```

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_installation` (
  `id_installation` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
  `installation_code` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT "",
  `installation_name` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT "",
  `installation_description` VARCHAR(2000) NULL COMMENT "",
  `image_installation` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  PRIMARY KEY (`id_installation`) COMMENT "")
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;
```

```
-----
```

```
-- Table `ipen`.`tab_area`
```

```
-----
```

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_area` (
  `id_area` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
```

```

`area_code` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
`area_description` VARCHAR(2000) NOT NULL COMMENT ",
`image_area` VARCHAR(2000) NULL COMMENT ",
`fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_area`, `fk_id_installation`) COMMENT ",
INDEX `fk_tab_area_tab_installation_idx` (`fk_id_installation` ASC) COMMENT ",
CONSTRAINT `fk_tab_area_tab_installation`
FOREIGN KEY (`fk_id_installation`)
REFERENCES `ipen`.`tab_installation` (`id_installation`)
ON DELETE CASCADE
ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-----
-- Table `ipen`.`tab_component`
-----

```

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_component` (
`id_component` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`component_tag` VARCHAR(15) NOT NULL DEFAULT " COMMENT ",
`NAME` VARCHAR(100) NOT NULL COMMENT ",
`component_type_code` VARCHAR(50) NULL COMMENT ",
`FUNCTION` VARCHAR(200) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`LOCATION` VARCHAR(60) NULL COMMENT ",
`BOUNDARIES` VARCHAR(300) NOT NULL COMMENT ",
`MANUFACTURER` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
`MODEL` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
`SERIAL_NUMBER` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
`DATE_CONSTRUCTION` DATE NULL COMMENT ",
`DATE_INSTALLATION` DATE NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`OPERATION_STARTING_DATE` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`TEST_PROCEDURE` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`REPLACEMENT_DATE` DATE NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Image_component` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",

```

```

`sub_type` VARCHAR(20) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`characteristics` VARCHAR(300) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Operation_mode` INT(11) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`sub_type_seq` INT(11) NULL COMMENT ",
`fk_id_subsystem` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`fk_id_system` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_component`, `fk_id_subsystem`, `fk_id_system`, `fk_id_area`,
`fk_id_installation`) COMMENT ",
UNIQUE INDEX `component_tag_UNIQUE` (`component_tag` ASC) COMMENT ")
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-----
-- Table `ipen`.`tab_component_maintenance`
-----

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_component_maintenance` (
`id_component_maintenance` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`Component_Tag` VARCHAR(10) NOT NULL COMMENT ",
`Component_Type_Code` VARCHAR(10) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Data_Collection_Start` DATETIME NULL COMMENT ",
`maintenance_type` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`sector` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`activity_type` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`record_number` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Remarks` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Data_Collection_End` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`sub_type` VARCHAR(20) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`sub_type_seq` INT(11) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`tab_component_id_component` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_subsystem` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_system` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT ",

```

```

`tab_component_fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_component_maintenance`, `tab_component_id_component`,
`tab_component_fk_id_subsystem`, `tab_component_fk_id_system`,
`tab_component_fk_id_area`, `tab_component_fk_id_installation`) COMMENT ",
INDEX `fk_tab_component_maintenance_tab_component1_idx`
(`tab_component_id_component` ASC, `tab_component_fk_id_subsystem` ASC,
`tab_component_fk_id_system` ASC, `tab_component_fk_id_area` ASC,
`tab_component_fk_id_installation` ASC) COMMENT ",
CONSTRAINT `fk_tab_component_maintenance_tab_component1`
FOREIGN KEY (`tab_component_id_component`, `tab_component_fk_id_subsystem`,
`tab_component_fk_id_system`, `tab_component_fk_id_area`,
`tab_component_fk_id_installation`)
REFERENCES `ipen`.`tab_component` (`id_component`, `fk_id_subsystem`,
`fk_id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
ON DELETE NO ACTION
ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
AUTO_INCREMENT = 7
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-- Table `ipen`.`tab_component_type`

```

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_component_type` (
`id_component_type` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`component_type_code` VARCHAR(10) NOT NULL DEFAULT " COMMENT ",
`component_type_description` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
UNIQUE INDEX `component_type_code_UNIQUE` (`component_type_code` ASC)
COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_component_type`) COMMENT ")
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

-- Table `ipen`.`tab\_ipen\_users\_MAIUSC`

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_ipen_users_MAIUSC` (
  `id` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
  `username` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT "",
  `password` VARCHAR(8) NOT NULL COMMENT "",
  `role` VARCHAR(20) NOT NULL COMMENT "",
  `created` DATETIME NOT NULL COMMENT "",
  `Image_user` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  PRIMARY KEY (`id`) COMMENT "")
ENGINE = InnoDB
AUTO_INCREMENT = 12
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;
```

-- Table `ipen`.`tab\_operation\_component`

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_operation_component` (
  `id_operation_component` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
  `Component_Tag` VARCHAR(10) NOT NULL COMMENT "",
  `Data_Coleta_Ini_Horimetro` DATETIME NULL COMMENT "",
  `Contador_Coleta_Atual_Demandas` INT(11) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `Horimetro_Coleta_Atual_Horas` DECIMAL(10,2) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `Data_Coleta_Ini_Contador` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `Data_Coleta_Atual` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `Remarks` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `sub_type` VARCHAR(20) NULL COMMENT "",
  `sub_type_seq` INT(11) NULL COMMENT "",
  `tab_component_id_component` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `tab_component_fk_id_subsystem` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `tab_component_fk_id_system` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `tab_component_fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `tab_component_fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
```



```

`fk_id_operation_mode` VARCHAR(50) NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_operation_component`, `tab_component_id_component`,
`tab_component_fk_id_subsystem`, `tab_component_fk_id_system`,
`tab_component_fk_id_area`, `tab_component_fk_id_installation`) COMMENT ",
INDEX `fk_tab_operation_component_tab_component1_idx`
(`tab_component_id_component` ASC, `tab_component_fk_id_subsystem` ASC,
`tab_component_fk_id_system` ASC, `tab_component_fk_id_area` ASC,
`tab_component_fk_id_installation` ASC) COMMENT ",
CONSTRAINT `fk_tab_operation_component_tab_component1`
FOREIGN KEY (`tab_component_id_component`, `tab_component_fk_id_subsystem`,
`tab_component_fk_id_system`, `tab_component_fk_id_area`,
`tab_component_fk_id_installation`)
REFERENCES `ipen`.`tab_component` (`id_component`, `fk_id_subsystem`,
`fk_id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
ON DELETE NO ACTION
ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
AUTO_INCREMENT = 15
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-- Table `ipen`.`tab_operation_mode`

```

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_operation_mode` (
`id_operation_mode` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`operation_mode_description` VARCHAR(50) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_operation_mode`) COMMENT ")
ENGINE = InnoDB
AUTO_INCREMENT = 3
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-----
-- Table `ipen`.`tab_system`
-----

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_system` (
  `id_system` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
  `system_code` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT "",
  `SYSTEM_NAME` VARCHAR(70) NOT NULL COMMENT "",
  `SYSTEM_DESCRIPTION` VARCHAR(2000) NULL COMMENT "",
  `Image_system` VARCHAR(2000) NULL COMMENT "",
  `fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  PRIMARY KEY (`id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`) COMMENT "",
  INDEX `fk_tab_system_tab_area1_idx` (`fk_id_area` ASC, `fk_id_installation` ASC)
  COMMENT "",
  CONSTRAINT `fk_tab_system_tab_area1`
  FOREIGN KEY (`fk_id_area`, `fk_id_installation`)
  REFERENCES `ipen`.`tab_area` (`id_area`, `fk_id_installation`)
  ON DELETE CASCADE
  ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-----
-- Table `ipen`.`tab_subsystem`
-----

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_subsystem` (
  `id_subsystem` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT "",
  `subsystem_code` VARCHAR(50) NULL COMMENT "",
  `subsystem_name` VARCHAR(70) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `SUBSYSTEM_DESCRIPTION` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT
  "",
  `Image_subsystem` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT "",
  `fk_id_system` INT(11) NOT NULL COMMENT "",
  `fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT "",

```

```
`fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_subsystem`, `fk_id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
COMMENT ",
INDEX `fk_tab_subsystem_tab_system1_idx` (`fk_id_system` ASC, `fk_id_area` ASC,
`fk_id_installation` ASC) COMMENT ",
CONSTRAINT `fk_tab_subsystem_tab_system1`
FOREIGN KEY (`fk_id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
REFERENCES `ipen`.`tab_system` (`id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
ON DELETE CASCADE
ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;
```

```
-- -----
-- Table `ipen`.`tab_component_failure_event`
-- -----

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_component_failure_event` (
`id_component_failure_event` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`Component_Tag` VARCHAR(10) NOT NULL COMMENT ",
`Component_Type_Code` VARCHAR(20) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Data_Collection_Start` DATETIME NULL COMMENT ",
`Failure_Cause` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Failure_Report_No` VARCHAR(50) NULL COMMENT ",
`Data_Failure_Detection` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Data_Failure_Recovery` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Failure_Mode` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Data_Failure_Occurrence` DATETIME NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Failure_Description` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`Effect_Failure` VARCHAR(100) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",
`tab_component_id_component` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_subsystem` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_system` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_area` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
`tab_component_fk_id_installation` INT(11) NOT NULL COMMENT ",
```

```

`Actions_Taken` VARCHAR(100) NULL COMMENT ",
`Repair_Effort` VARCHAR(100) NULL COMMENT ",
`Man_Hours` VARCHAR(100) NULL COMMENT ",
`Active_Repair_Hours` INT(11) NULL COMMENT ",
`Source_Information` VARCHAR(100) NULL COMMENT ",
`Name_Responsible_Technician` VARCHAR(45) NULL COMMENT ",
PRIMARY KEY (`id_component_failure_event`, `tab_component_id_component`,
`tab_component_fk_id_subsystem`, `tab_component_fk_id_system`,
`tab_component_fk_id_area`, `tab_component_fk_id_installation`) COMMENT ",
INDEX `fk_tab_component_maintenance_tab_component1_idx`
(`tab_component_id_component` ASC, `tab_component_fk_id_subsystem` ASC,
`tab_component_fk_id_system` ASC, `tab_component_fk_id_area` ASC,
`tab_component_fk_id_installation` ASC) COMMENT ",
CONSTRAINT `fk_tab_component_maintenance_tab_component10`
FOREIGN KEY (`tab_component_id_component`, `tab_component_fk_id_subsystem`,
`tab_component_fk_id_system`, `tab_component_fk_id_area`,
`tab_component_fk_id_installation`)
REFERENCES `ipen`.`tab_component` (`id_component`, `fk_id_subsystem`,
`fk_id_system`, `fk_id_area`, `fk_id_installation`)
ON DELETE NO ACTION
ON UPDATE NO ACTION)
ENGINE = InnoDB
AUTO_INCREMENT = 7
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;

```

```

-- Table `ipen`.`tab_ipen_users`

```

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `ipen`.`tab_ipen_users` (
`id` INT(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT COMMENT ",
`username` VARCHAR(50) NOT NULL COMMENT ",
`password` VARCHAR(8) NOT NULL COMMENT ",
`role` VARCHAR(20) NOT NULL COMMENT ",
`created` DATETIME NOT NULL COMMENT ",

```

```
`Image_user` VARCHAR(2000) NULL DEFAULT NULL COMMENT ",  
PRIMARY KEY (`id`) COMMENT ")  
ENGINE = InnoDB  
AUTO_INCREMENT = 12  
DEFAULT CHARACTER SET = utf8;  
  
SET SQL_MODE=@OLD_SQL_MODE;  
SET FOREIGN_KEY_CHECKS=@OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS;  
SET UNIQUE_CHECKS=@OLD_UNIQUE_CHECKS;
```

Glossário

Item: É um termo genérico usado para representar indistintamente qualquer estrutura, sistema, subsistema, equipamento, componente, peça ou material que possa ser considerado individualmente e testado separadamente.

Fronteiras de um item: Na definição das fronteiras de um item devem ser incluídos todos os itens que são necessários para que sua função seja cumprida.

Componente: Item discreto considerado indivisível para fins de análise. Pode ser constituído por uma ou mais partes. É uma entidade de *hardware* para a qual são coletados os dados de falha. Existem componentes constituídos por uma única parte (ex.: absorvedor de vibração, motor síncrono, fusível, conector, chave, etc.) e componentes multipartes (válvula motorizada, transformador, bateria, amplificador e/ou módulo comparador, etc.).

Componente Ativo: É um componente que tem partes móveis, projetado para executar funções que exijam mudança de seu estado. Exemplos de componentes ativos são: bombas, motores, relés, etc.

Componente Passivo: É um componente que não possui partes móveis, projetado para operar sem que seja necessária a mudança de sua configuração ou de suas propriedades. Exemplos de componentes passivos são: tubulações, fiações elétricas, tanques, trocadores de calor, etc.

Sistema: É um conjunto de itens (estruturas, equipamentos, componentes e/ou peças) que funcionam como uma estrutura organizada para realizar uma determinada função.

Subsistema: É um conjunto de itens adjacentes que realizam uma tarefa específica de um sistema.

Degradação: Redução gradual do desempenho de um item ao longo do tempo.

Falha: Fim da capacidade de um item realizar as funções requeridas.

Falha Aleatória: Qualquer falha cuja causa e/ou mecanismo faz com que o seu instante de ocorrência seja imprevisível, e que pode ser prevista somente no sentido probabilístico.

Causa da Falha: Evento ou sequência de eventos que impedem que o item realize a função designada. São as circunstâncias durante o projeto, fabricação ou uso que induzem a um mecanismo de falha do item.

Mecanismo de Falha: Processo físico, químico ou outro, que resulta em falha do item.

Modo de Falha: É a maneira pela qual o item pára de realizar a função designada. Em outras palavras, é a descrição da falha, em que são identificados os requisitos funcionais que não estão sendo atendidos.

Falhas de Causa Comum: São falhas que afetam múltiplos itens, os quais podem ou não ser redundantes, e que são causadas por falha simultânea em itens redundantes ou pela falha de alguma condição comum, como por exemplo, sistema de suporte comum, localização comum, etc.

Classificação da falha quanto à severidade:

Falha Catastrófica: Perda súbita e completa de uma ou mais funções fundamentais do item. É necessário que uma ação corretiva recupere a função do item.

Falha Degradada: Corresponde à falha cuja evolução se processa gradualmente e que não causa a perda total de uma função, mas a compromete através da redução, aumento ou erro da saída. Com o decorrer do tempo estas falhas podem se tornar catastróficas.

Falha Incipiente: Envolve falhas que são produzidas por uma imperfeição no estado ou condição operacional inadequada do item que, caso não seja eliminada, poderá provocar a ocorrência de uma falha do tipo catastrófica ou degradada. Exemplos de falhas do tipo incipiente são: vazamento através do selo das bombas, vibração, sobreaquecimento de um item.

Efeito da Falha: Caracteriza a importância da falha do item quanto ao efeito produzido sobre o subsistema / sistema / instalação.

Modo de Detecção da Falha: Recurso ou procedimento usado para reconhecer que o item apresenta uma falha.

Classificação da falha quanto à unidade de medida:

Falha relacionada com o tempo: É a ocorrência da falha de um item que está num modo de operação contínuo. Ex. falhas/hora, falhas/minuto, etc.

Falha relacionada com a demanda: É a ocorrência de falha de um item quando este é demandado para iniciar sua operação ou para mudar de estado operacional. Ex. falhas/demanda, falhas/ciclo, etc.

Tempo de Vida: Fixadas as condições de uso, e para um dado modo de falha, define-se o tempo de vida de um item como seu tempo total em serviço, isto é, o tempo decorrido desde o instante em que é posto em funcionamento até o instante em que, pela primeira vez, uma falha ou qualquer outro evento interrompe totalmente sua operação.

Distribuição de Vida: Distribuição de probabilidade do tempo de vida (ou “tempo de falha” ou “tempo até a falha”) de uma população de itens.

Vida Média: Média aritmética dos tempos de vida de uma população de itens nominalmente idênticos.

Vida Útil: É o período de tempo estabelecido para o item desempenhar sua função, em condições especificadas.

Tempo de Operação: É o período de tempo acumulado durante o qual um item realiza sua função, em condições especificadas.

Tempo em Espera (*standby*): É o período de tempo acumulado durante o qual um item realiza sua função como item em espera / reserva.

Tempo Inoperante (*outage*): É o período de tempo no qual o item não está disponível para o serviço especificado, devido a uma falha ou a uma atividade de manutenção.

Tempo de Reparo: É o tempo contado a partir do momento em que a falha do item é revelada e inclui o tempo para analisar a falha, preparar o reparo, reparar a falha, testar o item, qualificá-lo e retorná-lo ao serviço. O Tempo de Reparo é, portanto, o tempo necessário para efetuar o

reparo no item e retorná-lo à sua operação ou condição de *standby* (exclui atrasos planejados e espera por partes sobressalentes e ferramentas).

Tempo de Manutenção: É definido como o tempo necessário para planejar, gerenciar e preparar o teste / inspeção, testar / inspecionar, e retornar o item para serviço.

Frequência Média de Ocorrência de Falhas de um Item: É o número médio de falhas esperadas de um item em um determinado intervalo de tempo / ciclos.

Taxa de Falha: Razão do incremento do número de falhas para o incremento correspondente do tempo, em qualquer instante da vida de um item.

Probabilidade de Falha: É a probabilidade de um item perder sua função quando for solicitado a iniciar sua operação ou mudar de estado operacional.

Período de Falhas Prematuras (período de *burn in* de um item): Período inicial da distribuição de vida de uma população de itens, no qual a taxa de falha decresce rapidamente. Também conhecido como período de mortalidade infantil.

Período de Falhas por Desgaste (período de *wear out* de um item): Período final da distribuição de vida de alguns itens durante o qual a taxa de falha cresce rapidamente devido a processos naturais de desgaste.

Taxa de Reparo: O número de ações de reparo de um dado tipo, executadas em um determinado item, por unidade de tempo.

Confiabilidade de um Item: É a probabilidade de um item funcionar satisfatoriamente durante um período de tempo especificado, em condições de operação estabelecidas.

Confiabilidade Estimada: É a confiabilidade calculada a partir de dados de falha obtidos em ensaios/ testes específicos, efetuados de acordo com um programa previamente definido, ou a partir de informações da experiência operacional de uma instalação.

Disponibilidade: É a probabilidade de se encontrar o item em estado de funcionamento ou de capacidade operacional quando demandado.

Disponibilidade Instantânea (ou pontual): É a probabilidade de um item estar em funcionamento ou em estado de capacidade operacional em um dado instante.

Disponibilidade Média: É a proporção do tempo em que o item está em estado de funcionamento ou operabilidade, durante um intervalo de tempo fixado.

Disponibilidade Média Assintótica ou **Disponibilidade Intrínseca** (*steady-state availability*): Para um longo período de tempo, é a proporção do tempo em que o item permanece em estado de funcionamento ou de operabilidade.

Manutenibilidade (*Maintainability*): É uma característica de projeto e instalação, expressa pela probabilidade de que um item será mantido ou colocado em uma condição especificada, dentro de um determinado intervalo de tempo, quando a manutenção for realizada de acordo com procedimentos e recursos preestabelecidos.

Plano de Manutenção: É um conjunto de regras que englobam os procedimentos de teste e procedimentos de manutenção.

Manutenção Corretiva: É um conjunto de atividades não programadas, que têm por objetivo levar um item a uma condição operacional normal, sempre que um modo de falha indesejável se manifestar.

Manutenção Preventiva: É um conjunto de atividades programadas, realizadas em intervalos de tempo pré-fixados, que têm como objetivo garantir o desempenho satisfatório de um item durante a vida útil da instalação. Em geral as manutenções podem ser programadas simultaneamente, nas quais itens redundantes são testados simultaneamente no início de cada intervalo de teste, ou programadas para não coincidirem sendo realizadas em seqüência. Na manutenção preventiva estão incluídos normalmente, ajustes, substituições simples, reparos mínimos e calibração.

Manutenção Preditiva: É a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a Manutenção Preventiva e diminuir a Manutenção Corretiva.

Procedimento de Teste: Conjunto de atividades programadas, realizadas em intervalos de tempo pré-fixados que têm como objetivo verificar a capacidade de um item exercer a(s) função(ões) para a(s) qual(is) foi projetado.

Análise de Modos de Falha e Efeitos: É uma técnica de análise que permite a detecção das causas e conseqüências do mau funcionamento de itens.

Evento Iniciador de Acidente: é um evento que pode levar a condições acidentais na instalação.

Árvore de Falhas: Consiste em um diagrama lógico dedutivo que registra os resultados de uma análise sistemática dos eventos que podem provocar um determinado evento indesejável no sub-sistema / sistema / instalação, denominado evento topo. Construtivamente, a árvore de falhas é formada pela interligação de portões lógicos com eventos envolvendo estados de itens e/ou procedimentos operacionais.

Árvore de Eventos: É uma técnica indutiva que começa pela suposição da ocorrência de um evento iniciador e segue pela propagação lógica de eventos que caracterizam falhas de sistemas de segurança. A árvore de eventos é uma ilustração diagramática das possíveis ramificações decorrentes de determinados eventos iniciadores.

Referências Bibliográficas

- ACHOUR, M., BETZ, F., DOVGAL, A., LOPES, N., OLSON, P., RICHTER, G., SEGUY, D., AND VRANA, J. *PHP manual*, PHP Documentation Group, 2006. Disponível em: <<http://php.net>>, Acesso em: 07 ago. 2016.
- ALVES, W.P. *Fundamentos de bancos de dados*. São Paulo: Erica, 2004. v.1 p.28-36.
- AKHMEDJANOV, F. M. **Reliability databases**: state-of-the-art and perspectives. Roskilde: 2001. (Risø-R-1235).
- ATWOOD, C. L., LACHANCE, J. L., MARTZ, H. F., ANDERSON, D. J., ENGLEHARDT, M., WHITEHEAD, D., & WHEELER, T.. *Handbook of parameter estimation for probabilistic risk assessment*. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 2003. (NUREG/CR-6823).
- CARLSON, L. *T-Book-Reliability data of components in nordic nuclear power plants*. Sweden: ATV Office, 1987.
- CODD, E. F. A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, v. 13, n. 6, p. 377–387, 1970.
- COOKE, R.; DORREPAAL, J.; BEDFORD, T. *Review of SKI data processing methodology*. Netherlands: Delft University of Technology, 1995. (SKI Report, n. 95, p. 2)
- COTTRELL, D. F. *RADC non-electronic reliability and maintainability notebook*. Rome, NY, 1969. (RAD-TR-69-458).
- DATE, Christopher J. *A guide to the SQL standard: a user's guide to the standard database language SQL*. Addison-Wesley Professional, 1997.
- DATE, Christopher J. *Introdução a sistemas de bancos de dados*. Brasil: Elsevier, 2004.
- EIREDA European Industry Reliability Data Handbook, C.E.C.- J.R.C./ISEI 21020 ISPRA (Varese) Italy, EDF - DER/SPT 93206 Saint Denis (Paris) France, 1991.
- ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. *Sistemas de banco de dados: fundamentos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- FULLWOOD, R. *Probabilistic safety assessment in the chemical and nuclear industries*. Butterworth-Heinemann, 1999.

GIDEP Government-Industry Exchange Program. *Summaries of failure rate data*. Corona, CA. Disponível em: <www.gidep.org>. Acesso em: 11 out. 2016.

GOSSELIN, S. R., SIMONEN, F. A., PILLI, S. P. & LYDELL, B. *Probabilities of failure and uncertainty estimate information for passive components* - A literature review. Washington: US Nuclear Regulatory Commission, 2007. (NUREG/CR-6936).

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE guide to the collection and presentation of electrical, electronic, sensing component, and mechanical equipment reliability data for nuclear-power generating stations*, 1984 (IEEE Std 500-1984).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Component reliability data for use in probabilistic safety assessment*. Vienna, 1988. (IAEA TECDOC-478).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants*. (IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X; no. SSG-3) STI/PUB/1430 ISBN 978-92-0-114509-3. Vienna, 2010a.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Development and application of level 2 probabilistic safety assessment for nuclear power plants*. (IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. SSG-4) STI/PUB/1443 ISBN 978-92-0-102210-3. Vienna, 2010b.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Evaluation of reliability data sources*. Vienna, 1989a. (IAEA TECDOC-504).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Generic component reliability data for research reactor PSA*. Vienna, 1997. (IAEA-TECDOC-930).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Manual on reliability data collection for research reactor PSA*. Vienna, 1992c. (IAEA-TECDOC-636).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Probabilistic Safety Assessment: A report by the International Nuclear Safety Advisory Group*. Vienna, 1992a (Safety Series no. 75-INSAG-6).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Probabilistic safety assessment for research reactors*. Vienna, 1986. (IAEA TECDOC-400).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Probabilistic safety assessments of nuclear power plants for low power and shutdown modes*. Vienna, 2000. (IAEA-TECDOC-1144).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Procedures for conducting probabilistic safety assessment of nuclear power plants (level 1)*. Vienna, 1992b (Safety Series No 50-P-4).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Procedures for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (level 2)*. Vienna, 1995 (Safety Series No 50-P-8).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Procedures for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (level 3)*. Vienna, 1996. (Safety Series No 50-P-12).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Survey of ranges of component reliability data for use in probabilistic safety assessment*. Vienna, 1989b. (IAEA TECDOC-508).

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES. *IMS / ESA performance analyzer*. San Jose, CA: IBM, 1998.

KAPUR, K.; LAMBERSON, L. R. *Reliability in engineering design*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA: 1977.

KENNETH, C. L.; LAUDON, J. P. *Sistemas de informação gerenciais*. São Paulo: Editora Person, 2011.

MACEDO, V. S.; OLIVEIRA, P. S. P.; ANDRADE, D. A. *Development of a computational database for probabilistic safety assessment of nuclear research reactors*. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE; MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 12th; MEETING ON REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 19th; MEETING ON NUCLEAR INDUSTRY, 4th, October 4-9, 2015, São Paulo, SP. São Paulo: ABEN, 2015. *Proceedings...*

NUCLEAR ENERGY AGENCY, *Probabilistic safety assessment*: an analytical tool for assessing nuclear safety. Brief No. 8, Janeiro 1992. Disponível em: <www.nea.fr/brief/brief-08.html>.

NUCLEAR ENERGY AGENCY, *Use and development of probabilistic safety assessment*: an overview of the situation at the end of 2010. NEA/CSNI (2012)11. Paris, France (2012).

OLIVEIRA, P. S. P., SAUER, M. E. L., KURAZUMI, E. P., VIEIRA NETO, A. S., TONDIN, J. B. M., RICCI FILHO, W., JEREZ, R., BITELLI, U. D. *Sumário executivo e relatório final do projeto de pesquisa coordenado pela agência internacional de energia atômica*: base de dados de confiabilidade para os reatores IEA-R1 e IPEN/MB-01. São Paulo: IPEN, 2004.

(Relatório Técnico P&D.CENS.CENS.004.01, RELT.003.00).

OLIVEIRA, P. S. P., SAUER, M. E. L., KURAZUMI, E. P., VIEIRA NETO, A. S., TONDIN, J. B. M., RICCI FILHO, W., JEREZ, R., BITELLI, U. D. *Base de dados de confiabilidade de componentes para os reatores de pesquisa IEA-R1 e IPEN/MB-01*: objetivos, estrutura e conteúdo. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE; MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 6th; MEETING ON REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 13th; August 11-16, 2002, Rio de Janeiro, RJ. Rio de Janeiro: ABEN, 2002. *Proceedings...*

OLIVEIRA, P. S. P., SAUER, M. E. L., KURAZUMI, E. P., VIEIRA NETO, A. S., TONDIN, J. B. M., RICCI FILHO, W., JEREZ, R., BITELLI, U. D. *Base de dados de confiabilidade de componentes para os Reatores de Pesquisa IEA-R1 e IPEN/MB-01*: resultados e aplicações. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2nd; MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 7th; MEETING ON REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 14th; August 28 - September 2, 2005, Santos, SP. Santos: ABEN, 2005. *Proceedings...*

OREDA Handbook – Offshore Reliability Data Handbook, 4a ed., Noruega, SINTEF - DNV, 2002.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Level 2 PSA methodology and severe accident management*. Issy-les-Moulineaux, France: OECD Nuclear Energy Agency, 1997 (OCDE/GD(97)198).

TITAN, M. H. *Procedure and data for estimating reliability and maintainability*. Engineering Reliability, P-59-21, 1959.

TURBAN, E.; WETHERBE, J. C.; MCLEAN, E. *Tecnologia da informação para gestão*. Porto Alegre: Bookman, 2004

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE, *Military Handbook Reliability prediction of electronic equipment*, 1992 (MIL-HDBK-217F Notice 1, 1992).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *CCF parameter estimations*, 2012 Update.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Common-cause failure database and analysis system*: event data collection, classification, and coding. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 2007. (NUREG-CR-6268 , Revision 1).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Industry average performance for components and initiating events at US commercial nuclear power plants*. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 2007. (NUREG-CR-6928).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Operating experience feedback report*: assessment of spent fuel cooling. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 1997. (NUREG-CR-1275).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *PRA Procedures Guide*: a guide to the performance of probabilistic risk assessments for nuclear power plants. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 1983. (NUREG-CR-2300).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Probabilistic safety analysis procedures guide*. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 1984. (NUREG-CR-2815).

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Reactor safety study*: an assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants. Idaho, ID: Idaho National Laboratory, 1975. (NUREG-CR-75/014).