

ASSUNTO/MOTIVO

**PLANO PRELIMINAR DE DESCOMISSIONAMENTO DA CNAAA**

PÁGINA

1/145

LOCAL/DATA

Rio de Janeiro 28/10/2014

REDATOR

Segabinaze/Prof. João  
Moreira  
ver pág.03

U.O./TEL

SN.T- ramal 7931

REFERÊNCIA

Resolução CNEN N°133 – Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas

CÓDIGO ARQUIVO

NÃO SE APLICA

SUMÁRIO

Nº DE PÁGINAS

ANEXOS

(NOS RELATÓRIOS DE REUNIÃO INDICAR, INICIALMENTE, NO SUMÁRIO, LOCAL, DATA, COORDENADOR, PARTICIPANTES E DURAÇÃO)

145

0

Para ser providenciado  
Para conhecimento  
prazos

**Objetivo:**

Este relatório apresenta o Plano Preliminar de Descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) detalhando a estratégia ambientalmente sustentável para o gerenciamento da parte final de seu ciclo de vida. Este documento foi preparado de acordo com a Resolução CNEN No. 133 de 2012 sobre descomissionamento de usinas nucleoeletricas. Este plano aborda a caracterização do estado final do sítio da CNAAA; questões de gerenciamento do descomissionamento; previsão do inventário de rejeitos radioativos durante a operação comercial das usinas da CNAAA e durante as atividades de descomissionamento; medidas de proteção radiológica, proteção física e garantia da qualidade; gerenciamento dos rejeitos radioativos; e orçamento e garantia financeira, especificando a forma da captação de recursos para implementação do plano de descomissionamento. Os principais pontos desse plano são apresentados a seguir.

O estado final escolhido para a CNAAA, após as atividades de descomissionamento, é um sítio apropriado para a instalação de novos empreendimentos industriais (*brownfield*). A conclusão das atividades de descomissionamento deve ocorrer quando os requisitos do estado *brownfield* forem atingidos.

Nota: O destinatário do presente documento está obrigado a tratá-lo de forma estritamente confidencial. A reprodução e/ou transmissão do mesmo a terceiros, assim como a utilização ou revelação de seu conteúdo parcial ou integralmente são proibidas, a não ser que seja dada uma autorização expressa por escrito para tal. Todos os direitos estão reservados

ASSINATURAS

  
Roberto de Oliveira Segabinaze  
Engenheiro - Matr.: 05001133-0  
Superintendência de Combustível  
e Segurança Nuclear - SN.T

  
Jorge Luiz Chapot  
Superintendente - Matr. 5002356-2  
Superintendência de Combustível e  
Segurança Nuclear - SN.T

VERIFICADO/APROVADO

REV

DATA

PÁG.

VERIFICADO/  
APROVADO

DISTRIBUIÇÃO (QUANDO FOR ENCAMINHADO SOMENTE O SUMÁRIO PARA CONHECIMENTO COLOCAR "PC")

SM.G/SN.T/DT/DT ass./DG/DO

Duas alternativas de descomissionamento foram estudadas para a CNAAA. A alternativa escolhida prevê que as Usinas Angra 1 e Angra 2 tenham seu desmantelamento protelado até que Angra 3 cesse sua operação em 2060. Assim, a Usina Angra 3 entraria em desmantelamento imediato aproveitando a mão de obra e otimizando custos gerais do processo de desmantelamento das 3 usinas. Estas atividades ocorreriam entre 2061 e 2070.

Os estudos realizados mostram que cada usina do sítio de Angra deve gerar em torno de 10.000 m<sup>3</sup> de rejeitos radioativos durante as atividades de desmantelamento. Excetuando o combustível irradiado que totaliza 1450 elementos combustíveis em 2014, o volume total de rejeitos após o descomissionamento da CNAAA é de 34952 m<sup>3</sup>, incluindo os rejeitos gerados durante a operação comercial das usinas e os gerados durante o desmantelamento. Desse total, apenas 212 m<sup>3</sup> são rejeitos de alto nível que correspondem a 0,6 % do volume total e respondem por 99 % da atividade total dos rejeitos. A atividade total gerada é de 4,66x10<sup>8</sup> GBq. Os depósitos finais para os rejeitos radioativos e combustíveis irradiados, fora do sítio da CNAAA, ainda não estão definidos. Assim, prevê-se que esses materiais sejam depositados em instalações adequadas no próprio sítio da CNAAA enquanto esses depósitos finais não estejam disponíveis.

O custo de descomissionamento da CNAAA foi estimado em US\$ 1490,8 milhões e não inclui o custo de armazenamento do combustível nuclear irradiado. Os recursos financeiros necessários para fazer face ao descomissionamento da CNAAA estão reunidos no Fundo de Descomissionamento constituído por recolhimentos periódicos feitos pela Eletronuclear. No caso de um descomissionamento precoce causado por algum evento inesperado, os recursos financeiros necessários serão obtidos do seguro e do recurso disponível no Fundo de Descomissionamento das usinas nucleares da CNAAA.

Autores :

- Eletronuclear

Eng. Roberto de Oliveira Segabinaze

- Universidade Federal do ABC

Prof. João Manoel Losada Moreira (Coordenador)

Prof. Pedro Carajilescov

Prof. José Rubens Maiorino

Prof. Guiou Kobayashi

Alexander Lucas Busse

Caroline Rodrigues da Silva

Deiglys Borges Monteiro

Giovanni Stefani Laranjo

Juliana de Oliveira Shimokawa

Nilton Terng

Thiago Augusto dos Santos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Contexto do Plano Preliminar de Descomissionamento.....	12
1.2	Objetivos do Plano Preliminar.....	13
1.3	Interdependência entre as Usinas Angra 1, 2 e 3 .....	14
1.4	Existência de depósitos externos para armazenamento de rejeitos .....	16
	Referências.....	16
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SÍTIO DA CNAAA .....</b>	<b>18</b>
2.1	Localização do sítio e descrição .....	18
2.1.1	Área de exclusão.....	19
2.1.2	Distribuição espacial da população.....	20
2.1.3	Águas subterrâneas na região.....	20
2.1.4	Potencial de poluição do ar.....	21
2.1.5	Ressacas.....	21
2.2	Prédios, reatores e sistemas do sítio da CNAAA que eventualmente entrarão no processo de Descomissionamento.....	22
2.2.1	Principais edifícios das usinas nucleares.....	22
2.2.2	Centro de Gerenciamento de Rejeitos - CGR .....	24
2.2.2.1	Depósitos Iniciais de Rejeitos Radioativos.....	24
2.2.2.2	Depósito Inicial do Gerador de Vapor - DIGV .....	24
2.2.2.3	Prédio de Monitoração.....	25
2.2.3	Laboratórios.....	25
2.2.4	Unidade de Armazenamento Complementar de Combustível Irradiado (UFC) .....	26
2.3	Descrição das Usinas do sítio de Angra.....	26
2.3.1	Descrição da Usina Angra 1 .....	26
2.3.2	Descrição da Usina Angra 2 .....	27
2.3.3	Descrição da Usina Angra 3 .....	28
2.4	Histórico operacional das usinas da CNAAA .....	29
2.4.1	Histórico da Usina Angra 1 .....	29
2.4.2	Histórico da Usina Angra 2 .....	29
2.4.3	Histórico da Usina Angra 3 .....	30
	Referências.....	30
<b>3</b>	<b>ESTRATÉGIA DE DESCOMISSONAMENTO .....</b>	<b>55</b>
3.1	Estratégias de Descomissionamento de acordo com a Resolução CNEN No. 133 .....	55

3.2	Fatores que influenciam as estratégias de descomissionamento da CNAAA..	57
3.3	Alternativas consideradas para o Descomissionamento .....	58
3.3.1	Alternativa 1 – Descomissionamento protelado com início em 2061 ....	58
3.3.2	Alternativa 2 – Descomissionamento protelado com início em 2083....	59
3.3.3	Fatores de Interdependência entre as Usinas.....	59
3.3.4	Fatores ligados à existência de depósitos externos .....	61
3.4	Estado final para o sítio .....	62
3.4.1	Definição de estado final do sítio da CNAAA .....	63
3.5	Alternativa escolhida para o descomissionamento da CNAAA.....	63
3.6	Justificativas para a escolha da estratégia.....	63
	Referências .....	64
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS E METODOLOGIA PARA O DESCOMISSONAMENTO DA CNAAA.....</b>	<b>66</b>
4.1	Crítérios para novas estruturas, sistemas e equipamentos, específicos para o Descomissionamento .....	66
4.1.1	Classificação de sistemas, componentes e estruturas nas áreas sob descomissionamento .....	66
4.1.2	Cargas devidas às atividades de descomissionamento e a equipamentos .....	66
4.2	Crítérios de proteção radiológica .....	67
4.2.1	Taxas de exposição ocupacionais .....	67
4.2.2	Proteção através de sistemas, barreiras e confinamentos .....	67
4.2.3	Controle de acesso.....	67
4.2.4	Sistema de monitoração de radiação.....	68
4.2.5	Ventilação e liberação gasosa .....	68
4.3	Crítérios de descontaminação.....	69
4.3.1	Estruturas, sistemas e equipamentos contaminados .....	69
4.3.2	Contaminação do solo .....	69
4.3.3	Contaminação de águas.....	69
4.4	Gerenciamento de rejeitos .....	70
4.4.1	Identificação de correntes de rejeitos (waste streams).....	70
4.4.2	Resíduos radioativos sólidos .....	70
4.4.3	Resíduos radioativos líquidos e gasosos .....	71
4.4.4	Resíduos contendo material radioativo e outros materiais perigosos...	71
4.5	Segurança quanto a perigos industriais .....	71
4.5.1	Crítérios de arranjo de sistemas e equipamento .....	71
4.5.2	Sistemas de monitoração e alarmes .....	71
4.5.3	Proteção contra incêndio e explosão .....	72

4.5.4	Manutenção e inspeções .....	72
4.5.5	Registros e documentação .....	73
4.5.6	Proteção Física.....	73
4.6	Metodologia adotada para o Descomissionamento do sítio da CNAAA .....	73
	Referências .....	74
<b>5</b>	<b>GERENCIAMENTO DAS ATIVIDADES DE DESCOMISSONAMENTO.....</b>	<b>76</b>
5.1	Suporte de Engenharia.....	76
5.2	Licenciamento.....	76
5.3	Responsabilidades da Diretoria de Operação e Comercialização (DO) .....	76
5.4	Superintendência da Usina sob Descomissionamento.....	77
	Referências .....	77
<b>6</b>	<b>PREVISÃO DO INVENTÁRIO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS RADIOATIVOS DA CNAAA .....</b>	<b>78</b>
6.1	Caracterização dos materiais e situação radiológica atual da CNAAA.....	78
6.2	Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 1 .....	79
6.3	Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 2 .....	79
6.4	Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 3 .....	80
6.5	Inventário de elementos combustíveis irradiados nos vários depósitos .....	80
6.6	Inventário e caracterização dos materiais gerados durante as atividades de descomissionamento.....	81
6.6.1	Inventário e caracterização dos materiais gerados durante o descomissionamento do reator Trojan .....	81
6.6.2	Inventário e caracterização dos materiais gerados durante o descomissionamento dos reatores Ringhals.....	82
6.7	Resumo Geral dos rejeitos esperados no Descomissionamento das Usinas Angra 1,2 e 3 da CNAAA.....	84
	Referências .....	85
<b>7</b>	<b>ESTIMATIVA DE CUSTO DO DESCOMISSONAMENTO DA CNAAA .....</b>	<b>103</b>
7.1	Metodologia de avaliação do custo mínimo de descomissionamento .....	103
7.2	Custo mínimo de descomissionamento das usinas da CNAAA.....	105
7.3	Custos reais de usinas descomissionadas nos EUA.....	106
7.4	Comparação entre custos real e mínimo.....	109
7.5	Contingenciamento.....	109
7.6	Fatores que afetam a estimativa de custo para a CNAAA .....	109
7.7	Estrutura para a estimativa detalhada do custo de descomissionamento .	110
	Referências .....	111
<b>8</b>	<b>MEDIDAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....</b>	<b>119</b>

8.1	Responsabilidades da Divisão de Proteção Radiológica.....	119
8.2	Fontes de radiação.....	121
8.3	Sistemas de monitoração da radiação.....	122
8.3.1	Monitoração de Área.....	123
8.3.2	Monitoração de pessoal.....	123
8.3.3	Monitoração de efluentes radioativos.....	123
8.3.4	Monitoração ambiental da radiação.....	124
8.3.5	Monitoração da integridade de barreiras.....	124
	Referências.....	125
<b>9</b>	<b>PROTEÇÃO FÍSICA.....</b>	<b>127</b>
9.1	Objetivo do Programa.....	127
9.2	Definições.....	128
9.3	Salvaguardas.....	129
	Referências.....	129
<b>10</b>	<b>GARANTIA DA QUALIDADE.....</b>	<b>130</b>
10.1	Garantia da qualidade na etapa de projeto e preparação do descomissionamento.....	130
10.1.1	Responsabilidades.....	131
10.1.2	Organização.....	132
10.1.3	Supervisão técnica independente.....	132
10.2	Garantia da qualidade na etapa operacional do descomissionamento.....	132
	Referências.....	132
<b>11</b>	<b>ORÇAMENTO DO DESCOMISSIONAMENTO E GARANTIA FINANCEIRA..</b>	<b>133</b>
11.1	Estimativa do custo total do descomissionamento.....	133
11.2	Forma de captação de recursos.....	134
11.3	Captação de recursos no caso de um descomissionamento precoce.....	134
<b>12</b>	<b>ETAPAS DO DESCOMISSIONAMENTO DA CNAAA.....</b>	<b>137</b>
12.1	Introdução.....	137
12.2	Etapas do descomissionamento.....	137
12.2.1	Planejamento e preparação.....	138
12.2.2	Desativação da planta.....	138
12.2.3	Operação segura da planta desativada.....	139
12.2.4	Desmantelamento e descontaminação.....	140
12.2.5	Recuperação do terreno.....	141
	Referências.....	141
<b>13</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO FINAL DO DESCOMISSIONAMENTO.....</b>	<b>142</b>
13.1	Descomissionamento e critérios de conclusão das atividades.....	142
13.2	Descrição das etapas mais importantes do descomissionamento.....	143

13.3	Descrição dos equipamentos, sistemas e estruturas que serão removidos ....	144
13.4	Estimativa dos volumes de rejeitos .....	144
13.5	Estratégia de gestão de rejeitos.....	144
13.6	Liberação do sítio .....	145
	Referências .....	145



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1– Populações próximas à Usina Angra 2, 2010. ....	32
Tabela 2.2 – Projeção e distribuição radial da população residente na área de influência direta da CNAAA. ....	33
Tabela 2.3– Instituições de Saúde da região da CNAAA. ....	34
Tabela 6.1– Significado das siglas utilizadas para identificar depósitos e tipos de rejeitos depositados no CGR e KPE. ....	86
Tabela 6.2– Quantidade de embalagens de rejeitos radioativos sólidos armazenados no CGR. Os valores se referem ao número de embalagens armazenadas em cada ano. Significado das siglas encontra-se na Tabela 6.1. ....	87
Tabela 6.3– Quantidade de rejeitos sólidos armazenados no KPE. Os valores se referem ao número de embalados armazenados em cada ano. Significado das siglas encontra-se na Tabela 6.1. ....	88
Tabela 6.4– Classificação e taxa de exposição gerada pelos rejeitos sólidos armazenados no KPE. ....	88
Tabela 6.5– Volume total de rejeitos de médio e baixo nível esperado no final da operação comercial das usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3. ....	89
Tabela 6.6– Capacidade das piscinas de elementos combustíveis (EC). ....	89
Tabela 6.7– Previsão do esgotamento da capacidade de armazenamento de elementos combustíveis das piscinas das Usinas Angra 1, 2 e 3. ....	90
Tabela 6.8– Volume e atividade induzida totais no reator PWR Trojan. ....	90
Tabela 6.9– Rejeitos radioativos dos grandes equipamentos do circuito primário do reator PWR Trojan. ....	91
Tabela 6.10– Rejeitos radioativos das estruturas de concreto e superfícies contaminadas de equipamentos do reator PWR Trojan*. ....	92
Tabela 6.11– Rejeitos radioativos de outros sistemas do reator PWR Trojan. ....	93
Tabela 6.12– Resumo das informações sobre as usinas do sítio de Ringhals. ....	94
Tabela 6.13 – Dimensões dos containers e embalagens. ....	95
Tabela 6.14– Inventário de containers utilizado no sítio de Ringhals. ....	95
Tabela 6.15– Inventário de rejeitos metálicos. ....	96
Tabela 6.16– Distribuição esperada de rejeitos metálicos. ....	96
Tabela 6.17– Sumário de rejeitos ativos e inativos das usinas Ringhals 2, 3 e 4. A unidade de cada entrada da tabela está discriminada na coluna “Item”. ....	97
Tabela 6.18– Resumo dos rejeitos radioativos provenientes do descomissionamento da CNAAA. ....	101
Tabela 7.1–Valores de $B_x$ em função da localização, proprietário e ano dos depósitos de LLW dos EUA [4]. ....	113
Tabela 7.2– Distribuição dos custos de descomissionamento em 1986. ....	113
Tabela 7.3– Fatores de correção temporais obtidos para as usinas da CNAAA em 2012. ....	114
Tabela 7.4– Garantias Financeiras Mínimas (valores de 2012). ....	114
Tabela 7.5–Fatores de correção temporais para a Usina Connecticut Yankee. ....	115
Tabela 7.6–Fatores de correção temporais para a Usina Trojan. ....	115
Tabela 7.7–Fatores de inflação para o método MFA – Usina Rancho Seco. ....	115

Tabela 7.8—Comparação entre custo mínimo estimado e custo real para o descomissionamento de três usinas nucleares .....	116
Tabela 7.9—Contingenciamento e administração de riscos. ....	116
Tabela 8.1 – Principais fontes de radiação durante o descomissionamento das usinas da CNAAA. ....	126
Tabela 11.1 – Orçamento previsto para a realização do descomissionamento do sítio da CNAAA (valores de 2012).....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1– Localização da CNAAA em relação às principais via de acesso e municípios limítrofes. ....	35
Figura 2.2– Localização dos distritos de Cunhambebe, Mambucaba e.....	36
Figura 2.3– Distribuição populacional do censo demográfico de 2010 pelos setores circulares. ....	37
Figura 2.4–Topografia indicando os edifícios dos reatores Angra 1, 2 e 3 e a localização das torres meteorológicas em torno do sítio da CNAAA. ....	38
Figura 2.5–Sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, com as zonas quentes pintadas de amarelo. Fonte: adaptado de [3]. ....	39
Figura 2.6–Localização da Instalação Provisória de Depósito de Rejeitos Radioativos. Fonte: adaptado de [1]. ....	40
Figura 2.7–Localização do Laboratório de Calibração de Monitor de Radiação (LCMR). Fonte: adaptado de [1]. ....	41
Figura 2.8–Localização do Laboratório de Monitoramento Ambiental (LMA) na vila de Mambucaba. Fonte: adaptado de [1]. ....	42
Figura 2.9–Planta esquemática da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1]. ....	43
Figura 2.10–Vista esquemática Edifício do Reator da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1]. ....	44
Figura 2.11– Planta esquemática do Edifício do Combustível da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1]. ....	45
Figura 2.12–Planta do Edifício Auxiliar Norte da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1]. ....	46
Figura 2.13–Planta do Edifício Auxiliar Sul da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1]. ....	47
Figura 2.14–Planta esquemática da Usina Angra 2. Fonte: adaptado de [2]. ....	48
Figura 2.15– Vista esquemática do Edifício do Reator da Usina Angra 2. Fonte: adaptado de [2]. ....	49
Figura 2.16– Vista esquemática da Usina Angra 2: (1) Edifício do Reator, (2) Compartimento de válvula e Vapor Principal e (3) Estrutura de Eclusa de Equipamento do Pórtico. Fonte: adaptado de [2-3]. ....	50
Figura 2.17– Vista esquemática da Usina Angra 2:(1) Edifício do Reator, (2) Edifício Auxiliar e (3) Chaminé de Descarga de Gases. Fonte: adaptado de [2-3]. ....	51
Figura 2.18– Planta esquemática da Usina Angra 3. Fonte: adaptado de [3]. ....	52
Figura 2.19– Vista esquemática do Edifício do Reator da Usina Angra 3. Fonte: adaptado de [3]. ....	53
Figura 2.20– Eletricidade bruta gerada pela usina Angra 1 entre 1985 e 2012. ....	54
Figura 2.21– Eletricidade bruta gerada pela Usina Angra 2 entre 2001 e 2012. ....	54
Figura 3.1– Alternativa 1 para o descomissionamento do sítio de Angra. ....	65
Figura 3.2– Alternativa 2 para o descomissionamento do sítio de Angra. ....	65
Figura 6.1– Atividade específica no refrigerante de vários produtos de .....	102
Figura 7.1– Evolução dos fatores de correção ao longo do tempo. ....	117
Figura 7.2–Evolução das frações do custo total de descomissionamento ao longo o tempo. ....	117
Figura 7.3– Comparação entre os custos reais e mínimos das usinas em análise. ..	118

Figura 7.4– Proposta de estrutura para a estimativa de custo de descomissionamento de usinas nucleares do ISDC [1]..... 118

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo do Descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) é atingir o estado final preconizado neste Plano Preliminar de Descomissionamento (PPD) de forma segura para os trabalhadores envolvidos, para o público e para o meio ambiente. Busca-se realizar o fechamento do ciclo de vida da CNAAA de forma ambientalmente sustentável. Os rejeitos radioativos e combustíveis irradiados serão depositados adequadamente sem impactar as gerações futuras e o sítio da CNAAA será recuperado para novos usos pela sociedade.

O estado final escolhido para a CNAAA, após as atividades de descomissionamento, é um sítio apropriado para a instalação de novos empreendimentos industriais (*brownfield*). A conclusão das atividades de descomissionamento deve ocorrer quando os requisitos para o estado *brownfield* forem atingidos.

### 1.1 Contexto do Plano Preliminar de Descomissionamento

Este Plano Preliminar de Descomissionamento (PPD) para a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) é baseado na Resolução No. 133 da CNEN e normas internacionais [1-5]. Sendo este a primeira revisão do PPD para a CNAAA, busca-se neste documento consolidar um conjunto de informações que demonstrem a capacidade da Eletronuclear em realizar o descomissionamento. O plano apresenta informações sobre estratégia, custo, inventário radioativo antes e durante o desmantelamento e o estado final do sítio esperado após o descomissionamento. Estas informações, embora aproximadas, apresentam a dimensão correta da complexidade das atividades envolvidas no descomissionamento da CNAAA. Informações mais detalhadas serão apresentadas em revisões posteriores do PPD que, conforme a Ref. 1, devem ser realizadas periodicamente.

As características específicas do descomissionamento da CNAAA são apresentadas no presente plano. Por exemplo, o plano considera o descomissionamento das 3 usinas existentes no sítio contemplando a interdependência entre as usinas, conforme o Art. 4, parágrafo 2 da Resolução No. 133 e outras normas [1,2]. O plano apresenta como a Eletronuclear se organizará

para realizar o descomissionamento, a metodologia que adotará para executá-lo, as principais etapas e atividades esperadas e, também, contempla a hipótese de retirada de operação de uma usina de forma antecipada.

Na próxima seção, apresentam-se os objetivos deste PPD. A seguir são introduzidos os fatores interdependentes que afetam o descomissionamento das 3 usinas em um único sítio, bem como a questão da existência/necessidade de depósitos externos para armazenamento dos rejeitos radioativos gerados durante a operação comercial das usinas e durante o descomissionamento.

## **1.2 Objetivos do Plano Preliminar**

O objetivo do Plano Preliminar de Descomissionamento (PPD) da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) consiste na apresentação da estratégia prevista a ser adotada para o descomissionamento das 3 usinas, Angra 1, Angra 2 e Angra 3, demonstrando que pode ser implementado de forma segura para alcançar o estado final previsto para o local e estruturas remanescentes no sítio. O PPD foi preparado conforme a Resolução CNEN No. 133 [1]. O PPD busca atender os itens da Seção I do Capítulo V da mencionada Resolução, que são transcritos abaixo:

- a) *estratégia de descomissionamento proposta;*
- b) *descrição da metodologia e dos critérios adotados para o descomissionamento;*
- c) *gerenciamento do descomissionamento;*
- d) *previsão do inventário e da caracterização dos materiais radioativos presentes na usina no início do descomissionamento;*
- e) *medidas de proteção radiológica;*
- f) *medidas de proteção física;*
- g) *ações de garantia da qualidade a serem implementadas, relacionadas ao planejamento;*
- h) *medidas a serem adotadas para a gerência dos rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento;*

- i) orçamento e garantia financeira, especificando a forma da captação de recursos para implementação do Plano, inclusive na hipótese de descomissionamento precoce;*
- j) etapas de descomissionamento, com indicação do seu encadeamento e duração;*
- k) caracterização do estado final do descomissionamento.*
- l) considerar a hipótese de retirada de operação de forma não prevista e estabelecer medidas para preservar a segurança da usina até que o Plano Final de Descomissionamento seja preparado, aprovado e implantado.*

### **1.3 Interdependência entre as Usinas Angra 1, 2 e 3**

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) tem atualmente 2 usinas nucleares em operação comercial e uma terceira, em construção. Quando uma das usinas entrar em descomissionamento deve haver interferências na operação das outras. Esta interação, de certa forma, é similar ao processo atual no qual ocorre a construção de Angra 3 e a operação comercial das usinas Angra 1 e Angra 2, pois o processo descomissionamento também envolve a preparação de canteiros de obras, entrada e saída de veículos, transporte de materiais, etc. Estas interferências ou interdependências são sumarizadas a seguir:

- a) Tempo de vida útil das usinas. Inicialmente de 40 anos, entretanto esses tempos de vida podem ser ampliados afetando a cronologia e o planejamento do descomissionamento de todo o sítio. Outro fator interdependente está ligado às vantagens econômicas de se fazer a mobilização de recursos em um só momento. Tal fator tende a favorecer a execução do descomissionamento das três usinas em sequência. Considerando a presença de três usinas nucleares no mesmo sítio, torna-se interessante, do ponto de vista econômico, uma estratégia que permita dismantelar as plantas em sequência.
- b) Oportunidades antevistas pela Eletronuclear para uso de áreas do sítio. Neste caso, uma decisão de acelerar o processo de descomissionamento para sua liberação para outros fins pode tornar-se interessante.

- c) Posicionamento das 3 usinas dentro do sítio. No caso do sítio de Angra, as usinas Angra 1 e Angra 2 estão próximas enquanto Angra 3 está mais separada. O descomissionamento de Angra 1 pode iniciar antes enquanto Angra 2 ainda deve estar operando. Neste caso deve haver a preocupação de evitar interferência da operação de Angra 2 pelo descomissionamento de Angra 1. As atividades que podem interferir a operação serão a remoção de equipamentos do circuito secundário (não contaminados), a remoção dos combustíveis irradiados, do vaso do reator e dos internos do vaso do reator, drenagens de refrigerante e outros fluidos, etc. Para evitar interferências é necessário definir uma área de ações de desmantelamento e descontaminação e rotas de passagens desses materiais pelo sítio da usina.
- d) Rotas de transporte de rejeitos. As rotas para transporte de rejeitos radioativos nas etapas que envolvem remoção de materiais da Usina Angra 1 são potencialmente causadoras de interferência na operação da Usina Angra 2. O transporte de rejeitos radioativos terão como destino os depósitos de rejeitos dentro ou fora da usina. Quando do descomissionamento inicial da Usina Angra 2 as interferências com a usina ainda em operação, Angra 3, serão bem menores.
- e) Gerenciamento de novos processos. Novas atividades operacionais passarão a ocorrer na CNAAA com o início do descomissionamento: novos processos administrativos, aquisição e aluguel de equipamentos específicos como, por exemplo, para segmentar o vaso de pressão e grandes sistemas do circuito primário, contratação de firmas para tarefas específicas de descomissionamento, etc.
- f) Depósitos de rejeitos. Para o caso de se utilizar os depósitos de rejeitos existentes na CNAAA ou outros que venham a ser construídos no sítio para armazenar parte dos rejeitos radioativos da usina de Angra 1, a rota a ser utilizada seria inicialmente pela estrada entre a as usinas e o mar. Quando do descomissionamento inicial da Usina Angra 2 as interferências com a usina ainda em operação, Angra 3, seriam bem menores. Para o transporte marítimo poderia ser utilizado o cais a direita da usina de Angra

2. As rotas de transporte rodoviário seriam semelhantes às descritas acima para Angra 1.

- g) Acondicionamento de rejeitos. Para o acondicionamento adequado dos rejeitos gerados durante o descomissionamento de cada usina é necessária a construção de uma instalação para tratamento de rejeitos adjacente à contenção. Uma opção interessante seria o desmantelamento do sistema secundário (prédio das turbinas) logo de imediato e sua adaptação para a instalação de tratamento de rejeitos. Para Angra 1, esta opção parece interessante pois interferiria menos na operação da Usina Angra 2, eliminando a necessidade de construção de área de tratamento de rejeitos na proximidade. Esta opção foi utilizada com sucesso na Usina Jose Cabrera na Espanha [6].

#### **1.4 Existência de depósitos externos para armazenamento de rejeitos**

Alguns fatores relacionados à disposição final dos rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento estão fora da atuação direta da Eletronuclear. Entre eles, pode-se apresentar a disponibilidade de depósitos finais de rejeitos radioativos de baixo e médio nível fora do sítio, bem como a disponibilidade de depósito para os combustíveis nucleares irradiados além das facilidades de transporte de rejeitos para os referidos depósitos. Assume-se que a partir de 2063 existam depósitos de rejeitos adequados para receber os rejeitos oriundos do descomissionamento da CNAAA de forma que o sítio possa ficar livre de para outra utilização.

#### **Referências**

1. Descomissionamento de usinas nucleoeletricas, Resolução CNEN No. 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012.
2. Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety reports series No. 45, International Atomic Energy Agency, IAEA, 2005.
3. Decommissioning planning for licensed activities, Regulatory Guide G-219, Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC, 2000.
4. Managing low radioactivity material from the decommissioning of nuclear facilities, Technical reports series No. 462, International Atomic Energy Agency, IAEA, 2008.



5. International structure for decommissioning costing (ISDC) of nuclear installations, NEA No. 7088, Nuclear Energy Agency, NEA, 2012.
6. Estratégia de descomissionamento das Usinas Angra 1, 2 e 3. Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-003-01, Universidade Federal do ABC, 2014.

## **2 DESCRIÇÃO DO SÍTIO DA CNAAA**

As atividades de descomissionamento envolvem atividades de desmontagem, demolição e transporte de rejeitos radioativos. O início das atividades de descomissionamento em uma das usinas da CNAAA interfere nas atividades de operação comercial das outras usinas. Nesta seção, descrevem-se as instalações que serão objeto do descomissionamento, isto é, aquelas que contenham material radioativo ou que trabalham com materiais contaminados: partes dos prédios das Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3, suas posições no sítio da CNAAA e os vários depósitos de rejeitos atualmente existentes.

### **2.1 Localização do sítio e descrição**

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) está situada no distrito de Cunhambebe no município de Angra dos Reis, Estado de Rio de Janeiro. As distâncias entre a CNAAA e as cidades do Rio de Janeiro, RJ, Belo Horizonte, MG, e São Paulo, SP, são de 133 km, 343 km e 216 km, respectivamente [1-3].

Na área ocupada pela CNAAA, estão presentes duas províncias topográficas básicas: a Planície Costeira e a Serra do Mar, cada uma delas apresenta características distintas. O clima da região é tropical de chuvas frequentes, possui abundância de luz solar, umidade relativa alta, velocidade de vento moderada e tempestades de verão ocasionais. As temperaturas no verão são elevadas e no inverno são amenas. Os rios em Angra dos Reis possuem gradientes curtos de alturas, fluindo como cascatas, desaguando diretamente no mar. Os rios de maior vazão de água, com 10 km de comprimento, são os Rio Mambucaba e Rio Bracui [1-3].

A infraestrutura rodoviária da região é marcada pela presença da rodovia federal BR – 101, no trecho Rio de Janeiro – Santos, onde são observados dois entroncamentos. Um deles está localizado a aproximadamente 35 km, direção sudoeste (SW), em relação à Usina Angra 2, no município de Paraty e viabiliza a ligação com o município de Cunha, no Estado de São Paulo por meio da rodovia estadual fluminense RJ-165. O outro entroncamento está localizado a aproximadamente 16 km, direção este/sudeste (ESE), em relação à Angra 2, no

município de Angra dos Reis viabilizando a ligação com o município fluminense de Rio Claro. Em termos de infraestrutura ferroviária, existe somente uma linha que liga os municípios fluminenses de Barra Mansa e Volta Redonda à Angra dos Reis. O leito desta via férrea corre em curso paralelo com a RJ – 155 e está associada ao Porto de Angra dos Reis para o escoamento da produção siderúrgica, localizada a 17 km, direção este (E), em relação à Angra 2.

A Figura 2.1 mostra a localização do empreendimento em relação às principais vias de acesso rodoviário, a ferrovia e os municípios limítrofes a Angra dos Reis.

### **2.1.1 Área de exclusão**

A ELETRONUCLEAR possui o controle legal sobre toda e qualquer atividade dentro da área de exclusão da CNAAA. As linhas da área de exclusão constituem a fronteira para fins de determinação dos limites de liberação de efluentes das instalações no seu interior. Os efluentes liberados não podem exceder os limites de dose da Norma CNEN NN-3.01 [4].

As distâncias mínimas de cada instalação à fronteira da área de exclusão devem ser consideradas, no estabelecimento dos limites das liberações gasosas em regime de operação normal da mesma.

As substâncias líquidas levemente contaminadas que necessitem ser descartadas, por sua vez, serão encaminhadas aos sistemas de tratamento de rejeitos líquidos das usinas de onde serão, após monitoração e contabilização, liberados de forma controlada para o meio ambiente segundo o estabelecido no Manual de Controle Radiológico do Meio Ambiente da usina em questão.

Dentro da área de exclusão da CNAAA não existem e não existirão residentes permanentes. Na área de exclusão, além dos empregados da Eletronuclear, apenas empregados de suas contratadas e subcontratadas poderão operar. Quanto aos visitantes, procedimentos específicos serão estabelecidos e mantidos para o seu ingresso.

### **2.1.2 Distribuição espacial da população**

As localidades de concentração de população mais próximas da CNAAA são Parque Mambucaba e Frade, nos distritos de Mambucaba e Cunhambebe, respectivamente, ambos em Angra dos Reis [5]. No município de Paraty, o núcleo populacional mais próximo é o distrito de Tarituba. A Figura 2.2 ilustra a localização desses distritos e a Tabela 2.1 informa o quantitativo, distância e direção da população nos distritos próximos à Usina Angra 2.

A distribuição populacional nas áreas de influência da CNAAA foi analisada com base nos dados do Censo Demográfico de 2010, elaborado pelo IBGE. Para o cálculo das projeções, para a população residente, recorreu-se às estimativas realizadas para o horizonte de 2010 a 2050. Os resultados, por setor censitário (unidade territorial de coleta que referencia espacialmente os levantamentos estatísticos conduzidos pelo IBGE no ano de 2010) estão consolidados na Tabela 2.2 levando em conta as áreas do entorno da CNAAA.

Para projeção populacional, foi utilizado o estudo da Ref. 5, com base nos dados do Censo Demográfico de 2010, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE com 15 km de raio e partição em setores circulares orientados segundo pontos cardeais. A distribuição do contingente populacional, atual e projetada, por setor circular, foi definida a partir das projeções formuladas para o setor censitário, unidade territorial de coleta que referencia espacialmente os levantamentos estatísticos conduzidos pelo IBGE no ano de 2010. A Figura 2.3 mostra a distribuição populacional pelos setores circulares.

A Tabela 2.3 apresenta a localização dos centros de saúde próximos à CNAAA.

### **2.1.3 Águas subterrâneas na região**

Existem dois aquíferos livres contínuos na região de Barra Grande Paraty e outro na região de Cunhambebe (Angra dos Reis), correspondentes a formações de sedimentos não consolidados, possivelmente propícios à exploração de poços rasos (inferiores a 50 m), com importância hidrogeológica razoavelmente grande e boa qualidade química. A produtividade hídrica pode ser considerada média a fraca, o

que corresponde a poços com capacidade específica entre 0,13 e 1 m<sup>3</sup>/h e vazão entre 2 e 3,25 m<sup>3</sup>/h, para um rebaixamento do nível d'água de 25 m.

O fluxo de água subterrânea está de acordo com a superfície topográfica, no sentido de Itaorna. O nível freático está em torno de 2 m abaixo da superfície, com gradiente de 0,5%, seguindo com um aumento da declividade na direção do mar, até alcançar o gradiente de 1%.

#### **2.1.4 Potencial de poluição do ar**

Em geral, a região é caracterizada por baixa velocidade do vento. Durante o dia os ventos predominantes são do oceano. À noite, os ventos continentais são predominantes. Estas condições são influenciadas pelo aquecimento solar durante o dia e resfriamento noturno. Nos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro as maiores incidências de alto índice de poluição atmosférica ocorrem durante o inverno, especialmente, nos períodos em que existe a permanência dos anticiclones polares sobre a costa sul do Brasil.

Nas primeiras horas do dia é comum ser observado, nesta região, a formação de nevoeiros entre as planícies que são circundadas pela Serra do Mar e até mesmo próximo ao oceano. Isto indica que a camada de mistura é bastante baixa, não ultrapassando as primeiras centenas de metros da superfície. Este tipo de fenômeno propicia pouca mistura turbulenta vertical, indicando que possíveis liberações de material na atmosfera favorecem o aumento da concentração de poluentes na camada atmosférica mais superficial.

#### **2.1.5 Ressacas**

A permanência do anticiclone polar sobre a costa sudeste do Brasil costuma provocar forte precipitação devido ao transporte de grande volume de ar marítimo para dentro do continente, associado às fortes rajadas de vento provenientes do oceano que acaba provocando a intensificação das ondas e adentrando sobre as primeiras dezenas de metros do continente. A região do empreendimento, apesar da região metropolitana do Rio de Janeiro localizada mais ao norte sofrer com este tipo de fenômeno, principalmente durante o inverno, não sofre particular influência da

ressaca, uma vez, que o quebra mar formado pela enseada ajuda a manter afastadas as grandes ondas formadas no litoral da região.

## **2.2 Prédios, reatores e sistemas do sítio da CNAAA que eventualmente entrarão no processo de Descomissionamento**

A CNAAA possui uma área de 12.494.200 m<sup>2</sup> [2] com três instalações nucleares do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), sendo duas delas em operação e a terceira, em construção, instalações de depósito de rejeitos radioativos e de laboratórios. Adicionalmente, serão construídos um depósito de combustíveis irradiados (UFC) e um prédio para monitoração de rejeitos radioativos.

Na Figura 2.4 pode ser observada uma vista topográfica do sítio destacando-se as três usinas e torres meteorológicas ao redor da CNAAA. Na Figura 2.5 apresentam-se mais detalhes sobre o sítio identificando as três usinas e as respectivas áreas que podem ser descomissionadas (pintadas de amarelo). Na Figura 2.6, mostrando outra parte do sítio, podem ser vistos os depósitos de rejeitos e a Usina Angra 1. A seguir são descritas as instalações que poderão entrar no processo de descomissionamento.

### **2.2.1 Principais edifícios das usinas nucleares**

Cada usina nuclear tem vários edifícios e alguns deles contêm material ativado e são objetos de descomissionamento. Os edifícios que são objetos de descomissionamento são: edifício do reator, edifício auxiliar, edifício do combustível e chaminés de descarga de gases e particulados. A seguir, apresenta-se uma breve descrição desses edifícios, que são comuns às três usinas conforme mostra a Figura 2.5.

O Edifício do Reator contém o vaso de pressão do reator e todos os equipamentos e sistemas para converter a energia nuclear em calor. Ele é internamente envolvido por uma camada de aço para proteção (contenção). A pressão dentro da contenção é menor em relação à externa para evitar liberações para o ambiente externo.

O Edifício Auxiliar do Reator é situado ao lado do Edifício do Reator, contém os sistemas auxiliares do reator e permite o acesso às áreas controladas, como

laboratórios e local de tratamento e estocagem de rejeitos contaminados. Neste edifício são realizadas as seguintes atividades ou ações de comando [2]:

- Estocagem e tratamento do fluido refrigerante do circuito primário,
- Estocagem, tratamento e monitoramento dos efluentes líquidos,
- Estocagem e processamento de efluentes líquidos ativados,
- Depósito inicial de tambores (embalados baixa e média atividade),
- Processamento de rejeitos gasosos,
- Compactação de rejeitos sólidos,
- Processos de purificação com filtros de carvão ativado,
- Tratamento dos resíduos do gerador de vapor,
- Resfriamento a água da piscina de combustíveis irradiados,
- Ventilação e resfriamento da contenção,
- Descontaminação de peças e materiais em oficinas quentes.

O Edifício do Combustível (e UJA) possuem uma estrutura reforçada de concreto para prover a proteção necessária contra a radiação. Ele é localizado adjacente ao Edifício do Reator para permitir o deslocamento do combustível irradiado da piscina do Edifício do Reator para o depósito do Edifício do Combustível. A passagem possui isolamento para evitar escape de radiação [1].

Assim como os combustíveis irradiados, os combustíveis novos também são estocados nesse edifício. Os combustíveis irradiados são estocados em uma piscina que promove a remoção do calor de decaimento e é segura quanto à criticalidade nuclear. As piscinas contem água borada e os elementos combustíveis irradiados são espaçados de acordo com segurança quanto a criticalidade. A piscina possui paredes e piso de concreto espesso [1].

A chaminé de descarga de gases consiste em um cone de concreto reforçado e é conectado no Edifício Auxiliar do Reator por dutos de ventilação e dutos de

suprimento de betume [2]. Os gases e aerossóis radioativos são monitorados antes de serem lançados à atmosfera [2].

## **2.2.2 Centro de Gerenciamento de Rejeitos - CGR**

### **2.2.2.1 Depósitos Iniciais de Rejeitos Radioativos**

A instalação é composta por 4 edifícios conforme mostra a Figura 2.6: Unidade 1, Unidade 2 (módulos A e B), Unidade 3 e Edifício de Depósito do Gerador de Vapor - DIGV. A finalidade da instalação é realizar o depósito de rejeitos de níveis médio e baixo e realizar a avaliação de impactos ambientais para a posterior transferência ao depósito final [1].

Os embalados de rejeitos apresentam características técnicas apropriadas para o transporte e depósito dos rejeitos radioativos. Os seguintes rejeitos podem ser estocados nesses embalados: resinas utilizadas, filtros, concentrados do evaporador e rejeitos radioativos compactados ou não compactados.

A Unidade 1 é um depósito de 70 m x 18 m, composta por 4 áreas: área de acesso, área de rejeitos de nível baixo, área de rejeitos de nível médio e uma área de depósito de tambores danificados e de manutenção.

A Unidade 2 tem dois módulos, A e B. O módulo A é um depósito de 37,88 m x 17,50 m, composto por 3 áreas: área de recepção e empacotamento de rejeitos, área de depósito de tambores e área de operação. O módulo B é um depósito de 32,10 m x 17,50 m e semelhante ao módulo A. Os dois módulos são separados.

A Unidade 3 é um depósito de 52,90 m x 20,55 m, composto por 4 áreas: 2 áreas de recebimento de embalados de rejeitos, uma área de depósito de tambor e uma área de operação.

### **2.2.2.2 Depósito Inicial do Gerador de Vapor - DIGV**

O depósito DIGV é uma estrutura de concreto reforçada, com 37,30 m x 24 m x 8 m, apresentando uma espessura de parede de 0,9 m, espessura do teto de 0,5 m e espessura de piso de 1 m de laje plana sobre camada de areia. A estrutura foi projetada para acomodar dois geradores de vapor antigos e poderá ser utilizada para



depositar outros equipamentos, como: tampa de vasos de pressão, partes do gerador de vapor e outros trocadores de calor, partes do evaporador de rejeitos, etc.

### 2.2.2.3 Prédio de Monitoração

A Eletronuclear planejou a construção do Prédio de Monitoração visando a Deposição dos rejeitos radioativos oriundos da operação da CNAAA. Dentre outros requisitos, em atendimento às Normas CNEN NN 3.01 [4] e CNEN NN 6.09, item 4.1 [6] - o tipo, composição e conteúdo de radionuclídeos do produto devem ser conhecidos e documentados com suficiente precisão para apresentar evidência de sua conformidade com os limites autorizados.

O Prédio de Monitoração da CNAAA será localizado na área controlada do CGR – Centro de Gerenciamento de Rejeitos entre os Depósitos Iniciais 1 e 2. Ele será construído em concreto armado devidamente dimensionado e projetado para garantir a segurança e a integridade dos rejeitos provenientes das Usinas.

O Prédio tem como finalidade principal realizar o levantamento e registro dos isótopos radioativos contidos nos embalados de rejeitos radioativos de baixo e médioníveis, gerados pelas Usinas Angra 1, Angra 2 e futuramente Angra 3. Ele também será dotado de facilidades para propiciar a abertura dos embalados, a fim de segregar os materiais contidos nos tambores, passíveis de serem descartados como lixo industrial, e ou reencapsulamento. Isso, juntamente com outras informações possibilitará a completa identificação e caracterização de cada embalado.

Quando do comissionamento deste prédio, a Eletronuclear irá iniciar as medições isotópicas dos embalados, de forma a obter o inventário de radionuclídeos de todos os embalados de rejeitos sólidos existentes na CNAAA. Com este trabalho, será possível obter o termo fonte dos embalados gerados.

### 2.2.3 Laboratórios

A CNAAA tem dois laboratórios que trabalham com materiais radioativos. O Laboratório de Calibração de Monitores de Radiação é uma área restrita de 138 m<sup>2</sup> e composta por 4 salas: depósito de fontes, sala de operação, sala de depósito de equipamentos e sala de exposição. A sua localização é apresentada na Figura 2.7, ao sul da Usina de Angra 1 e próximo ao Edifício de Diesel de Emergência [1].

O Laboratório de Monitoramento Ambiental está fora do sítio onde se encontram as 3 usinas nucleares. Este laboratório está situado a 10 km de distância das usinas nucleares na Vila de Mambucaba, como apresentado na Figura 2.8. O laboratório é dividido em várias salas de escritórios e monitoramento e laboratórios de química, biologia e instrumentação, incluindo laboratórios de radiometria e dosimetria [1].

#### **2.2.4 Unidade de Armazenamento Complementar de Combustível Irrradiado (UFC)**

A estocagem de elementos combustíveis irradiados ocorre nas piscinas de combustível irradiado. A Eletronuclear planeja construir uma instalação de armazenamento de combustível irradiado denominada Unidade de Armazenamento Complementar de Combustível Irrradiado (UFC) para complementar o armazenamento dos elementos combustíveis a serem gerados ao longo da vida das 3 usinas. A UFC terá racks de armazenamento úmido, com concepção semelhante das piscinas de combustível das usinas da CNAAA.

Prevê-se que a UFC terá dois módulos a serem implementados em diferentes fases de construção. O primeiro módulo está previsto para operar em 2018, e terá uma capacidade de armazenamento de cerca de 2.400 elementos combustíveis. O segundo módulo deve também ter a mesma capacidade e a decisão sobre a sua construção depende do calendário de execução do projeto DICOMBUS (depósito de combustível irradiado de longo prazo) sob responsabilidade Comissão Nacional de Energia Nuclear.

### **2.3 Descrição das Usinas do sítio de Angra**

#### **2.3.1 Descrição da Usina Angra 1**

A Usina Angra 1 possui um reator do tipo PWR, com dois loops de refrigeração do núcleo, composto por 121 elementos combustíveis e 33 barras de controles. Cada elemento combustível possui um arranjo quadricular de 256 posições (16x16) para alocar a vareta, sendo 235 posições ocupadas por varetas combustíveis, 20 por tubos guia e um tubo de instrumentação. O moderador do reator é a água com adição de ácido bórico. Este fluido também cumpre função de refrigerante do reator [1].

A Figura 2.9 demonstra o arranjo dos edifícios principais da Usina de Angra 1. Os principais edifícios a serem descomissionados são: o Edifício do Reator, Edifício Auxiliares do Reator, o Edifício do Combustível e o Edifício de Segurança.

O Edifício do Reator (Figura 2.10) é uma estrutura cilíndrica com diâmetro interno aproximadamente de 35,16 m e no topo possui um domo raso. As paredes possuem uma espessura de aproximadamente de 0,76 m e o domo possui 0,61 m de espessura. Dentro dela há uma estrutura de contenção de aço também com estrutura cilíndrica, possuindo um domo esférico no topo e uma parte inferior esférica/elipsoidal. O diâmetro interno e a altura são aproximadamente 32 m e 42 m, respectivamente, sendo a maior espessura da contenção de 3,82 cm. O espaço entre as duas estruturas citadas é de aproximadamente 1,5 m. Dentro do edifício está o reator e outros componentes do circuito primário: bombas, gerador de vapor, pressurizador e tubulações [1].

O Edifício do Combustível (Figura 2.11) é uma estrutura de concreto reforçado, situado adjacente ao Edifício do Reator para possibilitar o deslocamento dos combustíveis. Todas as partes da estrutura são isoladas.

Os Edifícios Auxiliares Norte e Sul (Figuras 2.12 e 2.13, respectivamente) são estruturas independentes e reforçadas de concreto e isoladas das estruturas adjacentes. Os dois edifícios são separados pelo Edifício de Segurança.

O Edifício de Segurança é uma estrutura de concreto reforçado com isolamento para assegurar a segurança da interface de separação. O edifício é projetado para resistir possíveis projéteis internos ou externos.

### **2.3.2 Descrição da Usina Angra 2**

A Usina Angra 2 possui um reator do tipo PWR com quatro loops de refrigeração do núcleo, composto por 193 elementos combustíveis e 61 barras de controles. O moderador do reator é a água com adição de ácido bórico que também cumpre a função de refrigerante do reator [2].

A Figura 2.14 mostra o arranjo dos edifícios principais da Usina Angra 2. Os principais edifícios a serem descomissionados são: o Edifício do Reator, Edifício Auxiliares do Reator e Chaminé de Descarga de Gases.

O Edifício do Reator (Figura 2.15 e Figura 2.16) possui uma estrutura cilíndrica de altura de 28,15 m acima do solo e 0,85 m abaixo do solo, com um teto esférico com diâmetro de 60,4 m, totalizando uma altura de 58,35 m. A parede da estrutura possui 0,6 m de espessura. Dentro há uma estrutura de contenção de aço, com diâmetro interno de aproximadamente 56 m e espessura de 3 cm. Dentro do prédio está o reator e outros componentes do circuito primário. As piscinas de depósito temporário dos combustíveis irradiados estão situadas dentro do Edifício do Reator na parte superior [2].

O Edifício Auxiliar do Reator (Figura 2.17) está situado adjacente ao Edifício do Reator. Ele contém os sistemas auxiliares do reator e o acesso central às áreas controladas, como laboratórios, depósito de rejeitos, Edifício do Reator, etc.

A Chaminé de Descarga de Gases (Figura 2.17) é uma estrutura cônica de concreto reforçado, com 155 m de altura. Está situada a frente da parede longitudinal do Edifício Auxiliar do Reator. Os dois primeiros níveis da estrutura são utilizados para depósito de betume e suprimentos convencionais para a usina. No nível intermediário é alocado um sistema de amostragem de ar, para realizar o monitoramento da descarga de aerossóis e gases radioativos do Edifício Auxiliar do Reator. O último nível é de fato a chaminé.

### **2.3.3 Descrição da Usina Angra 3**

A Usina Angra 3 encontra-se em construção. Ela é semelhante à Usina Angra 2 e possui um reator do tipo PWR. A Figura 2.18 mostra o arranjo dos edifícios principais da Usina Angra 3. Os principais edifícios sob descomissionamento são: Edifício do Reator, Edifício Auxiliares do Reator e Chaminé de Descarga de Gases.

O Edifício do Reator (Figura 2.19) possui uma estrutura cilíndrica de altura de 29,15 m, com um teto esférico com diâmetro de 58,30 m, totalizando uma altura de 58,30 m. Até a elevação de 0,15 m, o edifício apresenta uma base circular. A parede da estrutura toda possui 0,6 m de espessura. Dentro dela, há uma estrutura de contenção de aço, com diâmetro interno de aproximadamente 56 m e espessura de 3 cm. Dentro do prédio está o reator e outros componentes do circuito primário. As piscinas de depósito temporário dos combustíveis irradiados estão situadas dentro do Edifício do Reator na parte superior [3].

## **2.4 Histórico operacional das usinas da CNAAA**

### **2.4.1 Histórico da Usina Angra 1**

A Usina Angra 1 foi construída entre 1972 e 1982 e tem potência elétrica nominal de 640 MW. A primeira criticalidade foi estabelecida às 20h23 do dia 13/03/1982. A primeira sincronização na rede ocorreu às 15h26 do dia 01/04/1982 e a operação comercial começou em 01/01/1985. O fator de confiabilidade da usina é de 97% e a média de geração em relação ao potencial máximo, desde o início da operação comercial até 31/03/2013, é de 48,51% [7]. A Figura 2.20 mostra a energia elétrica bruta gerada pela usina entre 1985 e 2012 e evidencia, nos últimos 20 anos, um bom histórico de geração com desempenho compatível com as melhores práticas internacionais.

Desde o início da operação já foram realizados 18 recarregamentos de combustível em Angra 1. Nos primeiros anos de sua operação, Angra 1 enfrentou problemas com alguns equipamentos: os 48.000 tubos dos condensadores foram trocados por outros de titânio; alguns transformadores e os inversores estáticos tiveram de ser substituídos, e dois novos geradores de emergência a diesel precisaram ser instalados. Em 2009, houve a troca dos geradores de vapor entre o final de janeiro e o início de junho, ficando a Usina fora do Sistema Elétrico Nacional. Em março de 2013, ocorreu a troca da tampa do vaso do reator [7].

Os geradores de vapor e a tampa do vaso do reator, retirados da Usina Angra 1, foram armazenados no depósito de rejeitos DIGV.

### **2.4.2 Histórico da Usina Angra 2**

As obras civis da Usina Angra 2 iniciaram em 1976, entretanto, a partir de 1983 o empreendimento teve o seu ritmo progressivamente desacelerado devido à redução dos recursos financeiros disponíveis. Em 1996 reiniciaram-se as atividades de construção e a primeira criticalidade foi estabelecida no dia 14/07/2000. A potência nominal da Usina é de 1.350 MW. A primeira sincronização na rede ocorreu em 21/07/2000 e a operação comercial em 01/02/2001. O fator de confiabilidade da usina é de 97%. A média de geração em relação ao potencial máximo, desde o início da operação comercial (01/02/2001) até 31/03/2013, é de 82,87%. Ocorreram 9

recargas de combustível neste período [7]. A Figura 2.21 apresenta a eletricidade bruta gerada pela Usina Angra 2 entre 2001 e 2012.

A Usina Angra 2 tem um histórico operacional muito bom e em 2012 apresentou um desempenho de destaque. Segundo a Nucleonics Week, publicação americana especializada em energia nuclear, a unidade ocupou, no ano passado, o 18º lugar em produção entre as 437 usinas em operação no mundo, com uma produção bruta de 10.645.230 MW. O indicador de Fator de Disponibilidade para Angra 2, em 2012, foi de 92,06%.

Durante sua operação ocorreram manutenções programadas sem substituições de equipamentos importantes como ocorreu com a Usina Angra 1.

### **2.4.3 Histórico da Usina Angra 3**

A Usina Angra 3 está em construção. Suas obras foram iniciadas em 1984 e foram interrompidas em 1986. Entre 2007 e 2010, a Eletronuclear obteve as licenças e autorizações para reiniciar sua construção junto ao Conselho Nacional de Política Energética, Comissão Nacional de Energia Nuclear e Instituto Nacional do Meio Ambiente e Recursos Renováveis. A Usina Angra 3 será semelhante à Usina Angra 2, com projeto atualizado, incluindo melhorias desenvolvidas pela indústria nuclear. A potência nominal de Angra 3 será de 1.405 MW [7].

### **Referências**

1. Eletronuclear. Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto Unit 1 rev. 36. 2011.
2. Eletronuclear. Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto Unit 3 rev. 13. 2013.
3. Eletronuclear. Preliminary Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto Unit 3 rev. 3. 2010.
4. CNEN-NN-3.01, Diretrizes Básicas de Radioproteção, Norma CNEN-NN-3.01, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005.
5. CNEN-NN-6.09, Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, item 4.1, Norma CNEN-NN-6.09, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2002.

6. Projeção Radial da População Residente na Área de Influência Direta da Usina Nuclear Angra 2, Centro de Estudos da Faculdade de Engenharia da UERJ – CEFEN em 2012.
7. Guia Eletrobras Eletronuclear de Pronto Resposta, 2013.

Tabela 2.1– Populações próximas à Usina Angra 2, 2010.

<b>Distritos*</b>	<b>População</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Direção</b>
Cunhambebe	74.809	5-10	NE
<u>Mambucaba</u>	22.205	6-8	W
<u>Tarituba</u>	3.683	6-14	WS W
<b>Total</b>	<b>100.697</b>	-	-

Fonte: Censo Demográfico 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em 21/11/2013



Tabela 2.2 – Projeção e distribuição radial da população residente na área de influência direta da CNAAA.

Distância (km)	2010	2020	2030	2040	2050
	População na data do Censo	Projeção populacional	Projeção populacional	Projeção populacional	Projeção populacional
0 - 1	0	0	0	0	0
1 - 2	837	839	844	782	707
2 - 3	867	931	1053	1105	1071
3 - 4	226	288	372	533	593
4 - 5	1672	2014	2482	3514	3885
5 - 6	8622	11112	13931	19833	22915
6 - 7	11903	15453	19987	26316	39066
7 - 8	8661	11251	14595	19081	28949
8 - 9	1135	1398	1750	2488	2828
9 - 10	5268	6788	8482	12165	13527
10 - 11	2900	3727	4646	6657	7401
11 - 12	3072	3935	4900	6998	7754
12 - 13	2011	2585	3222	4203	5124
13 - 14	3949	5129	6640	8724	13022
14 - 15	10113	13137	17026	22322	33578
Total	61236	78587	99936	134721	180420

Fonte: Projeção radial da População Residente na Área de Influência Direta da Usina Nuclear Angra 2ª, realizado pelo Centro de Estudos da Faculdade de Engenharia da UERJ – CEFEN, 2012.

Tabela 2.3– Instituições de Saúde da região da CNAAA.

Instituição	Local	Direção	Distância (km)
Hospital da Praia Brava	Mambucaba – Angra dos Reis	W	2,14
Posto de Saúde	Cunhambebe - Angra dos Reis	NNE	5,08
Posto de Saúde Estratégia da Família Constância Dias de Souza	Cunhambebe - Angra dos Reis	NNE	5,75
Posto de Saúde Módulo Avançado Sertãozinho do Frade	Cunhambebe - Angra dos Reis	NNE	6,02
Posto de Saúde Programa de Saúde da Família Vila Histórica	Mambucaba – Angra dos Reis	WSW	6,19
Posto de Saúde	Mambucaba – Angra dos Reis	W	7,74
Posto de Saúde <u>Martiliano Azevedo</u>	Cunhambebe - Angra dos Reis	NE	10,63
Posto de Saúde <u>Bracuhy</u>	Cunhambebe - Angra dos Reis	NE	11,26
Posto de Saúde	Cunhambebe - Angra dos Reis	E	13,87
Posto de Saúde Estratégia Saúde da Família Morro da Carioca	Distrito sede - Angra dos Reis	E	14,05
Posto de Saúde Estratégia Saúde da Família Morro do Santo Antônio	Distrito sede - Angra dos Reis	E	14,08
Centro de Densitometria Óssea de Angra dos Reis	Distrito sede - Angra dos Reis	E	14,15
Posto de Saúde Pronto Atendimento Infantil	Distrito sede - Angra dos Reis	E	14,32
Unidade de Saúde Madrinha Augusta	Tarituba - Paraty	WSW	14,55
Unidade de Saúde Pontal	Distrito sede - Angra dos Reis	ENE	14,85
Pronto de Socorro Municipal	Distrito sede - Angra dos Reis	E	14,88

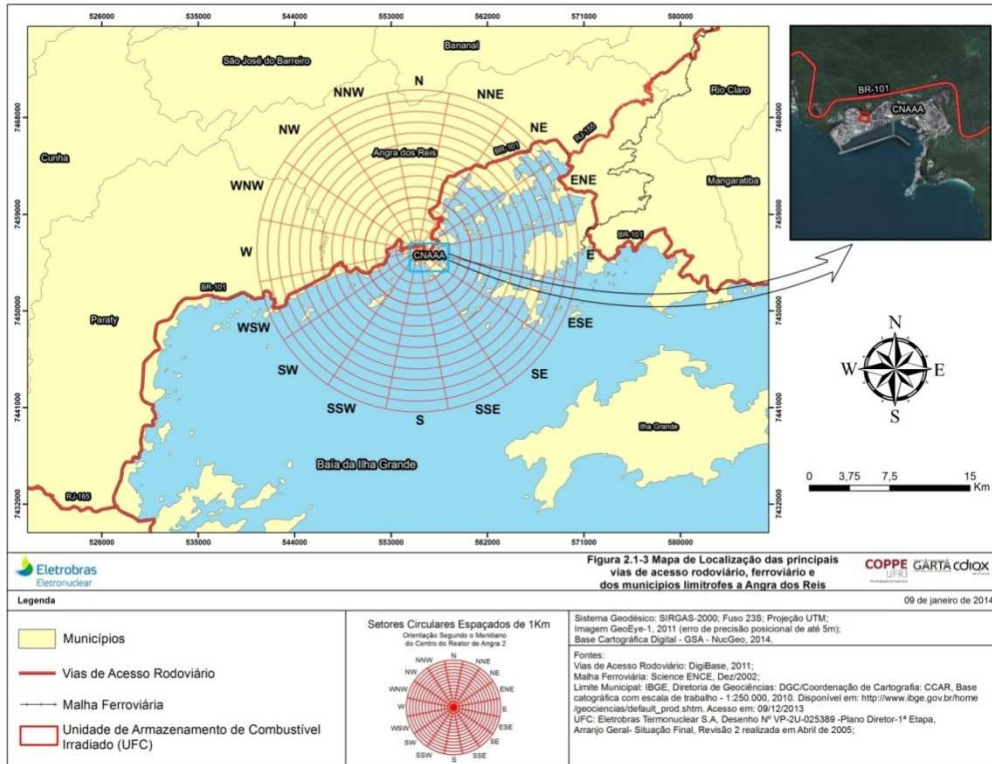


Figura 2.1– Localização da CNAAA em relação às principais via de acesso e municípios limítrofes.

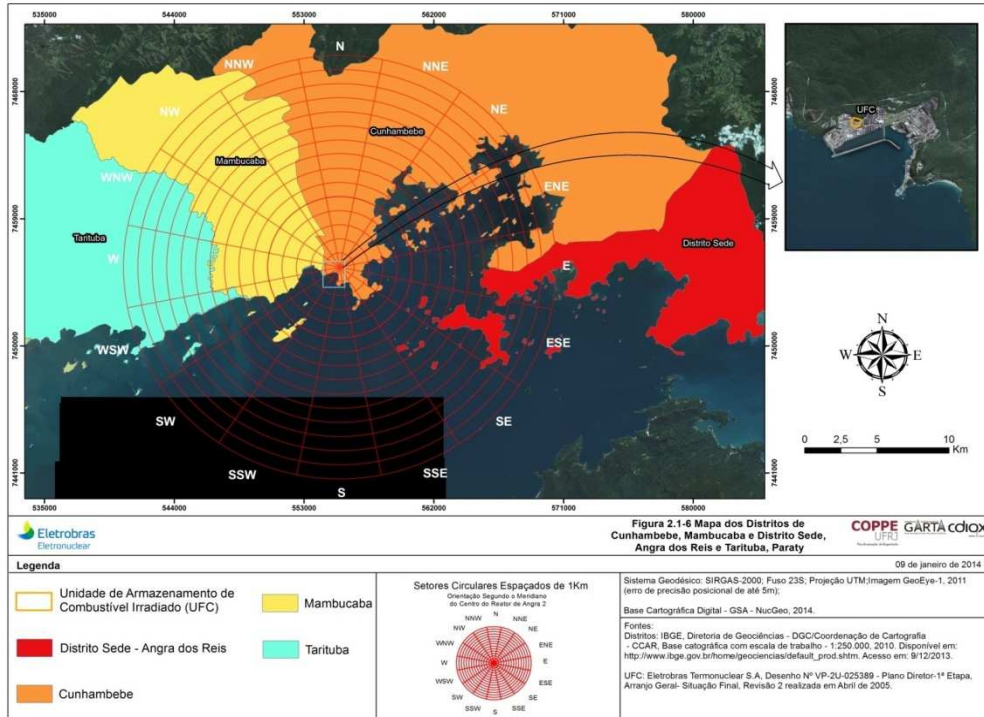


Figura 2.2– Localização dos distritos de Cunhambebe, Mambucaba e Distrito Sede de Angra dos Reis e Tarituba.

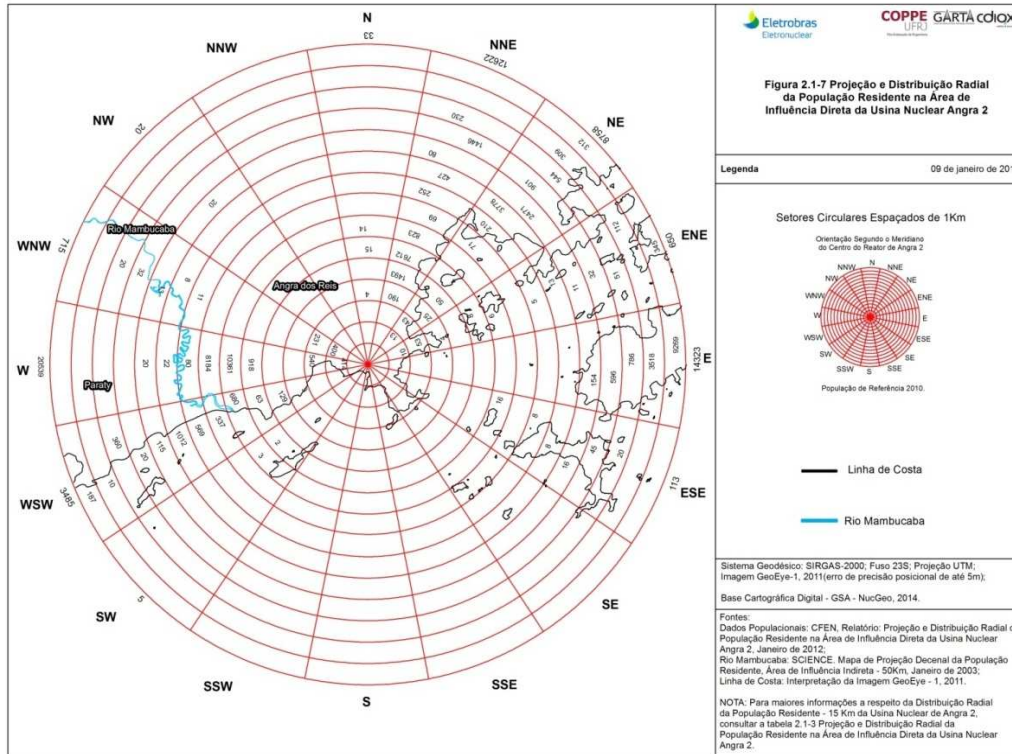


Figura 2.3– Distribuição populacional do censo demográfico de 2010 pelos setores circulares.





Figura 2.4–Topografia indicando os edifícios dos reatores Angra 1, 2 e 3 e a localização das torres meteorológicas em torno do sítio da CNAAA.

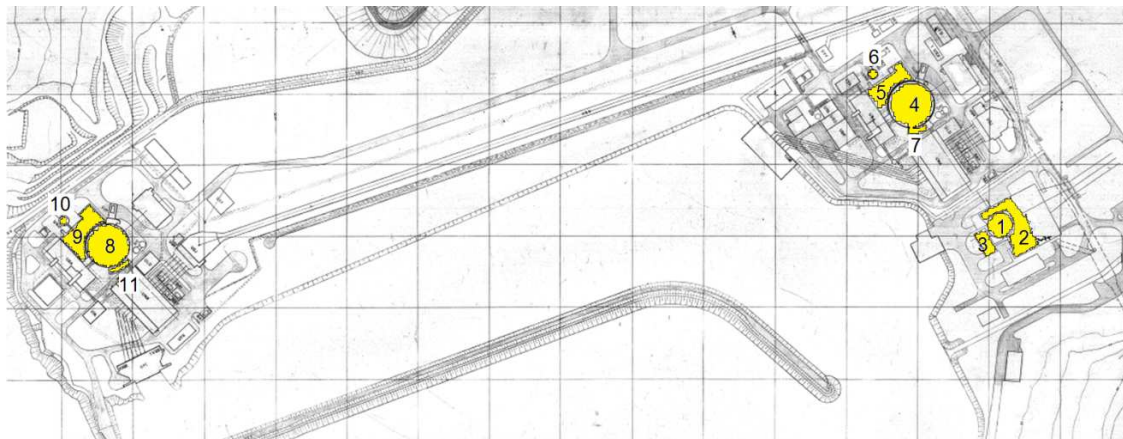


Figura 2.5–Sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, com as zonas quentes pintadas de amarelo. Fonte: adaptado de [3].

- |   |   |
|---|---|
| <b>1</b> – Edifício do Reator da Usina Angra 1                    | <b>2</b> – Edifício Auxiliar do Reator de Angra 1   |
| <b>3</b> – Edifício do Combustível de Angra 1                     | <b>4</b> – Edifício do Reator da Usina Angra 2      |
| <b>5</b> – Edifício Auxiliar do Reator de Angra 2                 | <b>6</b> – Chaminé de Descarga de Gases de Angra 2  |
| <b>7</b> – Compartimento de Válvula e Vapor Principal de Angra 2  | <b>8</b> – Edifício do Reator da Usina Angra 3      |
| <b>9</b> – Edifício Auxiliar do Reator de Angra 3                 | <b>10</b> – Chaminé de Descarga de Gases de Angra 3 |
| <b>11</b> – Compartimento de Válvula e Vapor Principal de Angra 3 |   |

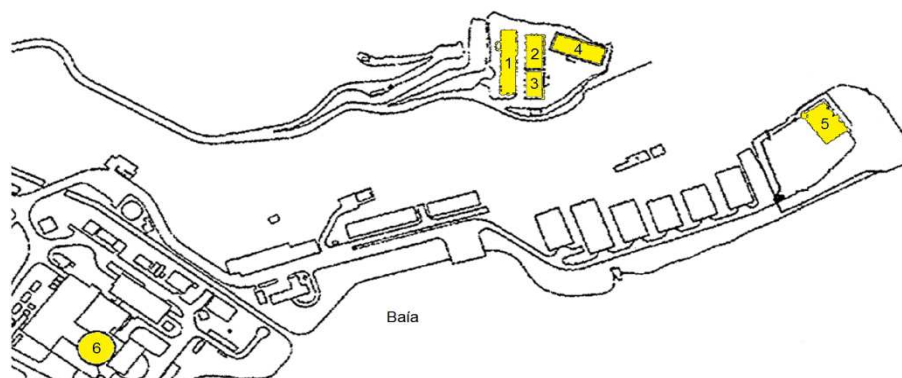


Figura 2.6–Localização da Instalação Provisória de Depósito de Rejeitos Radioativos.

Fonte: adaptado de [1].

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 – Depósito Unidade 1                          | 2 – Depósito Unidade 2<br>Módulo A |
| 3 – Depósito Unidade 2 Módulo B                 | 4 – Depósito Unidade 3             |
| 5 – Edifício de Depósito do Gerador<br>de Vapor | 6 – Usina Angra 1                  |



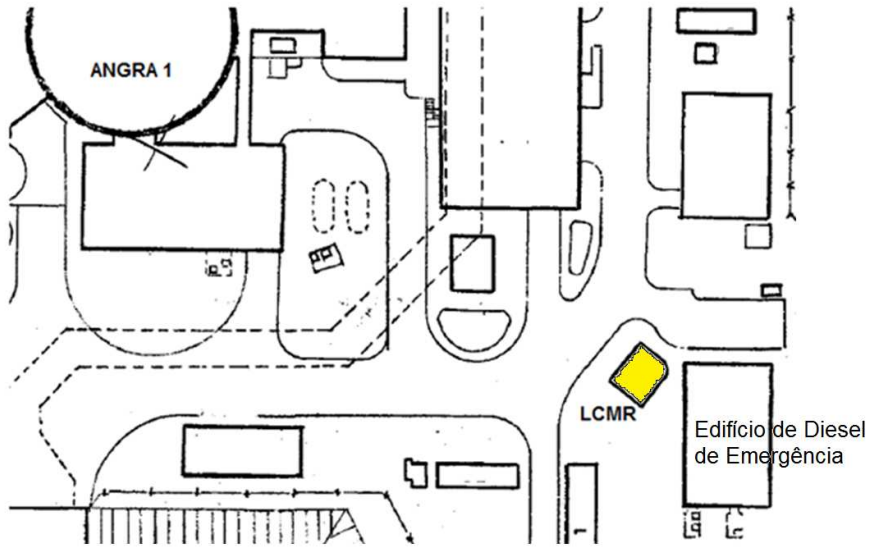


Figura 2.7–Localização do Laboratório de Calibração de Monitor de Radiação (LCMR). Fonte: adaptado de [1].

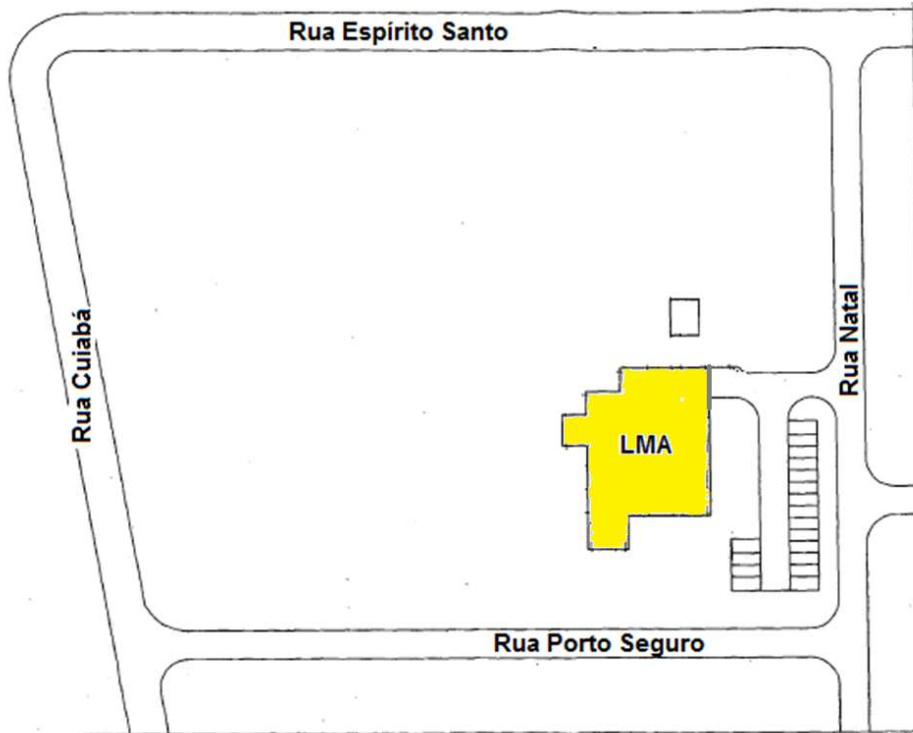


Figura 2.8—Localização do Laboratório de Monitoramento Ambiental (LMA) na vila de Mambucaba. Fonte: adaptado de [1].

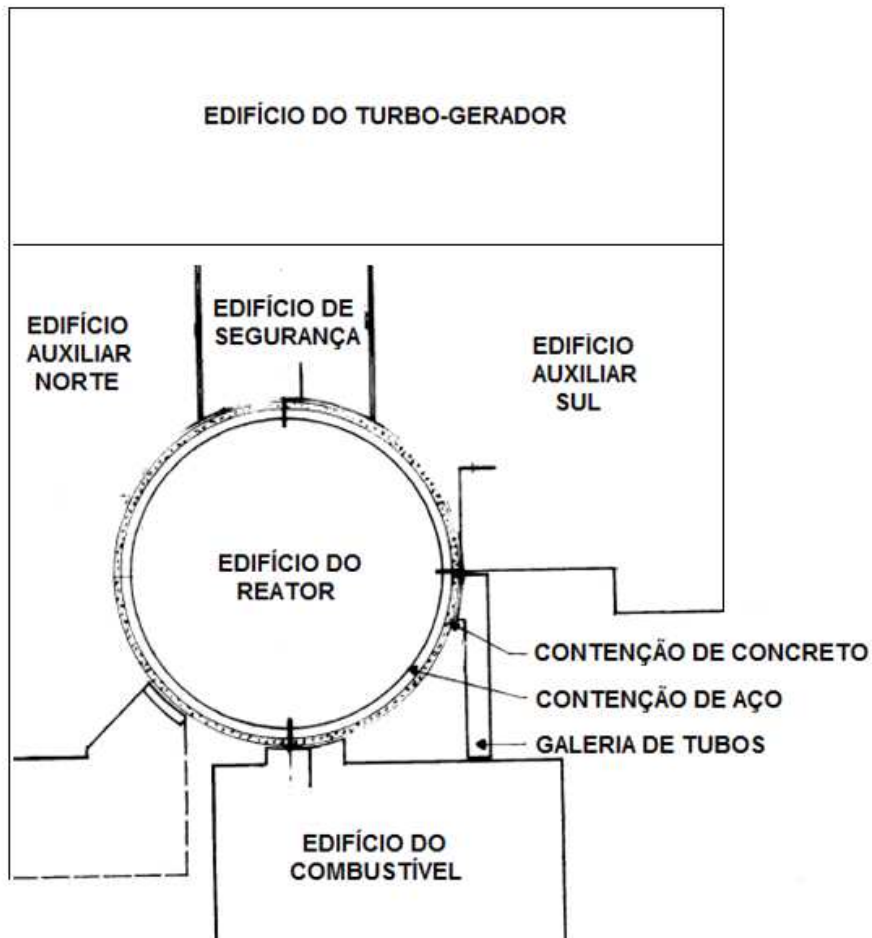


Figura 2.9—Planta esquemática da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1].

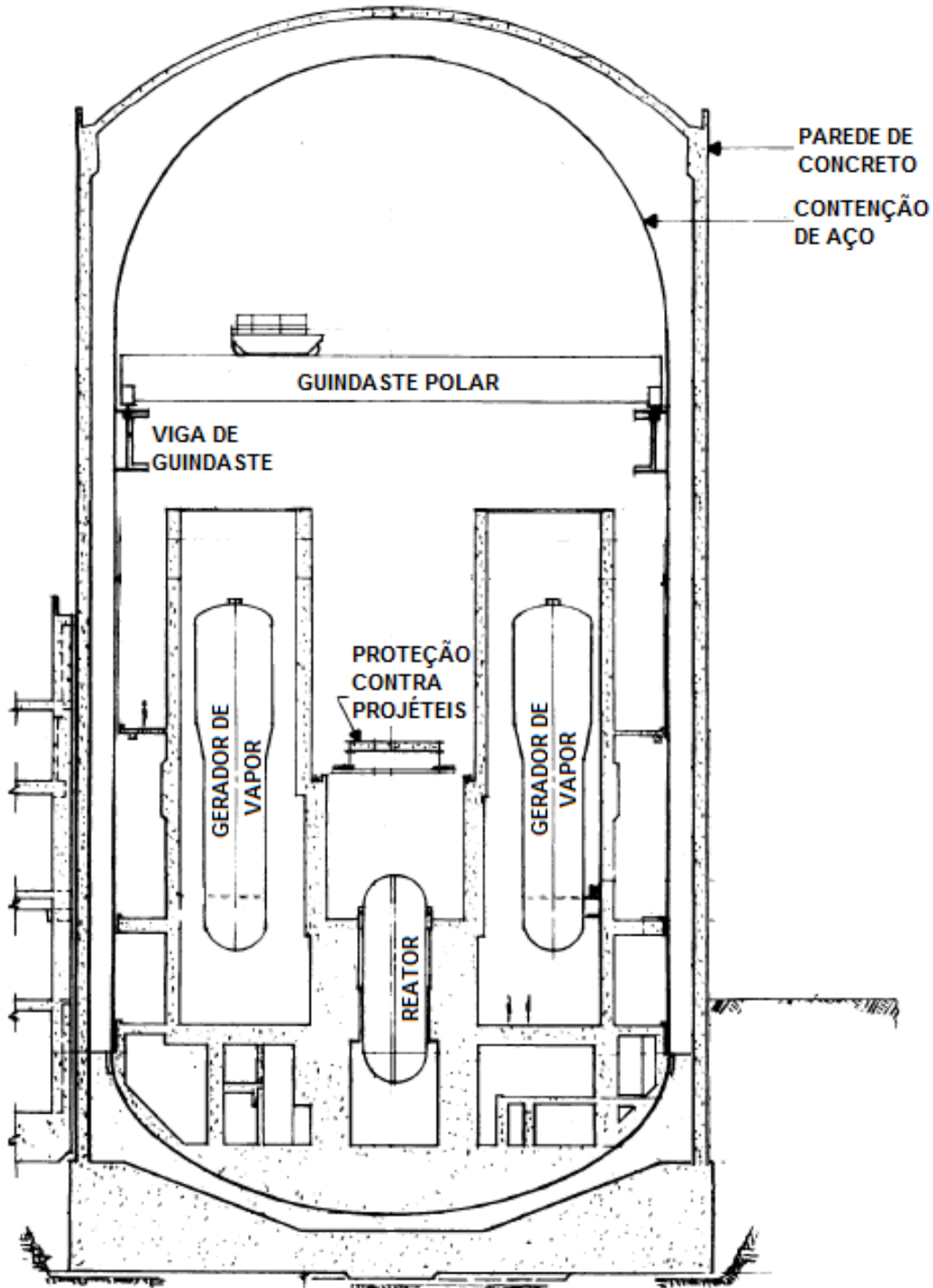


Figura 2.10–Vista esquemática Edifício do Reator da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1].

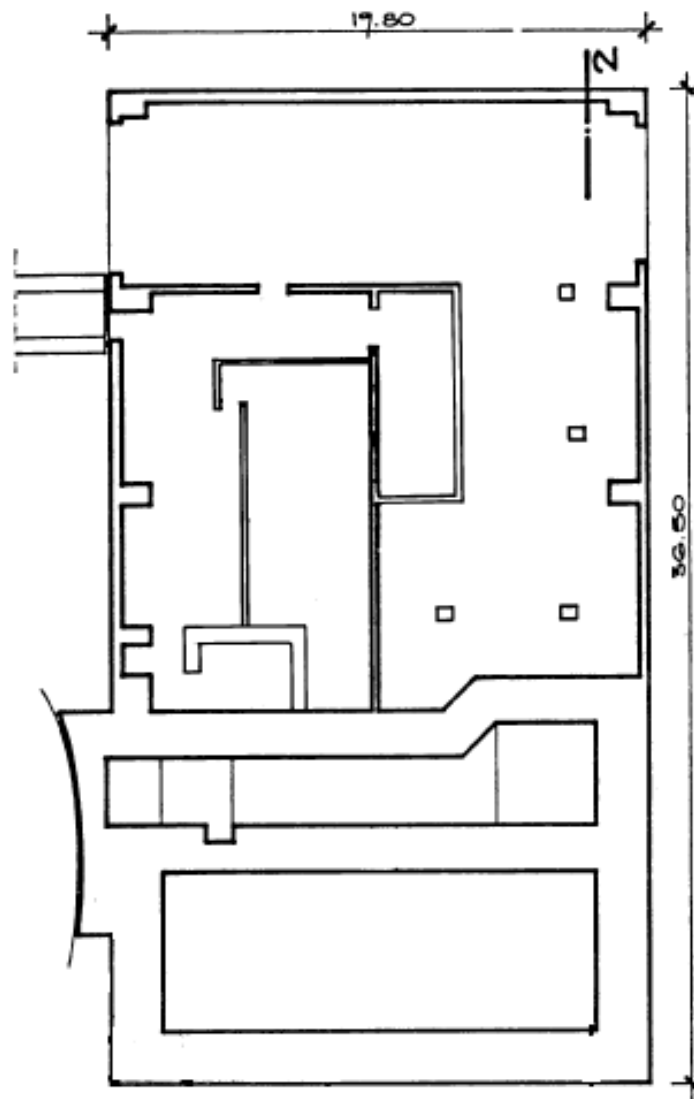


Figura 2.11– Planta esquemática do Edifício do Combustível da Usina Angra 1.

Fonte: adaptado de [1].

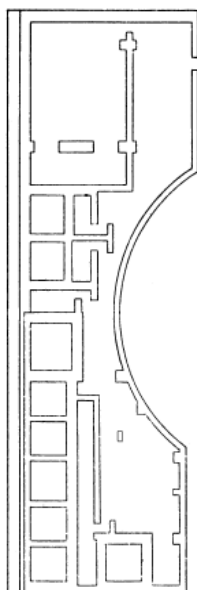


Figura 2.12–Planta do Edifício Auxiliar Norte da Usina Angra 1.

Fonte: adaptado de [1].

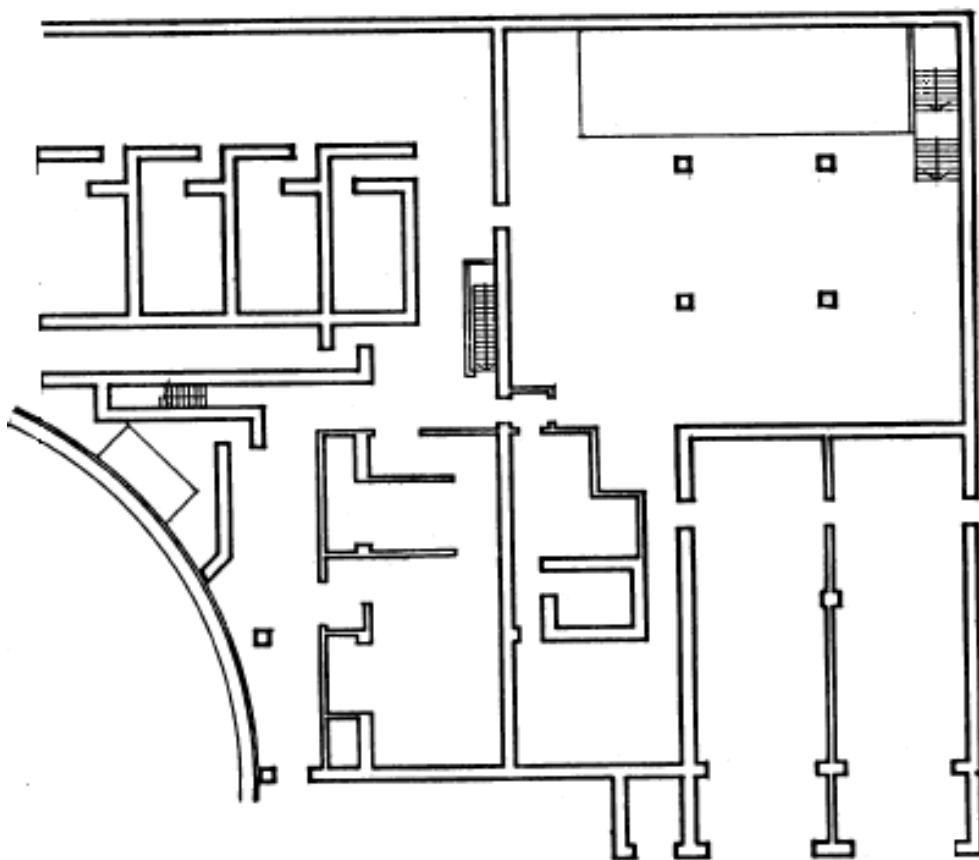


Figura 2.13—Planta do Edifício Auxiliar Sul da Usina Angra 1. Fonte: adaptado de [1].

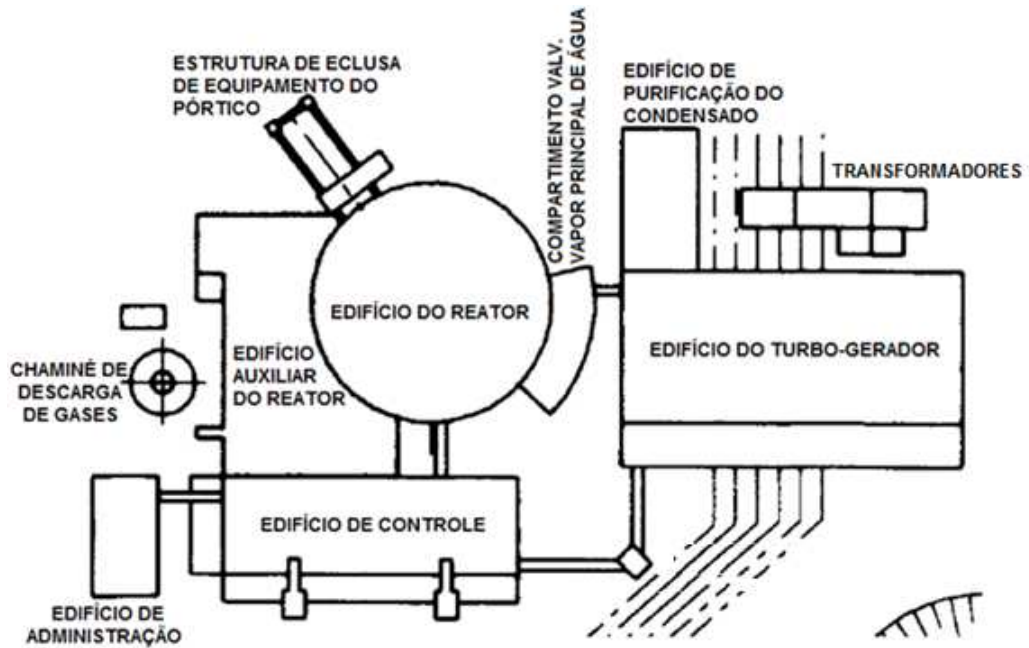


Figura 2.14—Planta esquemática da Usina Angra 2. Fonte: adaptado de [2].



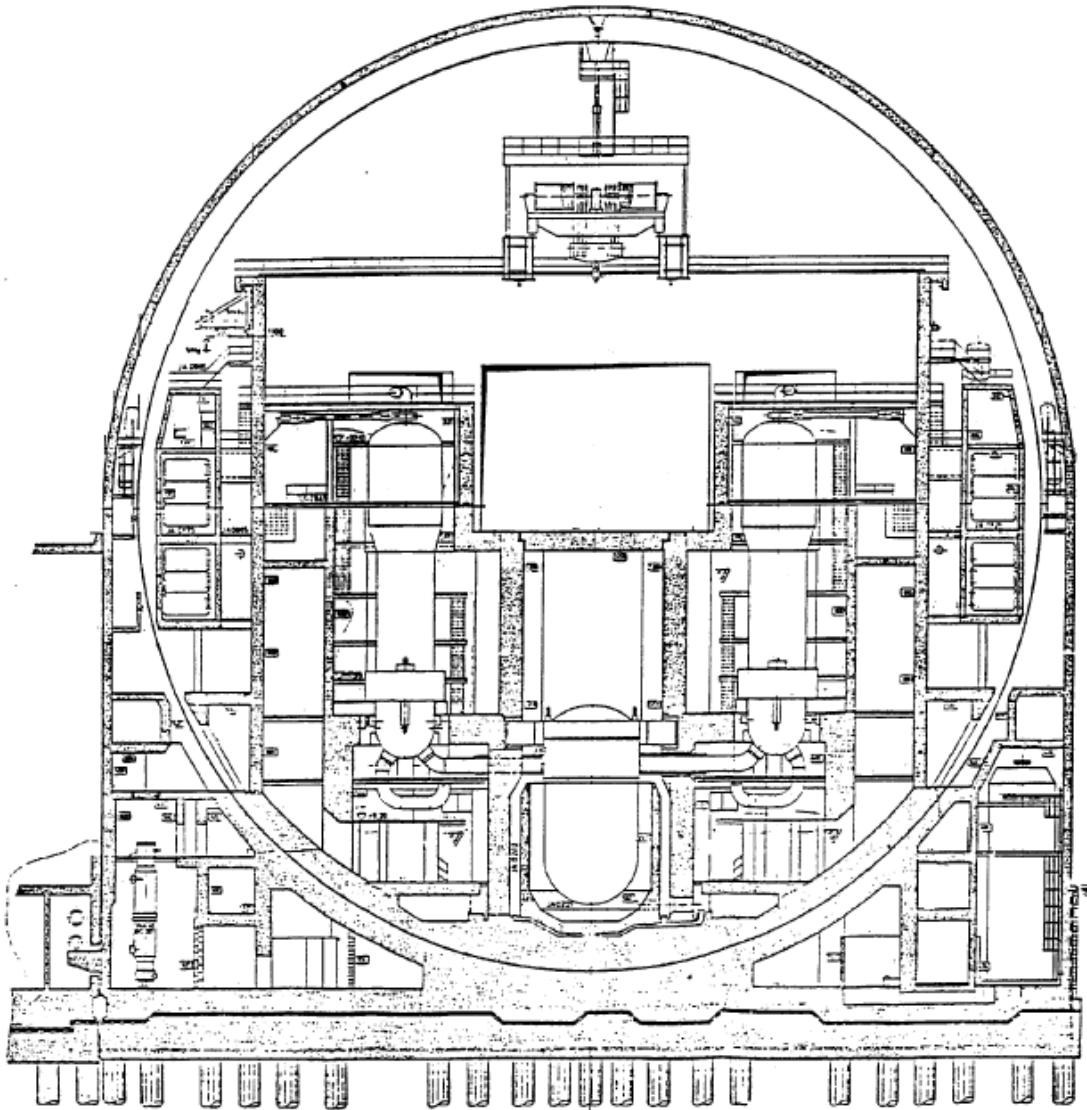


Figura 2.15– Vista esquemática do Edifício do Reator da Usina Angra 2. Fonte:  
adaptado de [2].

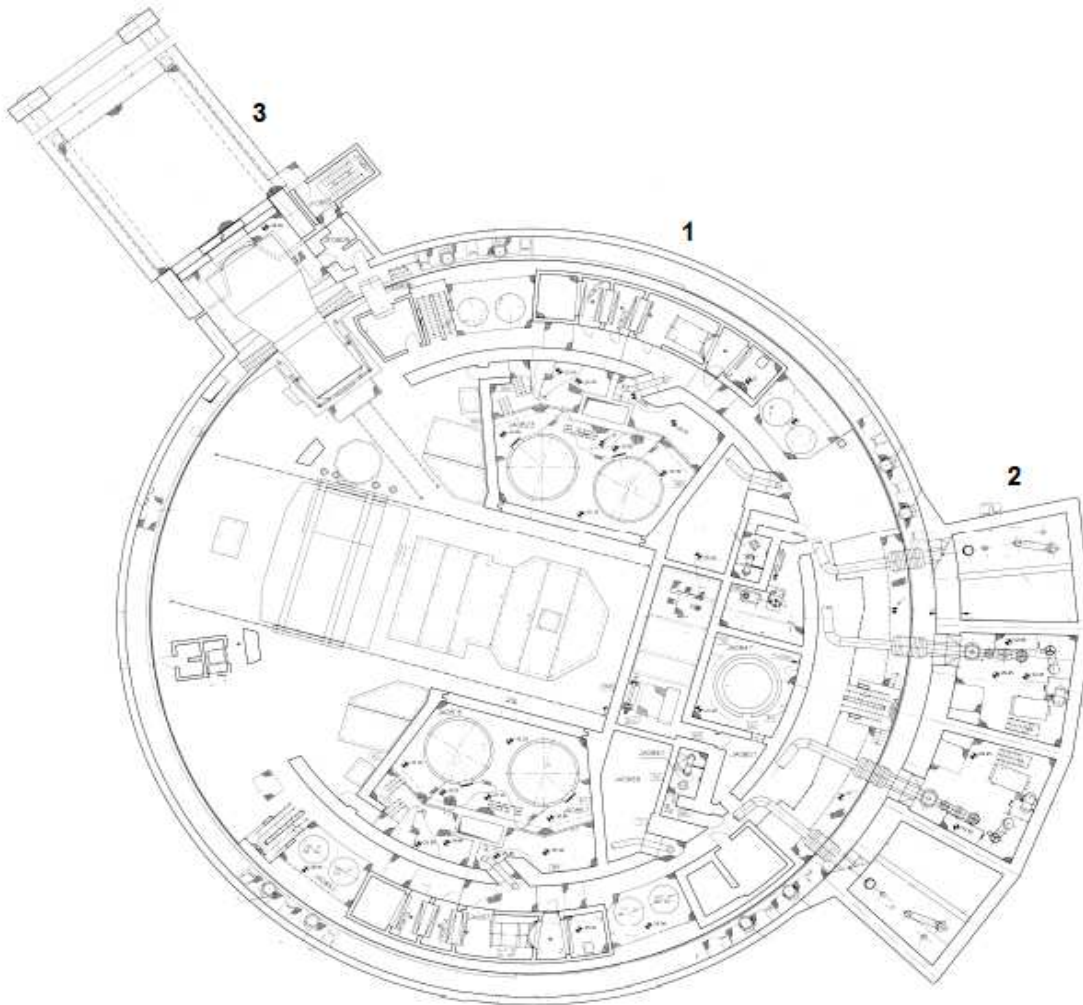


Figura 2.16– Vista esquemática da Usina Angra 2: (1) Edifício do Reator, (2) Compartimento de válvula e Vapor Principal e (3) Estrutura de Eclusa de Equipamento do Pórtico. Fonte: adaptado de [2-3].

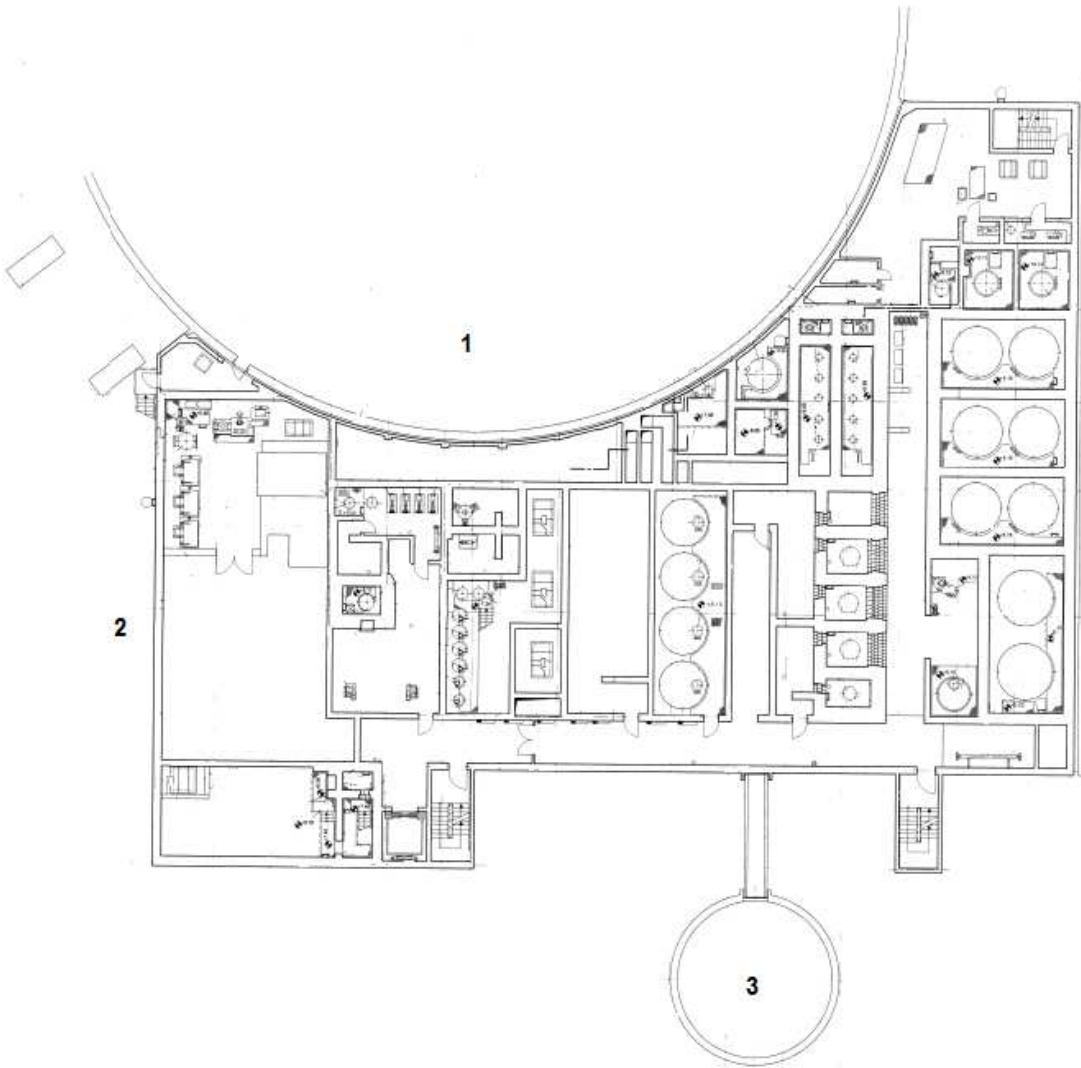


Figura 2.17– Vista esquemática da Usina Angra 2:(1) Edifício do Reator, (2) Edifício Auxiliar e (3) Chaminé de Descarga de Gases. Fonte: adaptado de [2-3].

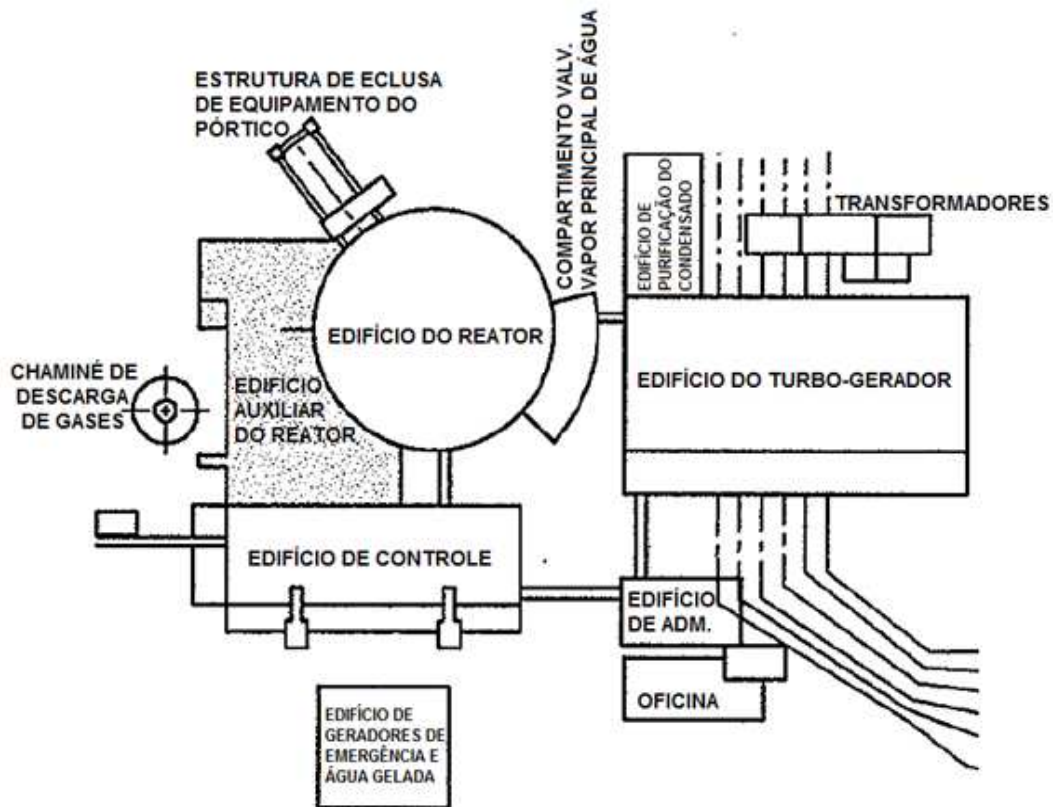


Figura 2.18– Planta esquemática da Usina Angra 3. Fonte: adaptado de [3]

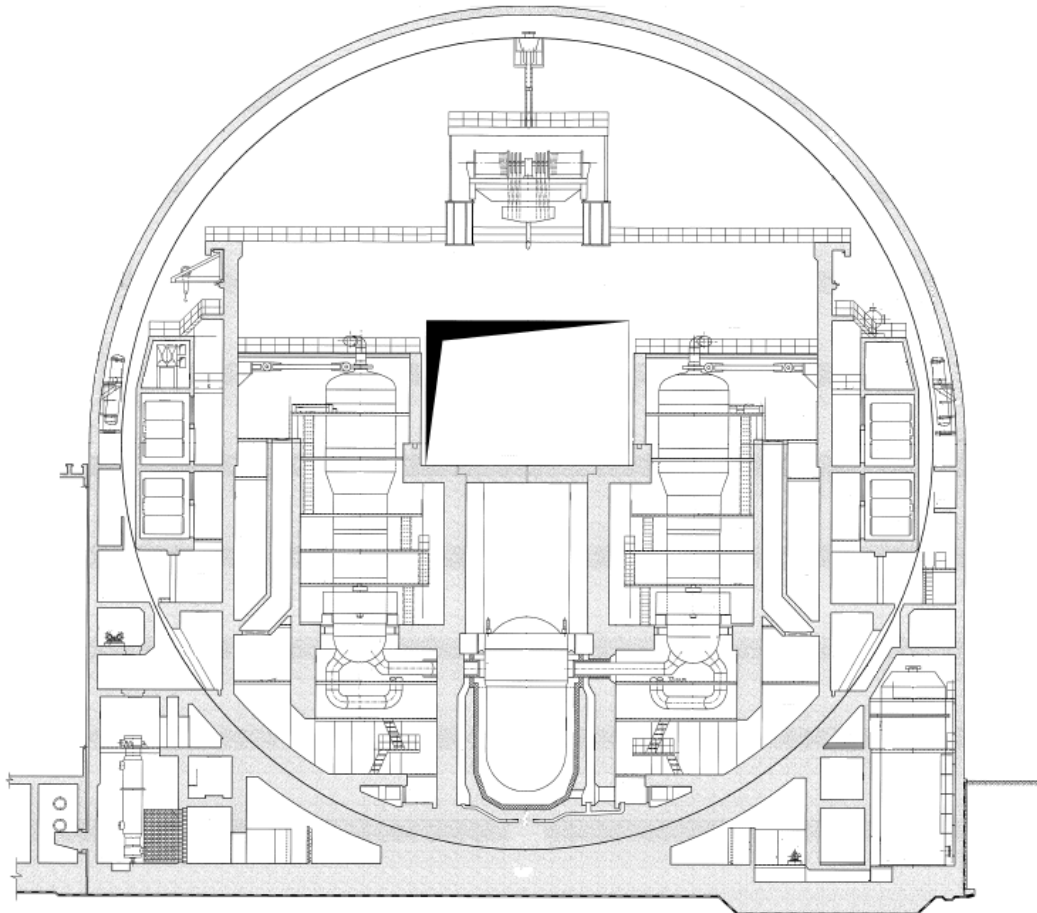


Figura 2.19– Vista esquemática do Edifício do Reator da Usina Angra 3. Fonte:  
adaptado de [3].

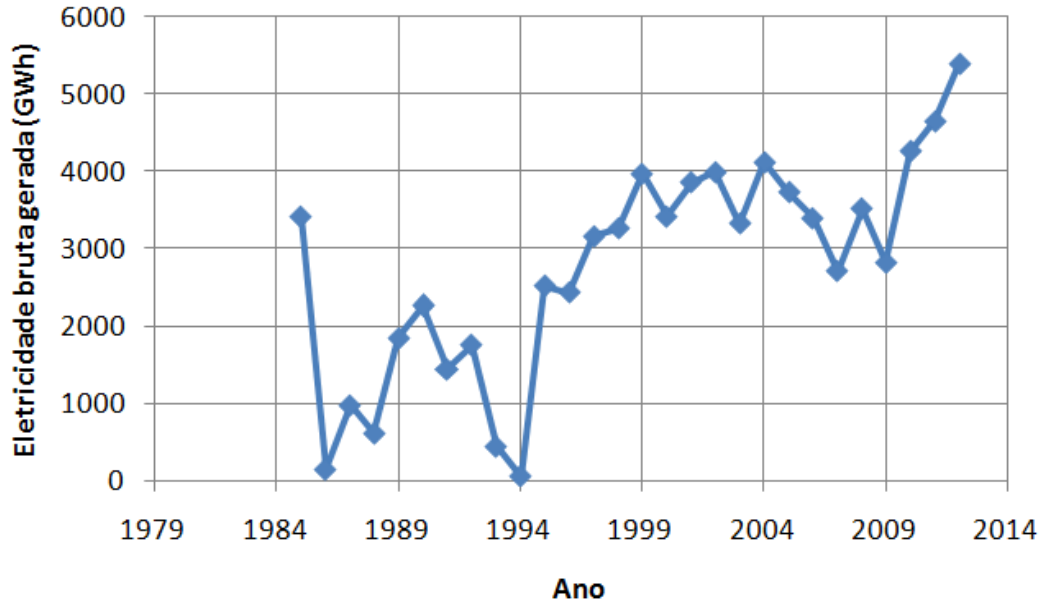


Figura 2.20– Eletricidade bruta gerada pela usina Angra 1 entre 1985 e 2012.

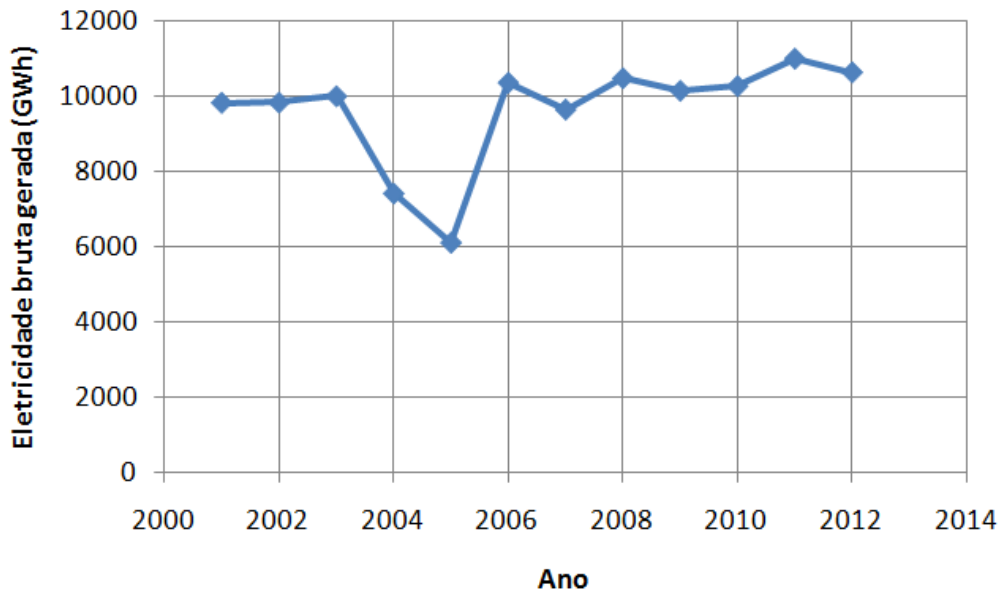


Figura 2.21– Eletricidade bruta gerada pela Usina Angra 2 entre 2001 e 2012.

### 3 ESTRATÉGIA DE DESCOMISSIONAMENTO

#### 3.1 Estratégias de Descomissionamento de acordo com a Resolução CNEN No. 133

A regulamentação brasileira para o descomissionamento de usinas nucleoeletricas, contida na Resolução Nº 133 da CNEN [1] e documentos da AIEA [2,3], definem três estratégias principais. As definições apresentadas na resolução são transcritas a seguir. As estratégias são:

a)

esmantelamento imediato (DECOM): *nesta estratégia, equipamentos, estruturas e partes da usina contendo contaminantes radioativos são removidos ou descontaminados até níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito, conforme critérios definidos ou aceitos pela CNEN. Esta estratégia implica em concluir o descomissionamento em um curto espaço de tempo e envolve a transferência do material e do rejeito radioativo para uma instalação licenciada, para seu processamento ou armazenamento ou deposição final, conforme aplicável.*

b) Desmantelamento protelado (SAFSTOR): *nesta estratégia, a usina é monitorada e mantida intacta por um período tal que permita o decaimento radioativo de itens contaminados ou ativados. Os materiais radioativos inicialmente presentes são processados ou colocados em condição tal que possam ser armazenados e mantidos em segurança durante esse período. Findo este, a usina será submetida a um desmantelamento, da mesma forma que na estratégia de desmantelamento imediato.*

c) Confinamento (ENTOMB): *nesta estratégia, os contaminantes radioativos são contidos em uma estrutura de material suficientemente resistente até que a radioatividade decaia para níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito.*

No desmantelamento imediato, todos os equipamentos, estruturas e materiais ativados são retirados o mais rapidamente possível após o desligamento definitivo da

D



planta. No desmantelamento protelado a planta pode ser mantida em estado seguro, durante um período prolongado de tempo, com o objetivo de permitir o decaimento da maior parte do material radioativo na usina. Esta ação pode facilitar os trabalhos de desmantelamento, podendo as equipes de trabalho atuar com menores doses de radiação, ao final do período de decaimento. Na terceira opção, que consiste do confinamento, todos os sistemas, estruturas e material radioativo são encapsulados com material resistente como concreto até a radiação atingir níveis muito baixos, de forma a permitir o uso irrestrito do sítio. Esta estratégia é semelhante à adotada em Chernobyl. Considerando a presença de radionuclídeos com meia vida superior a 100 anos, o tempo necessário para a radiação baixar a níveis razoáveis é muito longo. Por isto, esta estratégia deve ser considerada apenas em situações extremas.

As duas alternativas normalmente consideradas mais viáveis são aquelas referentes ao desmantelamento imediato e ao desmantelamento protelado. No caso do sítio de Angra, pode-se considerar uma possibilidade de combinação de estratégias que envolva também o confinamento de setores ou instalações para algum fim. Um exemplo disso seria confinar uma área do sítio para usar como depósito de rejeitos radioativos provenientes do descomissionamento aproveitando instalações existentes.

Estas alternativas requerem de uma forma geral de cinco tarefas principais:

1) Planejamento da desativação: Começa cerca de três anos antes do final da licença de operação. As atividades requerem especialistas em diversas áreas como em engenharia de desmantelamento, radioproteção, operação da planta, garantia de qualidade, manutenção, empreiteiros, contratos, segurança, apoio administrativo, etc.

2) Modificações pós-encerramento e preparações: Envolve a remoção do último núcleo do reator e vários componentes do circuito primário, tais como o vaso de pressão do reator, seus componentes internos elementos combustíveis e fluidos operacionais. De acordo com o relatório de desmantelamento de vários reatores [2], a remoção do vaso do reator e os seus componentes internos reduz a radioatividade da instalação em mais de 99 %. Além disso, todos os sistemas do circuito primário e auxiliares são descontaminados e secos. A atividade envolve, ainda, inspeção física da planta e seu levantamento radiométrico. A planta é colocada em condições seguras até o início do desmantelamento. Esta tarefa leva aproximadamente 1 ano.



3) Período de resfriamento ou decaimento radioativo: Com a planta em estado seguro, pode-se iniciar o período de espera para que ocorra o decaimento radioativo. Este período pode variar de 6 anos a várias décadas, de acordo com a estratégia adotada, até que os níveis de radiação sejam baixos, reduzindo, desta forma, o risco para os trabalhadores que irão dismantelar a planta.

4) Descontaminação e dismantelamento da planta: Esta tarefa inclui a descontaminação e/ou dismantelamento de todos os sistemas, equipamentos e materiais contaminados da instalação. Esses são removidos, separados, embalados apropriadamente e enviados para uma instalação de armazenamento final. Esta tarefa, que normalmente leva dois anos, produz uma grande quantidade de material radioativo, tal como grandes componentes do circuito primário, tubulações, válvulas, tanques, blindagem radiológica, células de armazenamento de combustível, concreto contaminado, etc. Todos estes materiais têm de ser cuidadosamente embalados e enviados para armazenamento em locais apropriados e monitorados.

5) Recuperação do terreno (remediação): Esta etapa tem o propósito de recuperar o terreno ao estado final definido no plano de descomissionamento. O estado final, define como o terreno deve ficar ao final do descomissionamento, estabelece usos futuros do terreno, necessidades de remediação do terreno e o grau de exposição da aos futuros usuários/população.

Note-se que os estudos para seleção de estratégia envolvem aspectos subjetivos que são sujeitos a julgamento, deixando potencialmente as conclusões abertas a mudanças.

O ponto chave é assegurar que há uma conexão entre a condição da instalação no momento do desligamento, as atividades de descomissionamento propostas, os riscos associados para realizar essas atividades, as ações necessárias resultantes da análise de segurança e os custos resultantes.

### **3.2 Fatores que influenciam as estratégias de descomissionamento da CNAAA**

Vários fatores podem influenciar a tomada de decisão para a estratégia do descomissionamento do sítio [3,4]. Os principais são características dos rejeitos gerados, integridade das estruturas do sítio, existência de pessoal com a formação

adequada para as atividades, disponibilidade de tecnologias de desmontagem, descontaminação e desmantelamento, potencial de reciclagem do material gerado, impactos socioambientais, possíveis danos ambientais, doses de radiação ao público e perda de empregos locais, disponibilidade de fundos para estas operações e atendimento à regulamentação nuclear e ambiental [3,4].

Alguns fatores podem ser considerados mais importantes como a definição do estado final do sítio, e para o caso da CNAAA, disponibilidade de depósitos para recebimento do material contaminado e interdependência entre as usinas, pois haverá a situação de uma Usina estar em processo de descomissionamento e outras em operação comercial [1,3,4].

A ocorrência de eventos inesperados também deve ser considerada. Um acidente pode alterar a estratégia prevista e o cronograma estabelecido. Dependendo da gravidade desses eventos pode-se produzir maior quantidade de rejeitos e afetar a operação das usinas remanescentes.

### **3.3 Alternativas consideradas para o Descomissionamento**

O sítio da CNAAA tem, no momento, duas usinas nucleares gerando energia e uma terceira em construção. Angra 1 iniciou a sua operação em 1985 e deve ser a primeira delas a ser desmantelada. Angra 2 iniciou funcionamento em 2001 e Angra 3 prevista para iniciar sua operação em 2020 [5]. Considerando tempos de operação de 40 anos para todas elas e nenhuma extensão de vida, a sequência de inícios de processo de descomissionamento seria Angra 1 em 2025, seguido por Angra 2 em 2041, e Angra 3 em 2060.

Duas alternativas são consideradas para o descomissionamento da CNAAA. Nas duas considera-se que as três usinas serão descomissionadas em sequência para obter ganhos de mobilização de recursos econômicos e de pessoal.

#### **3.3.1 Alternativa 1 – Descomissionamento protelado com início em 2061**

A primeira alternativa prevista de descomissionamento considera que Angra 1 e Angra 2 tenham seu desmantelamento protelado até que Angra 3 cesse sua operação em 2060. Assim, Angra 3 entraria em desmantelamento imediato. Esta alternativa é apresentada na Figura 1 com o respectivo cronograma.

Neste caso, o material radioativo de Angra 1 decairia por 39 anos, de Angra 2, por 25 anos e Angra 3 decairia por 8 anos. O sítio seria liberado, de acordo com o estado final definido, em 2068 considerando que as plantas não tenham sua vida útil prolongada. Em caso de 20 anos de extensão de vida, as datas dos eventos na Figura 1 seriam adiadas em 20 anos, sem mudança de estratégia.

### **3.3.2 Alternativa 2 – Descomissionamento protelado com início em 2083**

A segunda alternativa considera que o desmantelamento das usinas seria em sequência, pelas razões já mencionadas, todas as três usinas estariam em safstor, porém todo o processo de Angra 1 seria concluído em 60 anos, que é o período mais longo, recomendado e aceito pela NRC, para o processo de desmantelamento. Este caso é mostrado na Figura 2 onde se vê que o desmantelamento total de Angra inicia-se em 2083. Esta atividade pode ser realizada rapidamente contando-se com os recursos necessários. Atribui-se um tempo de 2 anos para conclusão desta atividade em condições ideais. O sítio seria liberado para uso geral após 2089, sem extensão da vida útil das usinas. As considerações feitas para a alternativa 1 também são válidas aqui.

### **3.3.3 Fatores de Interdependência entre as Usinas**

O posicionamento das 3 usinas dentro do sítio pode causar interferências entre atividades de descomissionamento de uma usina e a operação das outras. No caso do sítio de Angra, as usinas Angra 1 e Angra 2 estão próximas enquanto Angra 3 está mais separada. O descomissionamento de Angra 1 pode iniciar antes enquanto Angra 2 ainda pode estar operando. Deve haver a preocupação de evitar perturbação da operação de Angra 2 pelo descomissionamento de Angra 1.

Entre 2025 e 2026 pode haver atividades de descomissionamento intensas na Usina de Angra 1. Como esta usina está próxima da Usina de Angra 2 pode haver interferência das ações de descomissionamento na sua operação. As atividades perturbadoras serão: a remoção de equipamentos do circuito secundário (não contaminados), a remoção dos combustíveis irradiados, do vaso do reator e dos internos do vaso do reator, drenagem geral. Para evitar interferências é necessário definir uma área de ações de desmantelamento e descontaminação e rotas de passagens desses materiais pelo sítio da usina.

Na seção 3.3.4 discute-se o local de ações de descontaminação e desmantelamento.

As rotas para transporte de rejeitos radioativos poderiam ser pela pequena estrada entre Angra 1 e Angra 2 e o mar. Os materiais podem ser retirados do sítio através do cais existente á esquerda da usina. O transporte de rejeitos radioativos seria, neste caso, marítimo. Outra alternativa de transporte seria rodoviária. As rotas de saída do sítio seriam pela atual entrada de Angra 1 e Angra 2 ou pela entrada de Angra 3. Há a presença das linhas de transmissão de Angra 1 e Angra 2 e futuramente da de Angra 3 que passam acima dessas duas rotas rodoviárias.

Para o caso de se utilizar depósitos do sítio para armazenar parte dos rejeitos radioativos da usina de Angra 1, a rota a ser utilizada seria inicialmente pela estrada entre a as usinas e o mar.

Quando do descomissionamento inicial da Usina Angra 2 (entre 2041 e 2042) as interferências com a usina ainda em operação, Angra 3, seriam bem menores. Para o transporte marítimo poderia ser utilizado o cais a direita da usina de Angra 2. As rotas de transporte rodoviário seriam semelhantes às descritas acima para Angra 1.

Outro fator interdependente é o tempo de vida útil das usinas. Inicialmente de 40 anos. Entretanto, os tempos de vida podem ser ampliados afetando a cronologia e o planejamento do descomissionamento de todo o sítio.

Outro fator interdependente está ligado às vantagens econômicas de se fazer a mobilização de recursos em um só momento. Tal fator tende a favorecer a execução do descomissionamento das três usinas em sequência. Considerando a presença de três usinas nucleares no mesmo sítio, torna-se interessante, do ponto de vista econômico, uma estratégia que permita desmantelar as plantas em sequência. Tal opção possibilita o uso da mesma mão de obra, equipes treinadas, mesmos equipamentos, mesmas ferramentas de desmantelamento, mesmos galpões de separação e embalagem de material radioativo ou contaminado, mesmos meios de transporte para as três usinas e mesma instalação de tratamento de rejeitos, embalagem e descontaminação de água de processo. A mobilização de recursos e o ganho de experiência das equipes de trabalho podem ser também fatores de ganhos de eficiência no descomissionamento do sítio.

Outro fator interdependente e econômico está ligado às oportunidades antevistas pela Eletronuclear para uso de áreas do sítio que estejam em descomissionamento. Neste caso, uma decisão de acelerar o processo de descomissionamento para sua liberação para outros fins pode tornar-se interessante. Diferentes cronogramas implicam em diferentes doses de radiação para os trabalhadores, o que representa custos diferentes para a mão de obra no processo de demolição e estratégias diferentes para embalagem e transporte do material contaminado [6]. A decisão dependerá dos interesses da empresa e as circunstâncias do momento oportuno.

### **3.3.4 Fatores ligados à existência de depósitos externos**

Alguns fatores relacionados a disposição final dos rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento estão fora da atuação direta da Eletronuclear: a) disponibilidade de depósitos de rejeitos radioativos baixo e médio nível de radiação fora do sítio; b) a disponibilidade de depósito para os combustíveis nucleares irradiados fora do sítio (depósito de alto nível) e c) facilidades de transporte de rejeitos para os depósitos. Tais fatores afetam a decisão final sobre a estratégia a ser tomada. Contudo é possível não definir o objetivo final, como foi mencionado anteriormente [6] ou assumir que em 2063 ou 2084 (ver Figuras 3.1 e 3.2) os depósitos externos estarão disponíveis. Esta segunda alternativa parece ser a mais apropriada porque há tempo suficiente para tomar as providências necessárias. Há também exemplos de processos de descomissionamento que tomaram esta estratégia [4].

No estado de safstor o combustível irradiado, o fluido de drenagem do sistema primário, o vaso do reator e seus internos devem ser removidos e estocados/tratados em local apropriado. Dependendo de como o depósito final exigir o recebimento dos rejeitos, deverão ser definidas algumas estratégias com relação aos rejeitos gerados no processo de descomissionamento. O depósito UFC deve receber o combustível irradiado.

Para o acondicionamento adequado dos rejeitos gerados durante o descomissionamento é necessária a construção de uma instalação para tratamento de rejeitos adjacente à contenção. Uma opção interessante seria o desmantelamento do sistema secundário (prédio das turbinas) logo de imediato e sua adaptação para a

instalação de tratamento de rejeitos [7]. Para Angra 1, esta opção parece interessante pois interferiria menos na operação da Usina Angra 2, eliminando a necessidade de construção de área de tratamento de rejeitos na proximidade. Esta opção foi utilizada com sucesso, por exemplo, na Usina Jose Cabrera na Espanha.

Durante o descomissionamento são gerados rejeitos de alto nível no descomissionamento oriundos dos internos do vaso de pressão. Embora o volume seja pequeno eles requerem depósito/tratamento apropriado. O depósito de combustível irradiado UFC parece ser o melhor local para armazenar esses rejeitos. Se esta for a opção tal depósito deve ter uma área adequada para acomodar esses rejeitos.

Os grandes equipamentos como vaso do reator, geradores de vapor, bombas do primário e outros necessitam uma estratégia especial. Eles podem ser armazenados inteiros como ocorre hoje na usina no depósito do DIGV ou ainda cortados e compactados para a redução de volume, fundidos ou estocados.

A Eletronuclear construirá o prédio de monitoração de rejeitos radioativos no CGR e a UFC para a armazenagem de combustíveis irradiados. Ambas as instalações facilitarão as atividades de descomissionamento na CNAAA.

### 3.4 Estado final para o sítio

O estado final do sítio descreve como o site vai ficar ao final do processo de descomissionamento, estabelece usos futuros do sítio, a remediação necessária para se atingir o estado final e a população potencialmente exposta à radiação. O estado final do sítio tem influência direta na quantidade de trabalho e custo do descomissionamento. Há basicamente duas alternativas de estado final do sítio: *greenfield* ou *brownfield*. Na segunda alternativa, a necessidade de descontaminação das instalações e do solo pode ser reduzida e todo o processo de descomissionamento tornar-se mais barato.

Alguns planos de descomissionamento, entretanto, não definem o estado final do sítio deixando-o em aberto para uma decisão futura, após serem resolvidas questões técnicas ou empresariais [6]. Por exemplo, considera-se que provisoriamente partes do sítio sejam utilizadas para depósitos de rejeitos radioativos caso haja dificuldades ou impedimentos para se utilizar depósitos externos.

Inicialmente considera-se parte do sítio para armazenamento de rejeitos (confinamento).

Informações mais claras no futuro, impedimentos resolvidos ou planos empresariais mais bem definidos permitem mudar a decisão e alterar o estado final da CNAAA.

### **3.4.1 Definição de estado final do sítio da CNAAA**

O estado final do sítio da CNAAA após o descomissionamento, definido neste primeiro plano preliminar, é *brownfield*, pois considera a possível utilização do sítio para instalação de novos empreendimentos industriais, instalações radioativas e/ou de geração nucleoe elétrica, no futuro. Este estado final admite que partes do sítio de forma protegida sejam utilizadas para armazenagem de rejeitos radioativos. Esta alternativa é interessante por haver depósitos de rejeitos construídos no sítio da CNNA.

Esta definição pode ser alterada em revisões futuras do Plano Preliminar de Descomissionamento.

### **3.5 Alternativa escolhida para o descomissionamento da CNAAA**

Diante das opções acima a Eletronuclear considera primeira alternativa prevista de descomissionamento a melhor opção onde Angra 1 e Angra 2 tenham seu desmantelamento protelado até que Angra 3 cesse sua operação em 2060. Assim, Angra 3 entraria em desmantelamento imediato aproveitando mão de obra e otimizando custos gerais.

### **3.6 Justificativas para a escolha da estratégia**

As alternativas de estratégia para descomissionamento das usinas de Angra foram apresentadas e discutidas. As duas alternativas apresentadas se baseiam na estratégia de descomissionamento protelado. A diferença de 19 anos entre as duas alternativas produz taxas diferentes de exposição à radiação. Quanto mais tempo se espera para o decaimento, mais fácil se torna as atividades de descontaminação e de desmantelamento e diminui o nível de dose dos trabalhadores envolvidos. Reduzem-se assim os custos de pessoal.

A inexistência hoje de depósitos de rejeitos radioativos adequados para o descomissionamento, não parece ser problema. O retardamento do processo de descomissionamento dará tempo para a preparação da legislação e infraestrutura de armazenamento que o país ainda não dispõe.

### Referências

1. Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas, Resolução CNEN Nº 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012.
2. Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety Series no. 45, International Atomic Energy Agency, 2005.
3. Decommissioning planning for licensed activities, Regulatory Guide G-219 Canadian Nuclear Safety Commission, 2000.
4. Selection of decommissioning strategies: issues and factors, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1478, 2005.
5. Thierfeldt, S.; Podlaha, J.; Brenk, P. H.; Brenk, M. H. Inventory of best practices in the decommissioning of nuclear installations. Final Report, BS Project No. 0407-07, Aachen, Germany, 2006.
6. Brusa, L.; DeSantis, R.; Nurden, P. L.; Walkden, P.; Watson, B. The decommissioning of the Trino nuclear power plant, WM'02 Conference, Tucson, AZ, February 24-28, 2002.
7. Estratégia de Descomissionamento das Usinas Angra 1, 2 e 3, Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-003-01, Universidade Federal do ABC, 2014.



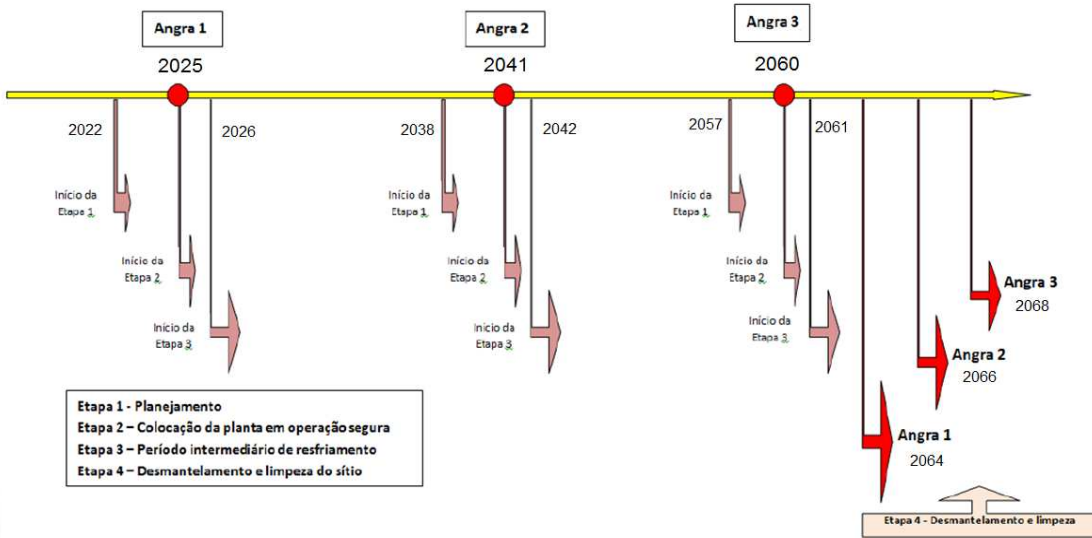


Figura 3.1– Alternativa 1 para o descomissionamento do sítio de Angra.

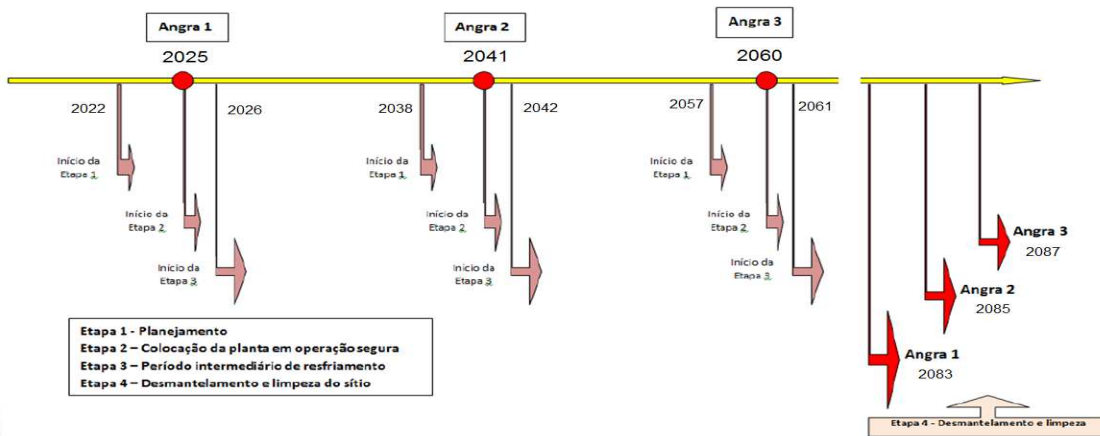


Figura 3.2– Alternativa 2 para o descomissionamento do sítio de Angra.

## **4 CRITÉRIOS E METODOLOGIA PARA O DESCOMISSIONAMENTO DA CNAAA**

### **4.1 Critérios para novas estruturas, sistemas e equipamentos, específicos para o Descomissionamento**

As atividades de descomissionamento podem requerer a construção ou instalação de novas estruturas, sistemas e equipamentos nas áreas de trabalho. Similarmente, as áreas da planta podem ter suas funções modificadas e sofrerem alterações necessárias. Estes novos itens e alterações devem ser projetados atendendo critérios de segurança física, industrial e radiológica condizentes com a construção e operação de instalações nucleares.

#### **4.1.1 Classificação de sistemas, componentes e estruturas nas áreas sob descomissionamento**

A classificação de segurança das áreas e dos sistemas, componentes e estruturas dos compartimentos, a serem adaptados para a realização das atividades de descomissionamento, será estabelecida através da avaliação da importância para a segurança de cada parte da instalação e atribuir a cada um deles uma das classes de segurança identificadas por Classe I e Classe II, definidas a seguir:

Classe I: Áreas e itens necessários para prevenir ou mitigar eventos que possam resultar em exposição de trabalhadores acima dos limites de proteção radiológica [1-4].

Classe II: Áreas e itens que não são pertencem à Classe I.

#### **4.1.2 Cargas devidas às atividades de descomissionamento e a equipamentos**

Para a realização de diversas atividades físicas de desmantelamento, deverão ser utilizados grandes equipamentos e sistemas para efetuar o corte, remoção e transporte de partes dos sistemas das usinas. Todas as estruturas, sistemas e equipamentos a serem utilizados devem ser dimensionados considerando-se os esforços solicitantes produzidos pelas cargas, permanentes e

acidentais e de todas as ações que possam produzir esforços importantes devidas ao processo e/ou equipamentos.

Nas condições de operação, a carga a ser considerada para o dimensionamento das bases dos equipamentos inclui a carga permanente, sobrecargas e efeitos dinâmicos.

## **4.2 Critérios de proteção radiológica**

As atividades operacionais de descomissionamento assemelham-se a atividades de manutenção ou de construção ou montagem reversas (desconstrução, desmontagem e desmantelamento). O ambiente onde as atividades ocorrem são caracterizados pela presença níveis elevados de radiação, contaminação e de particulados contaminados no ar e deverão seguir procedimentos operacionais de proteção radiológica a serem estabelecidos.

### **4.2.1 Taxas de exposição ocupacionais**

As atividades de descomissionamento devem seguir procedimentos que garantam que as taxas de exposição ocupacionais ALARA (“as low as reasonably achievable”) [4]. Da mesma forma, o projeto de alterações e de novas instalações de equipamentos, sistemas e estruturas nas áreas sob descomissionamento devem seguir critérios que garantam taxas de exposição ocupacional ALARA [3].

### **4.2.2 Proteção através de sistemas, barreiras e confinamentos**

Os compartimentos sob descomissionamento contêm materiais contaminados ou radioativos de diversas composições químicas e estados físicos. Para a proteção dos trabalhadores serão especificadas, quando necessárias, barreiras móveis contra radiação, sistemas de ventilação e confinamentos adequados para os compartimentos sob descomissionamento [3].

### **4.2.3 Controle de acesso**

O acesso de trabalhadores e visitantes, às áreas sob descomissionamento, deverá ocorrer por um único ponto de controle, a ser implementado por medidas administrativas (procedimento operacional da proteção radiológica) [2].

#### **4.2.4 Sistema de monitoração de radiação**

A radiação deve ser monitorada nas áreas sob descomissionamento. Esta monitoração abrange:

- Monitoração do Local, subdividida em monitoração da contaminação do ar, monitoração da contaminação de superfícies e monitoração do local de trabalho quanto à radiação externa, equipamentos para medição taxa dose e concentração em objetos, água e ar, disponibilidade de instalações para avaliação e análises de amostras radioativas e monitoração dos embalados;
- Monitoração Individual, subdividida em monitoração da irradiação externa, monitoração da contaminação de roupas e pele e monitoração da contaminação interna.

Alguns dos equipamentos utilizados, tanto na monitoração do local quanto na monitoração individual, são providos de sistemas de alarme sonoro e visual, os quais são ajustados de acordo com os limites previstos em norma [1]. Sempre que um destes monitores de radiação disparar seu alarme, a radioproteção deverá atuar investigando a causa, corrigindo o problema e, se necessário, intervindo na operação da instalação até que a situação retorne à normalidade.

#### **4.2.5 Ventilação e liberação gasosa**

Os materiais radioativos originados durante o descomissionamento requerem, também atendimento à critérios para preservação do meio ambiente e do público geral. O ar exaurido dos compartimentos sob descomissionamento devem passar por um sistema de filtração e purificação antes de ser liberado para a atmosfera. Os compartimentos que apresentem possibilidade de vazamento de qualquer material perigoso líquido, gasoso ou particulado, devem ser dotados de sistemas de pressão ambiente negativa. Este sistema, em caso de falha das barreiras físicas, promove a entrada do ar externo para a área afetada e impede a saída de eventuais materiais contaminantes para o meio ambiente.

### **4.3 Critérios de descontaminação**

A descontaminação de sistemas, equipamentos, estruturas, solo e águas é uma das principais atividades de descomissionamento.

#### **4.3.1 Estruturas, sistemas e equipamentos contaminados**

Os prédios contaminados, ou ativados, devem ser caracterizados informando a área dentro do prédio e a identificação da localização da contaminação (como paredes, piso, teto, quinas, etc). Os radionuclídeos encontrados dentro das estruturas, sistemas e equipamentos, também devem ser identificados em uma planta de forma a demonstrar a sua localização. As taxas de dose e níveis de contaminação devem ser apresentados (valores máximo e médio) para os diversos itens. A caracterização da contaminação também deve ser apresentada segundo um plano pré-estabelecido.

#### **4.3.2 Contaminação do solo**

Todos os locais que possuam contaminação do solo, superficial ou no subsolo, devem ser descritos, apresentando níveis de radiação e contaminação da área e delineando o espalhamento da contaminação durante a operação. A caracterização da contaminação deve ser apresentada contendo as atividades específicas (Bq/kg) máxima e média de cada local; e a forma química da contaminação. A contaminação, no subsolo, deve ser discutida com relação à penetração dos contaminantes; as estruturas subterrâneas e a área em torno dessas devem ser analisadas. A quantidade de solo prevista de ser removida também será informada.

As atividades realizadas nos solos superficial e subterrâneo serão apresentadas em ordem sequencial dos processos. Também devem ser apresentadas as técnicas empregadas e as medidas de segurança empregadas.

#### **4.3.3 Contaminação de águas**

Toda água que contiver resíduos radioativos e ou químico em excesso será indicada no mapa, sendo informadas as atividades máxima e média e o tipo de contaminante radioativo e ou químico presente segundo um plano.

As águas subterrâneas também devem ser analisadas providenciando as informações análogas às supracitadas. A coleta de amostra para a análise deve ser realizada de uma camada superior e de uma camada inferior às correntes de águas subterrâneas.

As atividades realizadas nas águas superficiais e subterrâneas serão apresentadas e ordenadas conforme ocorrerão os processos. As técnicas empregadas, assim como as medidas de segurança adotadas, devem ser apresentadas.

#### **4.4 Gerenciamento de rejeitos**

Durante o descomissionamento ocorrem atividades desmantelamento e remoção de equipamentos, sistemas e estruturas contaminados para fora do sítio. Estas atividades produzem resíduos sólidos, líquidos e particulados no ar que devem ser processados/filtrados adequadamente. Muitos desses resíduos constituem-se rejeitos radioativos.

##### **4.4.1 Identificação de correntes de rejeitos (waste streams)**

Todas as correntes de rejeitos geradas ao longo dos processos de descomissionamento devem identificadas e caracterizadas quanto a atividade e natureza física e química.

##### **4.4.2 Resíduos radioativos sólidos**

A descrição dos resíduos radioativos sólidos que se espera gerar durante o descomissionamento deve ser providenciada incluindo: solo, concreto, itens de plástico, tubulações contaminadas e materiais de estrutura como aço, componentes ativados, etc. As estimativas devem ser volume de resíduos (m<sup>3</sup>) ou massa de resíduos (kg) e atividade dos radionuclídeos (Bq).

Também devem ser descritos os procedimentos de tratamento, condicionamento, embalagem e estocagem, além de métodos de redução de volumes adotados. A localização, onde serão dispostos os rejeitos, deve ser mencionada e os procedimentos de monitoramento e rastreamento também serão descritos.

#### **4.4.3 Resíduos radioativos líquidos e gasosos**

Toda a liberação de efluentes dos edifícios será monitorada e deve estar dentro dos limites [1,2]. Os procedimentos de tratamento dos resíduos radioativos líquidos devem seguir os procedimentos adotados para as usinas da CNAAA [5,6].

#### **4.4.4 Resíduos contendo material radioativo e outros materiais perigosos**

Os resíduos que apresentam radioatividade e outros materiais perigosos devem ser identificados. A natureza do perigo químico ou industrial deve ser apresentada e assim como os respectivos volumes. Também devem ser descritos os procedimentos de tratamento, condicionamento, embalagem, estocagem e cuidados especiais para mitigar riscos. A localização onde esses resíduos serão dispostos deve ser mencionada e os procedimentos de monitoramento e rastreio, descritos.

#### **4.5 Segurança quanto a perigos industriais**

As medidas de segurança quanto a perigos industriais visam evitar acidentes, incêndios e doenças profissionais ou minimizar os seus efeitos. As operações envolvendo produtos químicos perigosos também causam dano ao meio ambiente e aos trabalhadores.

##### **4.5.1 Critérios de arranjo de sistemas e equipamento**

A disposição física dos sistemas e equipamentos das unidades prevê espaço adequado para as atividades de operação e manutenção, o espaçamento necessário à execução dos procedimentos de controle radiológico necessário, definido pela proteção radiológica da unidade. Na disposição física, para o descomissionamento deverão ser consideradas rotas para a circulação de operadores e equipamentos.

##### **4.5.2 Sistemas de monitoração e alarmes**

Os compartimentos dispõem de sistemas de monitoração e alarmes de proteção contra perigos industriais como detecção de incêndio e detecção de vazamento de gases perigosos que possam surgir durante as atividades de descomissionamento.

Estes sistemas são necessários para proporcionar o controle eficaz e seguro das atividades de descomissionamento, preservar os operadores dos efeitos nocivos

do ambiente interno dos compartimentos, indicar a ocorrência de anormalidades operacionais de forma imediata e segura e minimizar as consequências das condições de defeitos ou de acidentes.

#### **4.5.3 Proteção contra incêndio e explosão**

Os critérios adotados para garantir o desempenho satisfatório das funções de segurança em condições de incêndio e explosão compreendem os seguintes tópicos:

- a) prevenção de um princípio de incêndio, através da aplicação das medidas administrativas.
- b) rápida detecção e pronto combate a qualquer princípio de incêndio, que venha a ocorrer na instalação.
- c) confinamento do incêndio, através da presença das barreiras corta fogo, no sentido de se impedir que o fogo se propague para o restante da instalação.

Todos os compartimentos com atividades de descomissionamento serão providos de sensores de fumaça associados a alarmes que devem acionar a brigada de incêndio, de acordo com os procedimentos do sítio de Angra.

#### **4.5.4 Manutenção e inspeções**

Antes do descomissionamento iniciar, uma inspeção e um programa de rotina de manutenção deverá ser implementado para todos os sistemas e componentes relacionados com a segurança que serão necessários para suportar as atividades de desmantelamento (por exemplo: controle de ventilação, rede de proteção contra incêndio, água, filtros, monitores de radiação, bombas especificados, motores, ventiladores). Estes sistemas e componentes terão de ser mantidos durante todo o projeto de descomissionamento e cumprir com os requisitos de segurança.

Um grupo específico deve ser responsável por realizar inspeções dos equipamento e manter registros de manutenções realizadas, os defeitos encontrados e ações corretivas tomadas. O grupo deverá ser constituído por eletricitas, encanadores e outros especialistas familiarizados com os vários sistemas de apoio da Usina.



#### **4.5.5 Registros e documentação**

Toda a documentação relevante relacionada com o projeto, construção, comissionamento, fases de operação e do descomissionamento das instalações devem ser mantidas arquivadas durante todo período de descomissionamento. Onde o descomissionamento postergado é parte da estratégia da operadora, é importante para garantir o armazenamento seguro de longo prazo para tais registros.

#### **4.5.6 Proteção Física**

As atividades de Proteção Física para as áreas protegida e vitais das unidades operacionais, obrigatoriamente, devem ser exercidas por Guarda Própria, a qual a Lei define como sendo Segurança Orgânica Privada, regidas por legislações Estaduais e Federais específicas a esta categoria de Segurança.

#### **4.6 Metodologia adotada para o Descomissionamento do sítio da CNAAA**

A metodologia para a realização do descomissionamento segue uma sequencia detalhada de atividades, baseada nas condições específicas das centrais nucleares, como por exemplo, o inventário de materiais radioativos da planta e os objetivos a serem alcançados [7-9]. As principais etapas de grandes atividades são [7-10]:

- E1 - Planejamento e preparação (aproximadamente 24 a 30 meses)
- E2 - Desativação da planta (aproximadamente 8 meses)
- E3 - Operação segura da planta desativada (7 a 58 anos)
- E4 - Descontaminação e desmantelamento
- E5 - Recuperação do terreno

As etapas seguem a sequência natural do processo, mas algumas atividades de etapas distintas podem ser realizadas em paralelo dependendo da estratégia escolhida. A etapa E1 de planejamento e preparação consiste nas atividades de engenharia e de planejamento antes da remoção do combustível da usina. Grande parte dela é realizada em paralelo à operação comercial da usina. A etapa E2 consiste nas atividades de desativação e descontaminação radioativa dos sistemas da usina para colocá-la numa situação segura de desligamento permanente.

Algumas atividades de desmantelamento podem ser realizadas nesta etapa visando facilitar a sequência do processo de descomissionamento. A etapa E3 consiste na operação da usina desativada. As principais ações são atividades de monitoramento da usina, colocada em situação segura, até ter início o processo de desmantelamento. A etapa E4 consiste nas atividades de descontaminação radiológica e desmantelamento dos sistemas e estruturas da usina para encerramento definitivo das responsabilidades da operadora. Demolição de estruturas não contaminadas deve ser incluída separadamente. A etapa E5 consiste nas atividades finais relacionadas ao objetivo estabelecido como estado final do sítio após o descomissionamento. São atividades de limpeza final, caracterização do sítio e remediação.

As principais atividades de cada dessas etapas são detalhadas na Seção 12.

### Referências

1. Diretrizes básicas de proteção radiológica, CNEN-NE-3.01, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014.
2. Angra 3 PSAR, Seção 12.1.1 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Policy considerations, 2010.
3. Angra 3, PSAR, Seção 12.1.2 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Design considerations, 2010.
4. Angra 3, PSAR, Seção 12.1.3 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Operational considerations, 2010.
5. Angra 3, PSAR, Seção 11.2 – Liquid waste management systems, 2010.
6. Angra 3, PSAR, Seção 11.3 – Gaseous waste disposal system, 2010.
7. Descomissionamento de usinas nucleoeletricas, Resolução CNEN Nº 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012.
8. Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety Series no. 45, International Atomic Energy Agency, 2005.

9. Decommissioning planning for licensed activities, Regulatory Guide G-219 Canadian Nuclear Safety Commission, 2000.
10. Trojan nuclear plant decommissioning plan and license termination plan (PGE-1078), PGE-1061 Report Revision 9, 2001.

## **5 GERENCIAMENTO DAS ATIVIDADES DE DESCOMISSONAMENTO**

### **5.1 Suporte de Engenharia**

A Superintendência de Engenharia de Apoio (DO) formará um grupo com conhecimento em descomissionamento que deve ficar responsável pela etapa E1 (Planejamento e Preparação) e para fornecer o apoio de engenharia para a unidade quando sob descomissionamento. Suas atribuições incluem as atividades referentes à Etapa E1 [1]. Em relação às outras etapas suas atribuições incluem o desenvolvimento, avaliação de soluções técnicas de engenharia.

As responsabilidades da equipe de suporte de engenharia durante a etapa E1 incluem prover soluções de engenharia para planos de descontaminação e desmantelamento inicial e final, dimensionamento/acompanhamento dos custos, segurança e atividades gerais de planejamento. A equipe deve ter aproximadamente 10 pessoas com conhecimentos específicos sobre descomissionamento de usinas nucleares.

A Superintendência deverá contar com apoio de outras unidades da empresa para execução das atividades

### **5.2 Licenciamento**

A Superintendência de Licenciamento e Meio Ambiente (DG) é responsável pelas atividades ligadas ao licenciamento do descomissionamento da unidade tomando ações dentro da empresa para satisfazer os requisitos, normas e das autoridades regulatórias.

### **5.3 Responsabilidades da Diretoria de Operação e Comercialização (DO)**

A Diretoria de Operação e Comercialização tem a responsabilidade abrangente de realizar a operação e a manutenção da unidade sob descomissionamento. Esta responsabilidade é levada a cabo pela superintendência responsável pela operação da usina sob descomissionamento.

#### **5.4 Superintendência da Usina sob Descomissionamento**

Esta Superintendência é responsável pela operação da usina desativada, sua segurança, descomissionamento e manutenção dos sistemas durante as etapas E2 (Desativação da Planta), E3 (Operação segura da planta desativada), E4 (Desmantelamento e Descontaminação) e E5 (Recuperação do Terreno). As responsabilidades desta superintendência incluem a preparação de planos de trabalhos, execução e controle de alterações na unidade; elaboração dos itens de preparação das atividades de descomissionamento; definição das atividades de desativação da planta; definição das atividades e de controle para a operação segura da planta desativada; definição das atividades e ordenamento do desmantelamento da unidade; e definição das atividades e requisitos de recuperação do terreno e segurança.

As atribuições poderão ser realizadas por equipe própria ou por empresas contratadas, de acordo com as condições mais apropriadas do momento, uma vez que o descomissionamento pode durar até cerca de 60 anos conforme estratégia adotada. Para a etapa E2 de desativação da usina estima-se ser necessário contar com uma equipe ao redor de 100 pessoas. Para a etapa E3 de operação segura de uma usina desativada é necessário muito menos pessoal. Estima-se ser necessário em torno de 30 pessoas devido a utilização de concomitante de pessoal envolvido na operação das usinas ainda em operação. Para a etapa E4 de descontaminação e desmantelamento final a necessidade de pessoal volta a aumentar para em torno de 100 pessoas por usina em desmantelamento. Com as usinas sendo desativadas em sequência, conforme a estratégia escolhida, a quantidade de pessoal deve permanecer aproximadamente constante com o pessoal especializado migrando de uma usina para outra.

Para a etapa E5 de recuperação do terreno ainda não se tem uma estimativa da necessidade de pessoal. Contudo, as atividades desta etapa são normalmente realizadas por empresas contratadas.

#### **Referências**

1. Seção 12. Plano Preliminar de Descomissionamento da CNAAA, 2014.

## **6 PREVISÃO DO INVENTÁRIO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS RADIOATIVOS DA CNAAA**

Para realização do descomissionamento de uma usina nuclear necessita-se basicamente de informações sobre o inventário de materiais radioativos. São duas as fontes principais de rejeitos radioativos: aqueles acumulados durante a operação comercial da usina e aqueles que são produzidos durante as atividades de descomissionamento/desmantelamento como, desmontagem de equipamentos e demolições de estruturas contaminadas, etc. Nas seções 6.1 a 6.4 apresentam-se a situação radiológica atual das usinas da CNAAA e o inventário atual de rejeitos radioativos produzidos durante a operação das Usinas Angra 1 e Angra 2. Na Seção 6.6 apresenta-se a quantidade de elementos combustíveis armazenados nas piscinas de combustível irradiado de Angra 1 e Angra 2.

Na seção 6.7 apresentam-se os volumes, massas e atividade que, espera-se, serão acumulados durante as atividades de descomissionamento das Usinas Angra 1, 2 e 3. Estas estimativas foram realizadas utilizando dados e estudos de outras usinas PWR semelhantes: o reator Trojan (EUA) que passa por processo de descomissionamento e o sítio de Ringhals (Suécia), com 3 PWR e 1 BWR, que deve entrar em descomissionamento na próxima década.

Na seção 6.7 apresenta-se uma estimativa da quantidade de rejeitos de baixo e médio nível oriundos do desmantelamento das usinas do sítio da CNAAA que devem ser armazenados em um Repositório Nacional, de responsabilidade da União, ao final do descomissionamento.

### **6.1 Caracterização dos materiais e situação radiológica atual da CNAAA**

As usinas nucleares da CNAAA geram eletricidade operando de acordo com os critérios de segurança dos órgãos reguladores e da melhor prática da indústria nuclear. As áreas quentes das Usinas Angra 1 e Angra 2 são monitoradas e descontaminadas continuamente de acordo com os procedimentos de proteção radiológica. Não há nas duas usinas áreas contaminadas acima dos limites de proteção radiológica pertinentes. As estruturas externas dos prédios e o solo do sítio não apresentam contaminação por material radioativo. Também não há contaminação

de águas superficiais ou subterrâneas no sítio da CNAAA. As taxas de dose ocupacionais nas diversas áreas das duas usinas estão dentro dos limites de proteção radiológica [1].

Todo material ou fluido contaminado durante a operação das usinas é submetido à descontaminação ou a tratamentos adequados. Os rejeitos radioativos remanescentes são embalados adequadamente e enviados aos depósitos de rejeitos do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) e do Depósito Inicial de Rejeitos (KPE) de Angra 2.

## **6.2 Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 1**

Os rejeitos radioativos acumulados durante a operação comercial da Usina Angra 1 são depositados nos depósitos iniciais do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR). Os rejeitos são depositados em tambores e caixas metálicas de diferentes dimensões. Os rejeitos estocados incluem concentrado dos evaporadores, resinas do circuito primário, resinas do circuito secundário, rejeitos compactados e não-compactados, filtros, etc. A Tabela 6.1 apresenta o significado das várias siglas utilizadas para identificar os diversos tipos de rejeitos. A Tabela 6.2 apresenta as embalagens armazenadas no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) que armazenam, até a presente data, basicamente os rejeitos gerados na Usina Angra 1.

No descomissionamento de usinas nucleares, os rejeitos líquidos são oriundos principalmente dos produtos de corrosão existentes no refrigerante do sistema de refrigeração do reator. Estes rejeitos atingem a condição de saturação durante a operação do reator e, após seu desligamento, suas atividades decaem de acordo com a meia vida dos isótopos. Estes rejeitos são tratados por meio de evaporadores reduzindo-os a rejeitos sólidos. A Figura 6.1 apresenta a atividade específica dos principais rejeitos em função do tempo de operação do reator.

## **6.3 Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 2**

Os rejeitos radioativos acumulados durante a operação comercial da Usina Angra 2 são depositados no depósito existente dentro da própria usina, o Depósito Inicial de Rejeitos (KPE). Os rejeitos são depositados no KPE em tambores e as

caixas metálicas de diferentes dimensões nos Depósitos Iniciais. Os rejeitos estocados incluem concentrado dos evaporadores, resinas do circuito primário, resinas do circuito secundário, rejeitos compactados e não-compactados, filtros, etc. A Tabela 6.3 apresenta as embalagens armazenadas no Depósito Inicial de Rejeitos (KPE), referentes à Usina Angra 2.

A classificação dos rejeitos e a taxa de exposição à radiação gerada pelos rejeitos sólidos armazenados no KPE são apresentadas na Tabela 6.4. Cerca de 80 % dos embalados são rejeitos de baixo nível com taxas de exposição menores que 2 mSv/h, e cerca de 17, 5 % dos embalados são de rejeitos de alto nível com taxas de exposição maiores que 20 mSv/h. O restante são rejeitos de médio nível.

A Tabela 6.5 apresenta o volume de rejeitos de médio e alto nível de radiação esperado até o final da operação comercial das Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3. O volume indicado inclui o volume de rejeito e os embalados que são utilizados para a gestão de rejeitos da CNAAA. O volume esperado desses rejeitos é 5800 m<sup>3</sup>.

#### **6.4 Inventário e caracterização dos materiais e situação radiológica da Usina Angra 3**

A Usina de Angra 3 está em construção e não apresenta inventário de rejeitos radioativos.

#### **6.5 Inventário de elementos combustíveis irradiados nos vários depósitos**

A capacidade de armazenamento de combustíveis irradiados das piscinas das usinas da CNAAA é limitada e, de acordo com a concepção do projeto dessas usinas, os elementos combustíveis estocados há mais tempo deveriam ser removidos para unidades de armazenamento complementares ou serem reprocessados e abrir espaço para combustíveis irradiados mais recentemente. A Tabela 6.6 apresenta a capacidade de depósito de elementos combustíveis nas piscinas de estocagem de combustível das Usinas Angra 1, 2 e 3 e a quantidade de combustível armazenada em outubro de 2014. A Tabela 6.7 apresenta o ano esperado de esgotamento da capacidade de estocagem das piscinas de armazenamento de combustível irradiado.

Considerando o iminente esgotamento da capacidade de armazenamento de combustível irradiado nas usinas e não haver perspectiva de disponibilização de



depósitos definitivos para a estocagem dos elementos combustíveis das usinas, a Eletronuclear planeja construir um depósito complementar para armazenamento de combustível irradiado denominado Unidade de Armazenamento Complementar de Combustível Irrradiado da CNAAA (UFC). Este depósito utilizará racks semelhantes aos das piscinas de combustível irradiado das Usinas Angra 1 e Angra 2 e poderá armazenar combustíveis das 3 usinas da CNAAA. Planeja-se construir o UFC em duas etapas, sendo que a primeira com capacidade de armazenar 2400 elementos combustíveis irradiados.

## **6.6 Inventário e caracterização dos materiais gerados durante as atividades de descomissionamento**

As estimativas de volumes e atividades de rejeitos radioativos foram realizadas utilizando informações extraídas do plano de descomissionamento do reator nuclear Trojan, que passa pelo processo de descomissionamento [3,4], e do estudo de custo de descomissionamento do sítio de Ringhals [5]. A seguir são apresentados os inventários apresentados por estes dois reatores e uma estimativa do volume de rejeitos radioativos que devem ser gerados no descomissionamento das usinas da CNAAA.

### **6.6.1 Inventário e caracterização dos materiais gerados durante o descomissionamento do reator Trojan**

O reator Trojan, localizado no estado de Oregon, EUA, era uma usina nuclear do tipo água pressurizada (PWR) semelhante às usinas brasileiras, com capacidade instalada de 1130 MWe. Este reator entrou em operação em maio de 1976 e foi desligado em novembro de 1992 tendo operado 16 anos. O processo de desmantelamento iniciou-se em 1993, com projeção de deixar a área para uso irrestrito em 2019 [2].

A Tabela 6.8 apresenta o volume e a atividade dos rejeitos radioativos gerados nesse reator PWR. O detalhamento de cada um desses itens se encontra nas Tabelas 6.9, 6.10 e 6.11. Notam-se, na coluna de atividade, que os dois primeiros itens são os mais importantes quanto a esta variável.

A Tabela 6.9 apresenta os rejeitos radioativos dos grandes equipamentos do circuito primário. A radioatividade dos internos do vaso do reator é maior porque o

reator nuclear, fonte principal de radiação, opera dentro deste equipamento. As atividades do gerador de vapor e pressurizador não foram encontradas. Contudo, é de conhecimento que sua contribuição para a atividade total é pequena comparada com os internos do vaso do reator e com o próprio vaso, pois se encontrarem distantes da fonte de radiação.

A Tabela 6.10 apresenta a projeção de volume e atividade dos rejeitos radioativos das estruturas de concreto e superfícies contaminadas de equipamentos. A contaminação depositada nas paredes de concreto apresentam uma penetração em média inferior a 1 cm. A descontaminação é realizada removendo a camada contaminada, porém alguns prédios, como o prédio da piscina do combustível e o prédio auxiliar, são mais complexos de determinar a contaminação impregnada na parede. Isto ocorre porque os sistemas radioativos, contidos no interior, mascaram a contaminação superficial. Portanto, por critérios de segurança, é considerada a remoção de 1 cm de espessura de todas as paredes de concreto.

A Tabela 6.11 apresenta a estimativa de volumes e atividade de outros rejeitos radioativos. Somente os itens, cuja contribuição volumétrica é superior a 1,4 % do volume total de rejeitos radioativos de baixo e médio nível, são apresentados. No item “outros” estão contempladas as contribuições dos rejeitos de processos envolvendo materiais líquidos e gasosos, óleos, instrumentos não nucleares, equipamentos de ventilação e condicionamento de ar, pequenas bombas, motores, entre outros. Para se fazer uma análise conservadora, onde a contribuição de atividade era inferior a 37 GBq, foi considerado este valor para o cálculo total.

Segundo o plano de descomissionamento do reator Trojan [(PGE-1061, 2001). Os grandes equipamentos do circuito primário representam cerca de 22,4% do total do volume de rejeitos e contribuem com 99,994 % da atividade dos rejeitos de baixo e médio nível. O restante, 71 % do volume são rejeitos de nível muito baixo.

### **6.6.2 Inventário e caracterização dos materiais gerados durante o descomissionamento dos reatores Ringhals**

O sítio de Ringhals possui 4 reatores nucleares, sendo 1 reator do tipo BWR e 3 reatores do tipo PWR. A potência dos reatores PWR são 865 MW, 1063 MW e 940 MW. O desligamento das usinas está previsto para ocorrer entre 2026 e 2033. A

Tabela 6.12 apresenta o início da operação e o ano esperado de desligamento das várias unidades do sítio Ringhals.

De acordo com o plano de descomissionamento do sítio Ringhals, pretende-se ao final do processo deixar o sítio em estado *brownfield*. O plano de descomissionamento do sítio de Ringhals inclui a retirada dos geradores de vapor de forma intacta. Uma vez retirados, serão transportados de navio até o depósito final permanente. As bombas de recirculação do reator e os motores serão retirados intactos, segmentados e embalados para transporte. Os trocadores de calor, tanques, bombas e grandes válvulas, etc, também poderão ser removidos, de maneira intacta, e enviados para segmentação e embalagem. Os rejeitos do descomissionamento serão classificados na própria usina e transportados para uma estação de tratamento e, posteriormente, depositados em um depósito final conforme o nível de atividade.

Todos os materiais serão reciclados quando possível ou utilizados para a produção de energia. Todos os equipamentos são considerados obsoletos e poderão ser usados somente como sucata. Embora possa haver razões e técnicas que tornem economicamente viáveis a reconstituição do equipamento, o plano de descomissionamento assume que não é necessária esta economia.

As quantidades de rejeitos radioativos estimadas para o descomissionamento das usinas de Ringhals 2, 3 e 4 são baseadas em uma combinação de informações específicas das próprias usinas e de plantas semelhantes. As definições sobre o descomissionamento dos grandes componentes do sistema primário (vaso de pressão, gerador de vapor, pressurizador, trocador de calor, bombas e motores) são baseadas em dados das próprias usinas do sítio. Estes equipamentos perfazem 60 % da massa total que deve ser descomissionada. As definições de outros componentes são baseadas em documento de uma planta semelhante.

A Tabela 6.13 apresenta as dimensões dos containers utilizados para o armazenamento dos rejeitos radioativos oriundos do descomissionamento e a Tabela 6.14 apresenta o inventário desses containers que serão gerados ao descomissionar todas as usinas de Ringhals. A Tabela 6.15 apresenta o inventário de rejeitos metálicos oriundos do descomissionamento e a Tabela 6.16, a caracterização desses rejeitos (aço carbono, aço inoxidável, cobre, titânio, etc). A Tabela 6.17 apresenta um

inventário detalhado dos vários tipos de rejeitos esperados para o descomissionamento dos rejeitos das usinas PWR de Ringhals.

### **6.7 Resumo Geral dos rejeitos esperados no Descomissionamento das Usinas Angra 1,2 e 3 da CNAAA**

A Tabela 6.18 apresenta um resumo da quantidade esperada de rejeitos radioativos para o descomissionamento das usinas da CNAAA. Os rejeitos acumulados durante a operação comercial das 3 usinas nucleares foram obtidos de dados operacionais reais. Os rejeitos gerados durante o descomissionamento foram obtidos a partir dos rejeitos acumulados durante a operação a partir do reator Trojan de potência 1130 MWe. Este nível de potência fornece um valor de custo de descomissionamento semelhante ao esperado para as Usinas Angra 2 e 3 e superior ao de Angra 1 [6]. Assim, os volumes apresentados podem ser considerados uma primeira estimativa para cada um dos reatores do sítio de Angra.

Alguns dos materiais provenientes do vaso do reator, assim como o próprio vaso, podem ser classificados como rejeitos de alto ou médio nível. No caso de classificação como de alto nível, estes rejeitos poderiam ser armazenados em algum compartimento projetado especificamente. Nos depósitos de médio e baixo nível existentes, podem ser incluídos os rejeitos oriundos de outros equipamentos, sistemas e estruturas, após a remoção dos rejeitos operacionais para o Depósito Final.

Desconsiderando especificidades de cada uma das usinas, em linhas gerais pode-se dizer que cada usina do sítio de Angra, em seu processo de desmantelamento, irá requerer em torno de 10.000 m<sup>3</sup> de espaço para armazenamento de rejeitos. Esta estimativa está de acordo com estimativas feitas por estudos CDTN sobre o repositório de nível baixo e médio em estudo pela CNEN [3].

Excetuando o combustível irradiado que totaliza 1450 elementos combustíveis em 2014, o volume total de rejeitos após o descomissionamento da CNAAA é de 34952 m<sup>3</sup>. Desse total, apenas 212 m<sup>3</sup> são rejeitos de alto nível que correspondem a 0,6 % do volume total e respondem por 99 % da atividade total dos rejeitos. A atividade total gerada é de 4,66x10<sup>8</sup> GBq.

Parte do material contaminado pode ser reciclada. A massa esperada de metal para armazenamento é de 50 toneladas por usina. 90 % deste material é aço

inoxidável que pode ser reciclado de alguma forma como, por exemplo, para material estrutural ou trilhos de estradas de ferro, etc [5].

### **Referências**

1. Relatório de taxas de dose da proteção radiológica, 2014.
2. PGE-1061, Trojan Nuclear Plant Decommissioning Plan and License Termination Plan (PGE-1078), Revision 9, 2001.
3. Estratégia de descomissionamento das Usinas Angra 1, 2 e 3. Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-003-01, Universidade Federal do ABC, 2014.
4. Ringhals Site Study 2013 – An assessment of the decommissioning cost of the Ringhals site, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Relatório SKB R-13-05, 2013.
5. Proteção radiológica para o descomissionamento das Usinas Angra 1, 2 e 3. Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-008-01, Universidade Federal do ABC, 2014.
6. US NRC, Changes in Decommissioning Waste Disposal Costs at Low-Level Waste Burial Facilities, NUREG 1307, Rev. 14, Novembro, 2010.

Tabela 6.1– Significado das siglas utilizadas para identificar depósitos e tipos de rejeitos depositados no CGR e KPE.

TAMBOR - Embalagem de 0,208 m <sup>3</sup>	CE - Concentrado do Evaporador
LINER - Embalagem de 1m <sup>3</sup>	RP - Resina do Primário
CAIXA METALICA - Embalagem de 1,248 m <sup>3</sup>	RS - Resina do secundário
KPE - Depósito inicial de rejeitos	RC - Rejeito Compactado
G1DP - Depósito 1 do CGR	RNC - Rejeito não compactado
G2DP - Depósito 2 do CGR	F - Filtro
G3DP - Depósito 3 do CGR	GVDP - DIGV
LBA - Lado de baixa atividade	103 - Compartimento DGV 103
LMA - Lado de media atividade	

Tabela 6.2– Quantidade de embalagens de rejeitos radioativos sólidos armazenados no CGR. Os valores se referem ao número de embalagens armazenadas em cada ano. Significado das siglas encontra-se na Tabela 6.1.

Rejeitos sólidos																
Número de embalagens armazenadas no CGR																
Ano	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
F	14	14	8	10	22	11	12	8	13	3	16	18	16	8	37	36
CE	41	11	0	23	52	129	155	116	179	68	485	315	279	129	194	197
RNC	0	6	0	25	63	111	117	30	24	9	14	69	33	12	31	82
RP	0	0	73	60	2	0	109	1	0	28	0	121	0	0	12	128
RS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77
RC	0	6	3	9	19	11	29	19	12	3	8	89	19	5	66	37
INATIVOS	4	0	3	18	27	20	11	21	21	12	0	8	8	9	10	8
<b>total</b>	<b>59</b>	<b>37</b>	<b>87</b>	<b>145</b>	<b>185</b>	<b>282</b>	<b>433</b>	<b>195</b>	<b>249</b>	<b>123</b>	<b>523</b>	<b>620</b>	<b>355</b>	<b>163</b>	<b>350</b>	<b>565</b>

Ano	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
F	33	5	15	9	22	16	4	38	16	33	22	14	35	1	7	5
CE	108	72	19	21	62	52	28	36	37	27	34	30	23	33	14	24
RNC	13	7	16	11	15	11	19	15	13	16	14	142	12	12	10	31
RP	1	24	17	16	20	33	0	15	20	14	0	12	11	11	2	20
RS	22	48	39	19	9	20	0	3	36	57	84	82	50	7	14	66
RC	7	2	6	8	8	2	11	9	23	79	58	68	59	20	17	21
B-25									128	0	0	0	0	0	0	0
INATIVOS	8	5	4	2	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
<b>total</b>	<b>192</b>	<b>163</b>	<b>116</b>	<b>86</b>	<b>137</b>	<b>135</b>	<b>63</b>	<b>117</b>	<b>273</b>	<b>226</b>	<b>213</b>	<b>348</b>	<b>190</b>	<b>84</b>	<b>64</b>	<b>167</b>

Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	TOTAL	%	M3
F														521	7,50	107,3
CE														2993	43,10	994,5
RNC														983	14,15	665,0
RP														750	10,80	307,1
RS														633	9,11	118,7
RC														733	10,55	148,1
B-25														128	1,84	320,0
INATIVOS														204	2,94	47,2
<b>Total</b>														<b>6945</b>	<b>99,99</b>	<b>2707,9</b>

Tabela 6.3– Quantidade de rejeitos sólidos armazenados no KPE. Os valores se referem ao número de embalados armazenados em cada ano. Significado das siglas encontra-se na Tabela 6.1.

Rejeitos sólidos																	
Número de embalagens armazenadas no KPE																	
Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL	%	Vol. (m³)
F	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	4	0	10	2,17	2,00
CE	0	0	16	30	26	0	0	68	0	37	0	0	0	0	177	38,91	35,80
RP	0	0	0	0	0	0	0	0	36	36	0	0	0	0	72	15,65	14,40
RS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,00
RC	0	0	1	1	2	2	30	22	23	26	17	31	26	13	194	42,17	38,80
TOTAL	0	0	17	31	28	3	30	90	64	99	17	31	30	18	458	100,00	97,24

Tabela 6.4– Classificação e taxa de exposição gerada pelos rejeitos sólidos armazenados no KPE.

Classificação do rejeito	Taxa de exposição (mSv/h)	Número de embalados	Porcentagem por classe
Baixo nível	< 2	365	79,35
Médio nível	$2 \leq tx \text{ exp} \leq 20$	15	3,26
Alto nível	> 20	85	17,39



Tabela 6.5– Volume total de rejeitos de médio e baixo nível esperado no final da operação comercial das usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3.

<b>Usina</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Angra 1	4502
Angra 2	560
Angra 3	738
Total	5800

Tabela 6.6– Capacidade das piscinas de elementos combustíveis (EC) das Usinas de Angra 1, Angra 2 e Angra 3.

<b>Usina</b>	<b>Capacidade de armazenamento (quantidade de EC)</b>	<b>Elementos combustíveis no núcleo do reator (quantidade de EC)</b>	<b>Combustíveis armazenados nas piscinas* (quantidade de EC)</b>
Angra 1	1252	121	850
Angra 2	1084	193	600
Angra 3	1084	193	-

\* quantidade em outubro de 2014.

Tabela 6.7– Previsão do esgotamento da capacidade de armazenamento de elementos combustíveis das piscinas das Usinas Angra 1, 2 e 3

<b>Usina</b>	<b>Previsão de esgotamento da capacidade de armazenamento (ano)</b>
Angra 1	2019
Angra 2	2018
Angra 3	2033*

\* Dependente do início da operação de Angra 3.

Tabela 6.8– Volume e atividade induzida totais no reator PWR Trojan.

<b>Classificação</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Atividade (GBq)</b>	<b>Atividade (%)</b>
Grandes equipamentos do circuito primário	2296,7	23,6	1,55x10 <sup>8</sup>	99,994
Estruturas de concreto e superfícies contaminadas de equipamentos	1697,5	17,4	< 37	0,0007
Outros	5723,1	59	8530	0,0055
<b>Total</b>	<b>9717,3</b>	<b>100,0</b>	<b>1,55x10<sup>8</sup></b>	<b>100</b>

Tabela 6.9– Rejeitos radioativos dos grandes equipamentos do circuito primário do reator PWR Trojan.

<b>Sistemas</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Atividade (GBq)</b>
Gerador de Vapor e Pressurizador (grandes componentes removidos)	1636,7	16,8	-
Internos do vaso do reator	70,8	0,7	1,54x10 <sup>8</sup>
Vaso do reator e suas estruturas externas	165,4	1,7	1,15x10 <sup>6</sup>
Tubulações	166,9	1,7	8180
Sistema do gerador de vapor	100,9	1,0	37
Bombas e motores de refrigeração do reator	86,2	0,9	4960
Mecanismo de instrumentação e controle das barras de controle	48,9	0,5	3070
Tanque de alívio do pressurizador	17,7	0,2	37
Sistema do vaso do reator	3,3	0,0	259
<b>Total</b>	<b>2296,7</b>	<b>23,6</b>	<b>1,55x10<sup>8</sup></b>

Tabela 6.10– Rejeitos radioativos das estruturas de concreto e superfícies contaminadas de equipamentos do reator PWR Trojan\*.

<b>Edifício</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Atividade** (Gbq)</b>
Contenção	1441,4	14,8	8,88E-01
Prédio auxiliar	75,0	1,4	7,40E-02
Prédio do combustível	133,4	0,8	3,70E-02
Áreas do circuito primário e penetrações elétricas	17,8	0,3	3,70E-02
Turbina	29,8	0,2	7,40E-02
Total	1697,5	17,5	1,15E+00

\* Inclui contaminação removível e fixa, mas não ativada.

\*\* Projeção da atividade

Tabela 6.11– Rejeitos radioativos de outros sistemas do reator PWR Trojan.

<b>Sistema</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Atividade (GBq)</b>
Elétrico (cabos, bandejas e conduites)	1703,0	17,5	< 37
Contenção e sistema de ventilação e ar condicionado	534,3	5,5	< 37
Piscina de combustível irradiado e raques	490,0	5,0	5550
Sistema de controle químico e volumétrico	310,6	3,2	925
Centro de controle do motor de 480-V AC	238,6	2,5	< 37
Sistema de remoção de calor residual	216,6	2,2	< 37
Sistema de segurança de injeção	202,4	2,1	< 37
Sistema de ar condicionado e ventilação (fora da contenção)	187,9	1,9	< 37
Água de resfriamento de componentes	173,2	1,8	< 37
Rejeitos radioativos sólidos	153,6	1,6	518
Centro de carga auxiliar 480-V AC	143,8	1,5	< 37
Outros	1200,9	12,4	1243,2
<b>Total</b>	<b>5723,1</b>	<b>58,9</b>	<b>8532,2</b>

Tabela 6.12– Resumo das informações sobre as usinas do sítio de Ringhals.

<b>Usina</b>	<b>Tipo de reator</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Potência elétrica</b>	<b>Início de operação</b>	<b>Ano esperado de desligamento</b>
<b>Ringhals 1</b>	BWR	ASEA-Atom	878 MW	Jan 1976	2026
<b>Ringhals 2</b>	PWR	Westinghouse Monitor ABC	865 MW	Mai 1975	2025
<b>Ringhals 3</b>	PWR	Westinghouse Monitor ABC	1063 MW	Set 1981	2031
<b>Ringhals 4</b>	PWR	Westinghouse Monitor ABC	940 MW	Nov 1983	2033

Tabela 6.13 – Dimensões dos containers e embalagens

Tipo	Dimensão (m)	Densidade do empacotamento (kg/m <sup>3</sup> )	Volume do container (m <sup>3</sup> )
ISO container	6,06x1,3x2,5	1,100	19,7
ISO container (<500 Bq/kg)	6,06x1,3x2,5	1,100	19,7
Caixa de aço	1,2x1,2x1,2	1,100	1,7
Grande caixa de aço	2,4x1,2x2,4	1,100	6,9
Tanque BFA	3,3x2,3x1,3	6,700 (kg/unidade)	10

Tabela 6.14– Inventário de containers utilizado no sítio de Ringhals

Tipo de rejeito	Massa (Tonelada)	ISO Containers (<500 Bq/kg)	ISO Containers (número)	Caixas de aço (número)	Grandes caixas de aço (número)	Tanques BFA (número)
Sistemas	13,448	315	318	154	286	-
Prédios e estruturas	3,558	-	59	-	352	-
Vaso dos reatores e Internos	2,421	-	5	-	28	9
Rejeitos secundário	946	-	94	41	-	-
Total	20,373	315	476	195	665	9

Tabela 6.15– Inventário de rejeitos metálicos.

<b>Usina</b>	<b>Massa (Tonelada)</b>
Ringhals1	31,1
Ringhals2	46,4
Ringhals3	47,6
Ringhals 4 + unidade 0	59,4
Total	184,4

Tabela 6.16– Distribuição esperada de rejeitos metálicos.

<b>Metal</b>	<b>Massa (Tonelada)</b>
Aço carbono	169,5
Aço inox	7,1
Cobre	5,9
Titânio	1,6
Outros	212
Total	184,4



Tabela 6.17– Sumário de rejeitos ativos e inativos das usinas Ringhals 2, 3 e 4. A unidade de cada entrada da tabela está discriminada na coluna “Item”.

Item	Ringhals 2		Ringhals 3		Ringhals 4	
	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo
Remoção de instrumentos e amostragem tubulação, (m)	17,340	17,340	17,340	17,340	17,340	17,340
A remoção de tubos de 6,35 a 50,8 mm de diâmetro, (m)	11472	31985	4041	11674	4041	14601
Remoção de tubos > 50,8 a 101,6 mm de diâmetro, (m)	4041	14954	4041	11674	4041	14601
Remoção de tubos > 101,6 a 203,2 mm de diâmetro, (m)	721	8446	721	7589	721	8814
Remoção de tubos > 355,6 a 508 mm de diâmetro, (m)	714	5123	714	4981	714	5254
Remoção de tubos > 508 a 914,4 mm de diâmetro, (m)	68	3647	68	3614	68	3662
Remoção de tubos > 914,4 mm de diâmetro, (m)	-	3593	-	3593	-	3593
Remoção de válvulas > 6,35 a 50,8 mm de diâmetro, (cada)	-	-	-	-	-	-
Remoção de válvulas > 50,8 a 101,6 mm de diâmetro, (cada)	245	817	245	679	245	857
Remoção de válvulas > 101,6 a 203,2 mm de diâmetro, (cada)	46	540	46	483	46	562
Remoção de válvulas > 203,2 a 355,6 mm de diâmetro, (cada)	29	207	29	201	29	212
Remoção de válvulas > 355,6 a 508 mm de diâmetro, (cada)	2	116	2	114	2	116
Remoção de válvulas > 508 a 914,4 mm de diâmetro, (cada)	-	84	-	84	-	84
Remoção de válvulas > 914,4 mm de diâmetro, (cada)	-	16	-	-	-	21
Remoção de acessórios para tubos > 50,8 a 101,6 mm de diâmetro, (cada)	42	86	42	80	42	88
Remoção de acessórios para tubos > 101,6 a 203,2 mm de diâmetro, (cada)	-	63	-	56	-	66

Tabela 6.17 – Continuação 1.

Item	Ringhals 2		Ringhals 3		Ringhals 4	
	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo
Remoção de acessórios para tubos > 203,2 a 355,6 mm de diâmetro, (cada)	-	27	-	27	-	27
Remoção de acessórios para tubos > 355,6 a 508 mm de diâmetro, (cada)	-	7	-	7	-	7
Remoção de acessórios para tubos > 508 a 914,4 mm de diâmetro, (cada)	-	9	-	9	-	9
Remoção de acessórios para tubos > 914,4 mm de diâmetro, (cada)	-	7	-	3	-	14
Suportes de tubos para tubulação de pequeno calibre, (cada)	5000	17275	5000	14454	5000	18077
Suportes de tubos para tubulação de grande calibre, (cada)	321	3812	321	3566	321	3932
Remoção de bombas, <135,9 kg, (cada)	101	140	101	116	101	140
Remoção de bombas, 135,9 a 452,1 kg, (cada)	49	91	49	78	49	91
Remoção de bombas, 452,1 a 4531,1 kg, (cada)	12	39	12	33	12	39
Remoção das bombas, > 4531,1 kg, (cada)	1	16	1	12	1	16
Remoção dos motores das bombas, <135,9 kg, (cada)	49	91	49	78	49	91
Remoção dos motores das bombas, 135,9 a 452,1 kg, (cada)	12	34	12	29	12	34
Remoção dos motores das bombas, 452,1 a 4531,1 kg, (cada)	1	14	1	11	1	14
Remoção dos motores das bombas, > 4531,1 kg, (cada)	-	2	-	2	-	2
Bombas de turbinas <4.531 kg, (cada)	-	2	-	2	-	2
Remoção do trocador de calor < 1359,3 kg (cada)	28	46	28	41	28	46

Tabela 6.17 – Continuação 2.

Item	Ringhals 2		Ringhals 3		Ringhals 4	
	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo
Remoção do trocador de calor > 1359,3 kg (cada)	6	24	6	24	6	24
Alimentação de água de alimentação / desaerador (cada)	-	12	-	12	-	12
Separador de umidade / Reaquecedor (cada)	-	2	-	2	-	2
Suporte sísmico tubulação/estrutura, (kg)	-	-	-	-	-	-
Tanques, < 1363,8 litros, filtros e trocadores de íons, (cada)	49	273	49	224	49	273
Remoção de tanques limpos, 1363,8 a 13638 litros (cada)	-	43	-	28	-	43
Tanques > 13638 litros, 0,09 m <sup>2</sup>	3542	6591	3452	5035	3542	6591
Remoção de equipamento elétrico < 135,9 kg (cada)	464	2425	-	1450	464	2425
Remoção de equipamento elétrico 135,9 a 435,1 kg (cada)	54	270	-	162	54	270
Remoção de equipamento elétrico 435,1 a 4351 kg (cada)	4	22	-	13	4	22
Remoção de equipamento elétrico > 4351 kg (cada)	-	-	-	-	-	-
Remoção de transformadores elétricos < 27,33 Mg (cada)	-	-	-	-	-	-
Remoção de transformadores elétricos > 27,33 Mg (cada)	-	6	-	3	-	6
Geradores a diesel para espera, < 100 kW (cada)	-	5	-	4	-	5

Tabela 6.17 – Continuação 3.

Item	Ringhals 2		Ringhals 3		Ringhals 4	
	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo	Ativo	Inativo
Geradores a diesel para espera, < 1 MW (cada)	-	4	-	4	-	4
Bandeja de cabo elétrico, (m)	5101	15783	-	11013	2684	18447
Conduite Elétrico, (m)	27711	143740	-	113685	27711	171238
Remoção de equipamento mecânico, < 135,9 kg (cada)	51	43	51	34	51	43
Remoção de equipamento mecânico, 135,9 a 453,1 kg (cada)	26	11	26	9	26	11
Remoção de equipamento mecânico, 453,1 a 4531 kg (cada)	16	31	16	28	16	31
Remoção de equipamento mecânico, > 4531 kg (cada)	10	21	10	14	10	21
Remoção de equipamento HVAC, < 135,9 kg (cada)	559	289	559	100	559	289
Remoção de equipamento HVAC, 135,9 a 453,1 kg (cada)	87	146	103	65	103	130
Remoção de equipamento HVAC, 453,1 a 4531 kg (cada)	55	-	55	-	55	-
HVAC dutos kg	115510	97894	115510	95114	115510	97894

Tabela 6.18– Resumo dos rejeitos radioativos provenientes do descomissionamento da CNAAA.

Rejeitos	Angra 1		Angra 2		Angra 3		CNAAA	
	Volume (m³)	Atividade (GBq)	Volume (m³)	Atividade (GBq)	Volume (m³)	Atividade (GBq)	Volume (m³)	Atividade (GBq)
Rejeito de alto nível - internos do vaso do reator	70,8	1,54x10 <sup>5</sup>	70,8	1,54x10 <sup>5</sup>	70,8	1,54x10 <sup>5</sup>	212,4	4,62x10 <sup>5</sup>
Rejeitos de baixo e médio nível oriundos da operação comercial	4502	Nd	560	Nd	738	Nd	5800	Nd
Rejeitos de médio nível - vaso do reator e suas estruturas externas	165,4	1,15x10 <sup>5</sup>	165,4	1,15x10 <sup>5</sup>	165,4	1,15x10 <sup>5</sup>	496,2	3,45x10 <sup>5</sup>
Rejeitos de baixo nível - outros equipamentos do circuito primário (tubulações, GV, pressurizador, etc)	2060,5	1,5x10 <sup>5</sup>	2060,5	1,5x10 <sup>5</sup>	2060,5	1,5x10 <sup>5</sup>	6181,5	4,5x10 <sup>5</sup>
Rejeitos de baixo nível - estruturas de concreto e superfícies contaminadas de equipamentos	1697,5	37	1697,5	37	1697,5	37	5092,5	111
Rejeitos de baixo nível - outros materiais do reator	5723,1	8530	5723,1	8530	5723,1	8530	17169,3	2,6x10 <sup>4</sup>
<b>Total</b>	<b>14219,3</b>	<b>1,55x10<sup>5</sup></b>	<b>10277,3</b>	<b>1,55x10<sup>5</sup></b>	<b>10455,3</b>	<b>1,55x10<sup>5</sup></b>	<b>34951,9</b>	<b>4,66x10<sup>5</sup></b>
Combustível irradiado em 2014 e classificado como rejeito de alto nível	850*	Nd	600*	Nd	-	-	1450	Nd

\* Quantidade de elementos combustíveis; Nd: não disponível

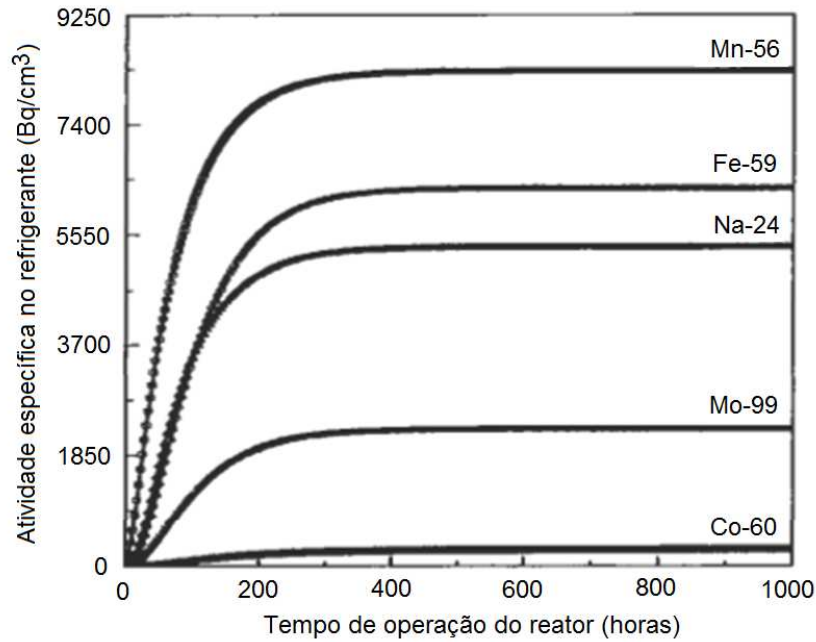


Figura 6.1– Atividade específica no refrigerante de vários produtos de corrosão em função do tempo de operação do reator.

## **7 ESTIMATIVA DE CUSTO DO DESCOMISSONAMENTO DA CNAAA**

A melhor prática para a estimativa do custo de descomissionamento de centrais nucleares é realizar uma avaliação segundo uma estrutura abrangente levando em conta todas as instalações, estruturas, sistemas e equipamentos da CNAAA sob descomissionamento [1]. O procedimento deve identificar as disponibilidades de depósitos adequados para armazenar os rejeitos gerados pelas usinas e pelo processo de descomissionamento, identificar todas as variáveis externas que condicionam essas ações como mão de obra, transportes, embalagens e, a partir destas informações, identificar todas as atividades necessárias para realizar o descomissionamento. Este processo é bem descrito no documento ISDC (International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installations) [1].

A Eletronuclear contratou a Universidade Federal do ABC e uma consultoria internacional e propõe realizar em 2015 uma estimativa mais detalhada de custo de descomissionamento da CNAAA segundo as recomendações do ISDC [1]. Para este PPD apresenta-se nesta seção uma estimativa do custo mínimo de descomissionamento das Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 [2,3]. Na seção 7.1 apresenta-se a metodologia utilizada e nas seções 7.2 a 7.5 apresentam-se as estimativas de custo realizadas para as Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 e realizam-se comparações com custos reais de usinas já descomissionadas ou em processo de descomissionamento. Nas seções 7.6 e 7.7 apresentam-se os fatores que afetam a estimativa de custo para as usinas da CNAAA e a estrutura que será utilizada em 2015 para realizar a estimativa detalhada do custo de descomissionamento da CNAAA.

### **7.1 Metodologia de avaliação do custo mínimo de descomissionamento**

Até o momento, nenhum dos reatores brasileiros foi descomissionado, contudo é possível estimar os custos a partir da experiência internacional [1-5]. Resumidamente, com base no 10CFR 50.75 [11] e NUREG 1307 [5], a estimativa de uma garantia financeira mínima para o descomissionamento de PWRs relaciona-se com a potência térmica do reator,  $P$ , da seguinte maneira (potência térmica em MWt e valores em dólares de Jan 1986):

- para capacidade maiores ou iguais a 3400 MWt, o custo mínimo é US\$ 105 milhões;
- para capacidades entre 1200 MWt e 3400 MWt, o custo mínimo é US\$  $(75+0,0088P)$  milhões;
- para capacidades menores que 1200 MWt, adotar como potência térmica da usina 1200 MWt. O custo mínimo será US\$ 85,6 milhões.

Esta metodologia permite estimar uma garantia financeira mínima, MFA, (do inglês, Minimum Financial Assurance) para realizar o descomissionamento de um reator PWR em valores de dólar para 1986. O MFA pode ser considerado pela operadora responsável pela usina como o capital suficiente para custear o processo de desmantelamento da instalação. Para atualização do MFA ao longo do tempo, levando em conta a inflação e outros fatores, utiliza-se a fórmula indicada no relatório NUREG 1307 [5],

$$MFA(y) = MFA(1986)(AL_x(y) + BE_x(y) + CB_x(y)).$$

onde  $y$  representa o ano de avaliação do custo mínimo e  $L_x$ ,  $E_x$  e  $B_x$  representam correções devido à inflação e a outros fatores associados ao trabalho, a energia e à disposição de rejeitos de baixo nível de radiação.

Para a correção monetária do valor do MFA, toma-se como base dólares de Jan/1986. Os fatores  $L_x$  e  $E_x$  são dados pelo US Department of Labor, Bureau of Labor Statistics relacionados à região geográfica dos EUA [4]. Com respeito ao fator  $B_x$ , seu valor irá depender do local de disposição do LLW. Valores de  $B_x$ , para os EUA, estão disponíveis na Ref. 4. A Tabela 7.1 ilustra a evolução temporal do fator de inflação  $B_x$  associado ao depósito de rejeitos do tipo LLW. A tabela apresenta valores para três depósitos disponíveis para as usinas: Washington site e South Carolina disponíveis para usinas que celebraram previamente contratos com esses depósitos para a deposição de seus rejeitos e um terceiro depósito, genérico, que serve como referência para usinas que não possuam um contrato prévio para fazerem suas estimativas de custo para o processo. Atualmente, para cada depósito há duas possibilidades de armazenamento: *Compact-Affiliated Facility Only* e *Combination Of Compact-Affiliated and Non-Compact Facility* [5].



Na primeira possibilidade, a usina tem espaço para armazenar os rejeitos devido a um contrato antecipado celebrado entre esta e o depósito. Todos os seus rejeitos radioativos do tipo LLW são armazenados neste depósito. Na segunda possibilidade, decorrente do atual cenário de falta de espaço para deposição de rejeitos radioativos nos EUA, há um estímulo para que as usinas procurem outro local para armazenar seus rejeitos. Neste caso, somente são armazenados neste depósito rejeitos radioativos do tipo LLW classes B e C que ocupam um menor volume. Já os rejeitos radioativos do tipo LLW classe A são encaminhados para outro depósito, nos dias atuais, o depósito da *Envirocare*, em Utah. Os custos têm variado ao longo do tempo conforme a oferta e demanda de espaço de armazenamento.

Nesta metodologia, em 1986 observava-se a distribuição de custos mostrada na Tabela 7.2 quando a mão de obra era a principal parte dos custos de descomissionamento. A Figura 7.1 mostra a evolução dos fatores de correção temporais para trabalho, energia e disposição dos rejeitos radioativos do tipo LLW de 1986 até os dias de hoje.

É interessante se observar que os fatores de correção seguiram de perto a evolução dos índices gerais de inflação dos EUA até o ano de 2000. Após este ano, os custos de disposição de material radioativo tiveram um crescimento muito acima da inflação. A Figura 7.2 apresenta a evolução temporal da distribuição de custos de 1986 até os dias de hoje. Vê-se que a participação da disposição de rejeitos nos custos de descomissionamento subiu de 22%, em 1986, para acima de 50%, atualmente.

## **7.2 Custo mínimo de descomissionamento das usinas da CNAAA**

Conforme observado, uma estimativa razoável dos custos de descomissionamento de uma usina nuclear depende, enormemente, da questão de disposição dos rejeitos radioativos da usina. No caso do descomissionamento das usinas Angra 1, 2 e 3, o custo mínimo de descomissionamento traz incertezas adicionais com relação aos custos do gerenciamento e disposição dos rejeitos (parâmetro  $B_x$ ).

Adotando-se como referência a situação americana, para um caso genérico com o custo de disposição dos rejeitos com menor evolução, os fatores de correção da inflação são apresentados na Tabela 7.3 de 1986 a 2012 [6]. Com base nesses fatores, as garantias financeiras mínimas, em dólares de 2012, para o

descomissionamento das usinas Angra 1, 2 e 3, caso estas estivessem localizadas nos EUA, são apresentadas na Tabela 7.4 [6]. Para a Usina Angra 1 a garantia financeira mínima para realizar o descomissionamento é de US\$ 431,6 milhões e para as Usinas Angra 2 e Angra 3, US\$ 529,6 milhões. Para o sítio da CNAAA a garantia financeira mínima totaliza US\$ 1490,8 milhões.

É importante ressaltar que estas estimativas são custos mínimos de descomissionamento. Os custos de descomissionamento são fortemente dependentes das condições técnicas e financeiras do país de origem, o local da usina, a engenharia local, disponibilidade de ferramentas e maquinários especiais, pessoal treinado e instalações disponíveis para depósito de rejeitos.

### **7.3 Custos reais de usinas descomissionadas nos EUA**

Para a análise comparativa, 3 usinas com reatores do tipo PWR, instaladas nos EUA, foram adotadas. Não foram encontrados na literatura investigada dados de custo descomissionamento final em outros países. As usinas consideradas são:

- Usina de Connecticut Yankee

Localizada em Haddam Neck, Connecticut, a Usina Nuclear Connecticut Yankee (CY), com potência térmica de 1825 MWt, teve início de sua operação comercial em 1968 e produziu mais que 110 bilhões de kWh de eletricidade durante seus 28 anos de operação. Em 1996, após uma reunião entre os diretores da usina, foi decidido fechar permanentemente e descomissionar a usina. Após 2 anos de planejamento e preparação, o desmantelamento da usina teve início em 1998, a partir da estratégia DECON, e foi completado com sucesso em 2007, com todas estruturas da planta removidas e o sítio restaurado para as condições de limpeza da contaminação radioativa do local conforme as normas federais do país.

Entretanto nem todos os rejeitos foram removidos da usina. Os elementos de combustível nuclear utilizados no reator e algumas partes internas do vaso do reator, por serem classificados como rejeitos de alto nível (HLW), ainda estão armazenados no sítio da CY, ocupando uma pequena parte da propriedade (5 de 525 acres). Esta área é denominada *Independent Spent Fuel Storage Installation* (ISFSI) e será mantida até que o governo federal cumpra seu compromisso de retirar esse material, conforme o contrato feito entre os proprietários da CY e o Departamento de Energia

dos EUA, o DOE. Os depósitos de rejeitos radioativos nos EUA atingiram sua capacidade máxima de armazenamento no final dos anos 90. Sendo assim, o depósito contratado previamente pela usina CY armazenou os rejeitos de baixo nível (LLW), classes B e C, que compõem uma pequena porcentagem do volume total dos rejeitos gerados pelo processo. Já os rejeitos LLW de classe A foram armazenados no depósito da *Envirocare*, localizado no estado de Utah, EUA.

Com base nestas informações, foram obtidos os fatores de correção temporais  $L_x$ ,  $E_x$  e  $B_x$  para o descomissionamento da usina CY, conforme mostra a Tabela 7.5. O custo mínimo de descomissionamento calculado foi de US\$ 465 milhões (dólares de jan/2014). O custo real de descomissionamento, incluindo todas as etapas desde desmantelamento, remoção e armazenamento dos rejeitos (com O&M até 2022), deve ficar em torno de US\$ 638 milhões (dólares de Jan/2014) [7].

- Usina Trojan

Localizada em Columbia County, Oregon, a Usina Nuclear Trojan, com potência térmica de 3411 MWt, teve a primeira criticalidade do seu reator em dezembro de 1975 e começou sua operação comercial em maio de 1976. Em janeiro de 1993, após quase 17 anos de operação, a proprietária notificou a NRC sua decisão para cessar, permanentemente, a operação da usina. Esta decisão foi tomada através de considerações financeira e de segurança. Baseado na estratégia DECON, o descomissionamento da usina foi dividido em dois extensos períodos: um período de desmantelamento e descontaminação (equipamentos, sistemas, materiais contaminados e do local) e um período de transição (armazenamento dos rejeitos, construção da ISFSI).

Assim, como na Usina CY, os elementos de combustível nuclear e partes internas do vaso do reator classificados como rejeitos HLW, foram armazenados em ISFSI, dentro do sítio nuclear da usina, com previsão de remoção pelos órgãos responsáveis em 2018. Os rejeitos LLW foram encaminhados para o depósito *US Ecology Low Level Radioactive Waste*, próximo de Richland, Washington [8].

Com base nestas informações foram obtidos os dados da Tabela 7.6 para os fatores de correção  $L_x$ ,  $E_x$  e  $B_x$  para o descomissionamento da usina Trojan. O custo mínimo de descomissionamento estimado é de US\$ 390 milhões (dólares de Jan/2014). O descomissionamento da usina até a fase de deposição dos rejeitos e da

construção, manutenção e desmantelamento da instalação ISFSI (até 2018), deve ter um custo de US\$ 618 milhões (dólares de Jan/2014) [8].

- Usina Rancho Seco

Localizada em Herald, Califórnia, a Usina Rancho Seco de potência térmica de 2772 MWt teve início de sua operação comercial em abril de 1975 e foi desligada, permanentemente, em junho de 1989, por sua operação não ser considerada segura após um acidente. Apesar de terem adotado a estratégia DECON, a usina ficou em SAFSTOR até 2008, por problemas com os licenciamentos exigidos pelo órgão regulador (NRC). Somente algumas atividades mais simples de desmantelamento foram realizadas em um processo denominado de *incremental decommissioning* [9].

De forma similar às duas outras usinas citadas neste documento, a falta de instalações para armazenamento dos rejeitos oriundos do processo levou os rejeitos LLW classe B e C a serem armazenados no sítio nuclear da usina (*Interim Onsite Storage Building, IOSB*). Os rejeitos LLW classe A foram armazenados no depósito da *Envirocare*, localizado no estado de Utah, EUA.

Para os elementos de combustível nuclear e partes internas do vaso do reator, classificados como rejeitos HLW, foram armazenados em uma ISFSI, também no sítio nuclear da usina Rancho Seco. Os órgãos responsáveis ainda não possuem uma previsão para remover o IOSB e o ISFSI do sítio nuclear e dar continuidade ao descomissionamento destas instalações e à descontaminação radiológica do local [9].

Com base nestas informações foram obtidos os dados da

Tabela 7.7.7 para os fatores de correção  $L_x$ ,  $E_x$  e  $B_x$  para o descomissionamento da usina Rancho Seco. O custo mínimo de descomissionamento estimado para a usina foi de US\$ 507 milhões (dólares de Jan/2014). O custo total estimado para o descomissionamento, incluindo um adicional para as despesas de O&M e desmantelamento das instalações que ainda permanecem no sítio nuclear e para a futura remoção e armazenamento dos rejeitos, é em torno de US\$ 555 milhões (dólares de Jan/2014).

#### **7.4 Comparação entre custos real e mínimo**

A comparação entre os custos real e mínimo obtido através do método MFA é apresentada feita na Tabela 7.8 e Figura 7.3. Pode-se observar que o custo mínimo calculado pode ter uma diferença considerável comparado com o custo real. A variação entre a estimativa mínima e o valor real para as três usinas foi entre 9,5 % e 59 %. O custo real, de acordo com as referências, teve um acréscimo ao longo dos anos pela falta de instalações apropriadas para armazenamento dos rejeitos contaminados gerados pelo processo de descomissionamento. Observa-se que todos os custos reais estão acima da curva desenvolvida para as usinas de Angra. Deve-se, portanto, fazer previsões de contingenciamento sobre o valor mínimo estimado.

#### **7.5 Contingenciamento**

O projeto de descomissionamento de uma usina nuclear pode conter grandes incertezas, que refletem diretamente nas estimativas de seus custos. Estas incertezas podem ser de caráter tecnológico, tendo em vista as dificuldades de desmantelamento de uma estrutura contaminada ou ativada, de evolução dos custos de mão de obra, de energia ou mesmo de intempéries, sem mencionar a questão do gerenciamento dos rejeitos radioativos. Desta forma, contingenciamento representa uma parte integrante do processo de estimativa de custos, sendo que algum critério deve ser estabelecido [10].

Diferentes países adotam diferentes formas de abordagem. Estas formas são apresentadas na Tabela 9. Bélgica, Canadá, Eslováquia, Espanha e Suécia adotam um contingenciamento entre 10 e 30 %, França, entre 5 e 50 % e EUA, até de 75 % devido a questão de oferta e demanda de espaço para armazenamento de rejeitos radioativos. Japão, Alemanha e Holanda não consideram contingenciamentos.

O contingenciamento a ser considerado para o sítio da CNAAA será definido após os estudos detalhados de custo de descomissionamento a serem realizados em 2015, conforme descrito na seção 7.7.

#### **7.6 Fatores que afetam a estimativa de custo para a CNAAA**

A indústria nuclear adquiriu nos últimos anos uma experiência significativa na área de descomissionamento de usinas e desenvolveu capacidade de determinar o custo e garantir a segurança de todo o processo. O custo mínimo de

descomissionamento da CNAAA foi estimado com base na experiência dos EUA. Neste cenário, os custos de descomissionamento das usinas de Angra 1, 2 e 3 são fortemente dependentes da disponibilidade de um local de armazenamento de rejeitos de baixo nível de radiação. O custo efetivo do armazenamento depende das condições atuais do mercado e da solidez dos critérios estabelecidos pelos órgãos reguladores, como foi visto para as 3 usinas americanas estudadas neste documento. Os sítios não foram desmobilizados por não haver depósitos disponíveis para receber os rejeitos radioativos oriundos do descomissionamento e foi necessário construir depósitos específicos nos sítios das próprias usinas.

### **7.7 Estrutura para a estimativa detalhada do custo de descomissionamento**

O documento ISDC (International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installation) propõe uma estrutura hierárquica para estimar o custo das atividades de descomissionamento para usinas e outras instalações nucleares [1]. As atividades típicas que são realizadas no descomissionamento são divididas em 11 grupos de atividades principais [9]. Este conjunto de atividades pode ser aplicado a qualquer etapa de um projeto de descomissionamento. Em outras palavras, qualquer etapa ou atividade de descomissionamento pode ser decomposta nestas atividades de trabalho. Assim, o descomissionamento total de uma usina nuclear requer que este conjunto de atividades principais seja executado para cada sistema, estrutura ou equipamento que se encontra sob descomissionamento.

A Figura 7.4 apresenta esta estrutura em 3 níveis denominados atividade principal, grupo de atividades e atividade típica. Para cada atividade típica devem ser definidos, de acordo com a característica do equipamento, sistema ou estrutura a serem descomissionados, componentes de custo devido ao trabalho, custeio, investimento e uma contingência para acomodar incertezas [1].

As atividades principais propostas para realizar o descomissionamento de qualquer sistema, equipamento ou estrutura são:

- 01 – Ações de pré-descomissionamento,
- 02 – Atividades de desligamento,
- 03 – Atividades adicionais para fechamento e confinamento seguros,

- 04 – Atividades de descomissionamento dentro de áreas controladas,
- 05 – Processamento, armazenamento e disposição final de rejeitos,
- 06 – Infraestrutura e operação do sítio,
- 07 – Desmantelamento convencional, demolição e restauração do sítio,
- 08 – Gerenciamento de projeto, engenharia e atividades de suporte,
- 09 – Pesquisa e desenvolvimento,
- 10 – Combustível e materiais nucleares,
- 11 – Despesas gerais.

As atividades típicas (terceiro nível na estrutura do ISDC mostrados na Figura 7.4) são consideradas atividades elementares que podem ter seus custos calculados. Para se realizar uma estimativa de custo de um projeto de descomissionamento devem-se definir seus objetivos, identificar os sistemas contaminados que estarão sob descomissionamento e identificar as atividades típicas dentro dos 11 grupos de atividades principais listados acima.

A Eletronuclear contratou uma empresa de consultoria internacional para realizar no ano de 2015, em conjunto com a Universidade Federal do ABC sob supervisão da Eletronuclear, uma estimativa detalhada dos custos de descomissionamento segundo esta metodologia do ISDC.

### **Referências**

1. ISDC, International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installations, Nuclear Energy Agency, NEA 7088, 2012.
2. US NRC, Regulatory Guide 1202, Standard Format and Content of Decommissioning Cost Estimates for Nuclear Power Reactors, USNRC, Fevereiro, 2005.
3. Estimativa do custo mínimo de descomissionamento, Relatório Técnico No. UABC-DESCOM-EST-002-01, Universidade Federal do ABC, 2014.
4. US Dep. of Labor, Bureau of Labor Statistics, <http://www.bls.gov/data/>, 2014.

5. US NRC, Report on Waste Burial Charges: Changes in Decommissioning Waste Disposal Costs at Low-Level Waste Burial Facilities, NUREG 1307, Rev. 14, Novembro, 2010.
6. Eletronuclear, Cálculo preliminar dos valores mínimos para o fundo de descomissionamento da CNAAA, de acordo com o NUREG 1307, rev. 15, Relatório No. SN.T.001.13, 21/10/2013.
7. CYAPCO, Post Shutdown Decommissioning Activities Report (PSDAR). Connecticut Yankee Atomic Power Company, Docket No. 50-213, CY-97-075. Agosto, 1997.
8. PGE, Annual Report of the Status of Decommissioning Funding for the Trojan Nuclear Plant in Accordance with 10 CFR 50.75 (f)(1). Portland General Electric Company, Docket No. 50-344, VPN-021-2005, Março, 2005.
9. SMUD, Rancho Seco Report on Decommissioning Funding Status. Sacramento Municipal Utility District, Docket No. 50-312, DPG-10-074, Março, 2010.
10. IAEA, Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety Series no. 45, International Atomic Energy Agency, 2005.
11. CODE OF FEDERAL REGULATIONS – 10CFR 50.75 – Reporting and Record for Decommissioning Planning.



Tabela 7.1–Valores de  $B_x$  em função da localização, proprietário e ano dos depósitos de LLW dos EUA [4]

Year	B <sub>x</sub> Values for Washington Site <sup>(b)</sup>				B <sub>x</sub> Values for South Carolina Site								B <sub>x</sub> Values for Generic LLW Disposal Site <sup>(a)</sup>			
	Compact-Affiliated Facility Only <sup>(a)</sup>		Combination of Compact-Affiliated and Non-Compact Facility <sup>(a)</sup>		Atlantic Compact <sup>(c)</sup>				Non-Atlantic Compact <sup>(d)</sup>				Compact-Affiliated Facility Only <sup>(a)</sup>		Combination of Compact-Affiliated and Non-Compact Facility <sup>(a)</sup>	
	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR
2012	7.335	6.704	7.375	6.076	30.581	27.295	13.885	14.160	NA	NA	NA	NA	30.581	27.295	13.885	14.160
2010	8.035	7.423	6.588	5.458	27.292	24.356	12.280	12.540	NA	NA	NA	NA	27.292	24.356	12.280	12.540
2008	8.283	23.185	5.153	20.889	25.231	22.504	9.872	11.198	NA	NA	NA	NA	25.231	22.504	9.872	11.198
2006	6.829	11.702	3.855	9.008	22.933	20.451	8.600	9.345	23.030	20.813	8.683	10.206	NA	NA	NA	NA
2004	5.374	13.157	3.846	11.755	19.500	17.389	7.790	8.347	21.937	17.970	7.934	8.863	NA	NA	NA	NA
2002	3.634	14.549	5.748	15.571	17.922	15.988	9.273	8.626	18.732	16.705	9.467	8.860	NA	NA	NA	NA

Tabela 7.2– Distribuição dos custos de descomissionamento em 1986.

Custos de mão de obra	65%
Energia	13%
Disposição do material radioativo – LLW	22%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

Tabela 7.3– Fatores de correção temporais obtidos para as usinas da CNAA em 2012.

$L_X^{(a)}$	$E_X^{(a)}$	$B_X^{(a)}$
2,520	2,704	13,885

Tabela 7.4– Garantias Financeiras Mínimas (valores de 2012).

Usina	MFA (US\$ milhões)
Angra 1	431,6
Angra 2	529,6
Angra 3	529,6
Total	1490,8

Tabela 7.5–Fatores de correção temporais para a Usina Connecticut Yankee.

$L_x^{(a)}$	$E_x^{(a)}$	$B_x^{(a)}$
2,38	2,704	13,885

Tabela 7.6–Fatores de correção temporais para a Usina Trojan

$L_x^{(a)}$	$E_x^{(a)}$	$B_x^{(a)}$
2,52	2,704	7,335

Tabela 7.7–Fatores de inflação para o método MFA – Usina Rancho Seco

$L_x^{(a)}$	$E_x^{(a)}$	$B_x^{(a)}$
2,38	2,704	13,885

Tabela 7.8—Comparação entre custo mínimo estimado e custo real para o descomissionamento de três usinas nucleares

Usina	Custo mínimo (US\$)	Custo real (US\$)	Variação (%)
Connecticut Yankee	465	638	37
Trojan	389	618	59
Rancho Seco	507	555	9,5

Tabela 7.9—Contingenciamento e administração de riscos.

Country	Contingency	Risk Management
Belgium	15% of total	Not developed for cost estimates but considered in scope of funding.
Canada	10–30%	Not considered.
France	5 Levels 5-50%	
Germany	None	Not considered.
Japan	None	Not considered.
Netherlands	None	Not considered.
Slovakia	25% for preliminary estimates; 20% for detailed estimates	Not considered.
Spain	15-25%	Not considered.
Sweden	6–20%	Considered in probabilistic analyses of future costs for waste management, disposal and decommissioning.
United States	WBS Level 10-75%	Highly sensitive in United States, 25-50% sometimes added.

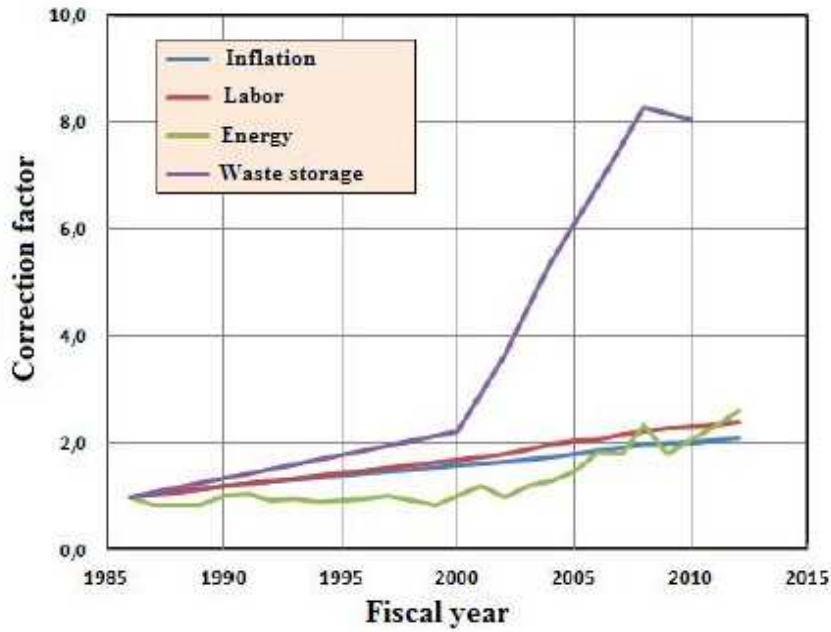


Figura 7.1– Evolução dos fatores de correção ao longo do tempo.

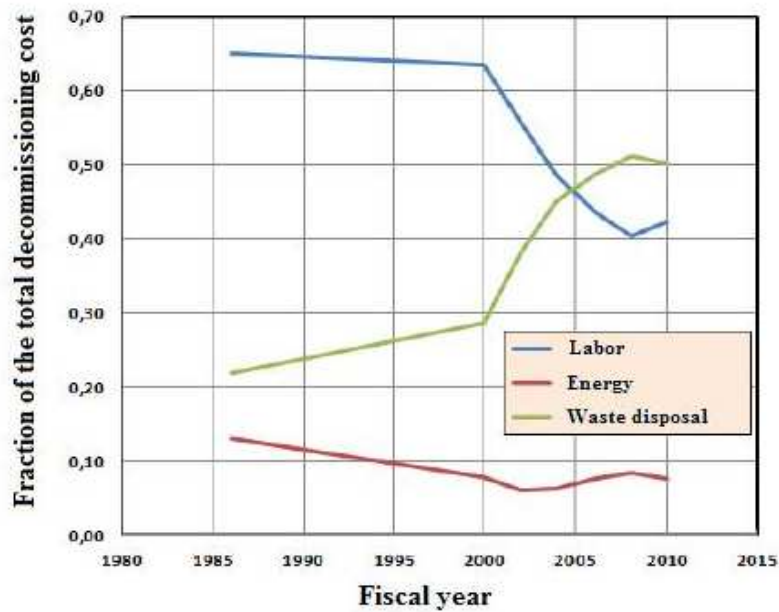


Figura 7.2–Evolução das frações do custo total de descomissionamento ao longo o tempo.

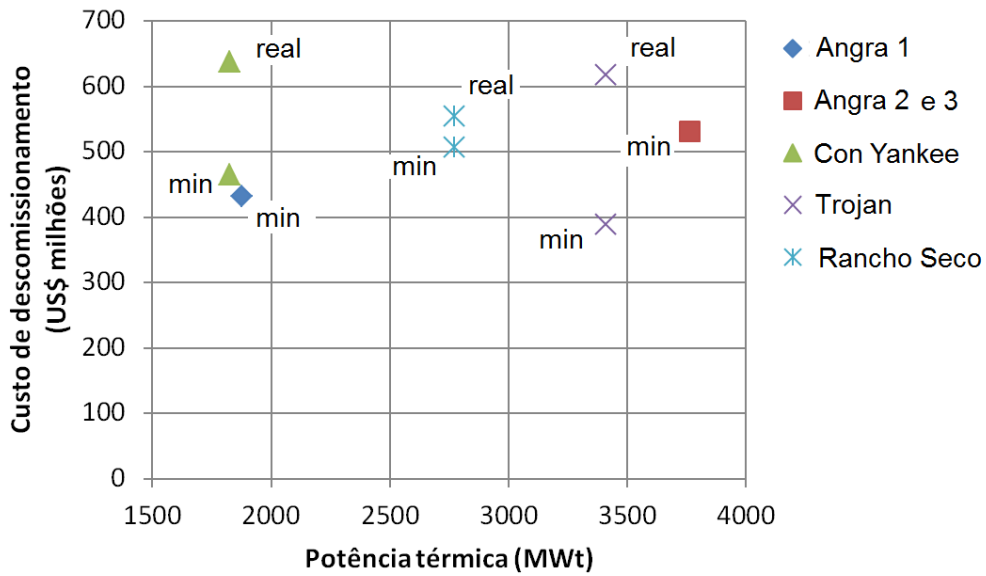


Figura 7.3– Comparação entre os custos reais e mínimos das usinas em análise.

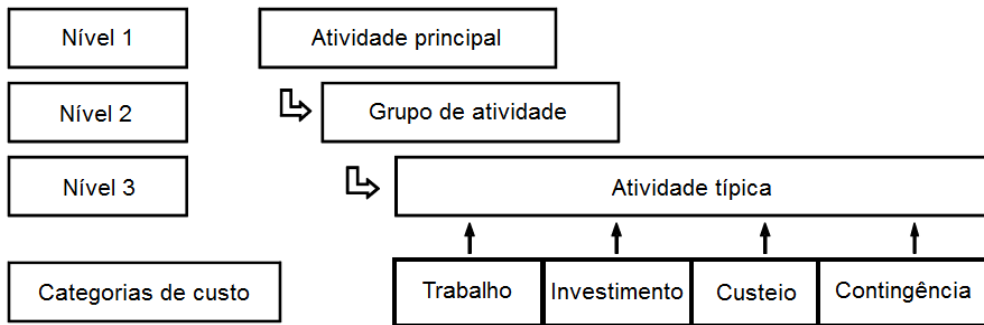


Figura 7.4– Proposta de estrutura para a estimativa de custo de descomissionamento de usinas nucleares do ISDC [1].

## **8 MEDIDAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

Esta seção descreve as medidas de proteção radiológica que deverão ser seguidas em todas as fases do descomissionamento das Centrais Nucleares Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). As normas básicas de proteção radiológica a serem seguidas visam garantir a segurança de trabalhadores e indivíduos do público e o meio ambiente [1-4]. Estas normas e os critérios apresentados na seção 4 visam garantir que os trabalhadores envolvidos nas operações de descomissionamento sejam submetidos a níveis de radiação nas condições ALARA, bem como os níveis de radiação medidos fora das instalações, dentro dos limites estabelecidos.

Por recomendação internacional, as atividades de descomissionamento devem ser de prática e não de intervenção, exceto no caso de incidentes ou acidentes durante as operações de descomissionamento. O limite operacional é de 1 mSv/ano para indivíduo do público e de 20 mSv/ano para indivíduo ocupacionalmente exposto. Abaixo deste limite recomenda-se um processo de otimização, i.e., a redução das doses a níveis consideradas ALARA.

Enquanto os combustíveis estiverem nas piscinas de estocagem da própria central, a instalação será considerada uma instalação nuclear. Entretanto, após a transferência de todo combustível para o depósito UFC, as áreas sob descomissionamento podem ser classificadas como instalações radiativas, contendo apenas rejeitos de níveis baixo e médio.

### **8.1 Responsabilidades da Divisão de Proteção Radiológica**

O plano de proteção radiológico a ser usado no descomissionamento não deve diferir dos usados durante a operação e descritos nos Relatórios Finais de Análise de Segurança das usinas da CNAAA, principalmente nos de natureza administrativa. A Divisão de Proteção Radiológica da CNAAA será corresponsável por todas as operações envolvidas no descomissionamento que, resumidamente, serão:

- Manter e implementar o programa de proteção radiológica;

- Formular procedimentos e políticas administrativas para cumprir o princípio ALARA;
- Desenvolver procedimentos associados com monitoração pessoal, quer dos trabalhadores da própria usina, quer de empresas contratadas para as operações de descomissionamento;
- Garantir o cumprimento das especificações técnicas das operações de descomissionamento, bem como supervisionar e autorizar as operações a serem conduzidas por eventual empresa contratada para as operações de descomissionamento;
- Gerenciar as liberações de efluentes sólidos, líquidos e gasosos, bem como a monitoração, tratamento, embalagem e transporte para o repositório final de rejeitos de nível baixo e médio;
- Avaliar e recomendar o treinamento do pessoal da Divisão de Proteção Radiológica em atividades de descomissionamento mantendo a competência técnica e proficiência nessas atividades, bem como dos técnicos de eventuais empresas contratadas nas operações de descomissionamento;
- Garantir a disponibilidade de no mínimo um técnico de proteção radiológica com disponibilidade de 24 horas dentro de cada usina durante todas as fases do descomissionamento;
- Recomendar ao gerente de descomissionamento a declaração de uma situação de emergência, a qual tendo continuidade, poderá colocar em risco os trabalhadores e/ou o público e/ou o meio ambiente. Na ausência deste gerente, deve tomar ações para interromper operações em qualquer condição que coloque em risco a saúde e segurança dos trabalhadores na execução de qualquer atividade durante o descomissionamento;
- Realizar monitoração dos níveis de radiação ambiental nas áreas circunvizinhas à área sob descomissionamento.

A Divisão de Proteção Radiológica contará com técnicos de proteção radiológica que serão responsáveis pelos levantamentos radiométricos,



calibração de instrumentos, manter pontos de controle, preparar permissões pela operação em ambiente radioativo, fornecer equipamentos de proteção pessoal nas operações, tais como equipamentos de proteção respiratórios, blindagens etc., e garantir proteção radiológica efetiva para o ambiente de trabalho seguro. A Divisão de Proteção Radiológica contará também com uma equipe de analistas de proteção radiológica que serão responsáveis por fornecer o suporte técnico em dosimetria, implementação e revisão de procedimentos ALARA e implementação de procedimentos de emergência.

O início do descomissionamento de uma instalação nuclear é, obrigatoriamente, precedido por um extenso programa de monitoração ambiental que tem como objetivo diagnosticar o meio ambiente local antes do início da atividade. Este programa é mantido durante a fase de desmantelamento possibilitando, desta forma, a detecção de quaisquer mudanças que venham a ocorrer quanto aos níveis de radiação ambiental. A monitoração ambiental é realizada segundo as normas vigentes para monitoração de material radioativo e material poluente de instalações nucleares e as recomendações básicas para monitoração de usinas nucleares. O programa de medição deve envolver principalmente a área circunvizinhas dos locais sob processo de descomissionamento.

## **8.2 Fontes de radiação**

O inventário radioativo é descrito na Seção 6 deste PPD, contudo, aqui se resume para efeitos de medidas de proteção radiológica, as principais fontes de radiação que deverão ser monitoradas durante todas as etapas do descomissionamento. Tendo em vista a estratégia a ser adotada no descomissionamento da CNAAA, as Usinas Angra 1 e Angra 2 entrarão em estado de desmantelamento protelado (safstore) logo ao final de suas licenças de operação. O combustível, os internos e os fluidos radioativos serão removidos das usinas logo nas primeiras etapas de descomissionamento. Durante as atividades de descontaminação e desmantelamento estes materiais não constituirão fontes de radiação para os trabalhadores nesses locais.

Durante as atividades de descontaminação e demolição, a radiação tem origem nos materiais ativados de equipamentos e estruturas durante a operação

comercial da usina, na deposição de material radioativo dos fluidos nas tubulações, equipamentos do sistema primário de refrigeração e sistemas auxiliares que trocam fluido com este. Desta forma as fontes de radiação podem ser classificadas em dois grupos:

- O vaso de pressão e blindagem biológica, cujos materiais são ativados durante a operação da central;
- Os circuitos de refrigeração e sistemas auxiliares que são contaminados por deposição de materiais radioativos.

A Tabela 8.1 apresenta as características das principais fontes de radiação nas usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 durante o descomissionamento. Os níveis de radiação desses materiais são apresentados na Seção 6.

### **8.3 Sistemas de monitoração da radiação**

A monitoração de radiação durante o descomissionamento da CNAAA deve atender propósitos similares aos que ocorrem atualmente durante a operação comercial das usinas [5-7]:

- Monitorar a ocorrência de radiação ionizante e fluxo de atividade dentro da instalação;
- Monitorar o pessoal de operação que pode estar exposto à radiação através das medidas relacionadas com o controle de proteção radiológica;
- Monitorar a liberação de material radioativo para o ambiente;
- Minimizar a exposição à radiação e contaminação de pessoas, componentes e do ambiente.

A monitoração de radiação verificará se os valores medidos estão abaixo dos limites estabelecidos em projeto. Em caso de qualquer desvio destes limites, a proteção radiológica deverá atuar de forma a retornar o sistema às condições normais de operação. Os seguintes sistemas de monitoração devem operar adequadamente para atender esses objetivos: monitoração de sistemas, monitoração de área, monitoração de pessoal, monitoração de efluentes

radioativos e monitoração ambiental. A seguir descreve-se resumidamente cada um desses sistemas.

### **8.3.1 Monitoração de Área**

Detectores de taxas de dose e monitores de ar devem ser instalados em locais predeterminados para prover a monitoração de área sob descomissionamento visando minimizar a exposição à de radiação dos trabalhadores [6]. O sistema de monitoração de área deve também fornecer informações para antever um possível acidente e minimizar exposição dos trabalhadores.

### **8.3.2 Monitoração de pessoal**

A monitoração de pessoal começa com a verificação do direito de acesso pelas pessoas à área controlada. O acesso é permitido apenas a pessoas que possuam um passe válido, tenham sido declaradas aptas por um treinamento em proteção radiológica, tenham sido informadas dos riscos e das medidas de proteção radiológica dentro da área controlada e possuam uma licença de trabalho radiológico [5].

Todas as pessoas que acessarem áreas controladas serão equipadas com dosímetros termo-luminescentes e detectores de leitura direta. Quando as pessoas deixarem áreas controladas, elas devem ser examinadas quanto ao nível de incorporação de substâncias radioativas através de monitores pessoais com contadores de grande área ou cintiladores que detectam contaminação no corpo (mãos, pés, roupas, cabelo, face). Instrumentos de monitoração portátil serão usados para a detecção de superfícies contaminadas dentro da unidade. Estes equipamentos permitem que verificações periódicas evitem o espalhamento descontrolado de atividade.

### **8.3.3 Monitoração de efluentes radioativos**

Os efluentes gasosos e líquidos das áreas sob descomissionamento deverão ser monitorados e registrados em documentados continuamente. A liberação desses efluentes deve ser controlada. O seu sistema de monitoração inclui a medida e registro da concentração da atividade dos efluentes líquidos, medida e registro da concentração de gases nobres nos pontos de liberação e

alarmes de atividade acima dos limites de gases nobres e aerossóis nos pontos de liberação para a atmosfera.

Se a atividade dos efluentes líquidos resultantes dos processos estiver acima de  $3,7 \times 10^5$  Bq/m<sup>3</sup>, estes serão armazenados em tanques para posterior tratamento no CGR da CNAAA. O transporte e gerenciamento dos rejeitos radioativos devem seguir as normas vigentes [3,4,8].

Os rejeitos radioativos sólidos são oriundos da operação, tais como vestimentas, estopas, vedações, filtros e cartuchos filtrantes, isolamentos, embalados etc, e da descontaminação e demolição das estruturas, sistemas e equipamentos da CNAAA também serão devidamente monitorados. Deverão ser elaborados procedimentos administrativos adequados para o tratamento, embalagem e gerenciamento desses rejeitos sólidos de acordo com as normas vigentes [1-4, 9].

#### **8.3.4 Monitoração ambiental da radiação**

A monitoração ambiental da radiação segue os procedimentos atuais das usinas da CNAAA e normas para trabalhadores e indivíduos do público [1]. Todas essas medições começam muito antes do descomissionamento da instalação, de modo que se tenha a informação da situação global antes do início da atividade. No caso específico da CNAAA, o programa de monitoração ambiental foi iniciado em dezembro de 1978 e continua até hoje.

#### **8.3.5 Monitoração da integridade de barreiras**

O escape não controlado de substâncias radioativas oriundo da desmontagem dos sistemas que contém radioatividade na instalação deverá ser prevenido por barreiras físicas (tanques, filtros, etc.) e pressão subatmosférica no sistema de ventilação. A integridade de tais barreiras que separam os sistemas que contém radioatividade dos sistemas não radioativos deverá ser monitorada. Isto será feito através de medida contínua de atividade e amostragens a serem analisadas no laboratório de uma das usinas.

## Referências

1. CNEN-NN-3.01, Diretrizes básicas de proteção radiológica, Norma CNEN-NN-3.01, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014.
2. CNEN-NE-3.02, Serviços de radioproteção, Norma CNEN-NE-3.02, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1988.
3. CNEN-NE-5.01, Transporte de materiais radioativos, Norma CNEN-NE-5.01, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1988.
4. CNEN-NE-6.05, Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas. Norma CNEN-NE-6.05, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1985.
5. Angra 3 PSAR, Seção 12.1.1 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Policy considerations, 2010.
6. Angra 3, PSAR, Seção 12.1.2 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Design considerations, 2010.
7. Angra 3, PSAR, Seção 12.1.3 - Ensuring that occupational radiation exposures are ALARA, Operational considerations, 2010.
8. Angra 3, PSAR, Seção 11.2 – Liquid waste management systems, 2010.
9. Angra 3, PSAR, Seção 11.3 – Gaseous waste disposal system, 2010.

Tabela 8.1 – Principais fontes de radiação durante o descomissionamento das usinas da CNAAA.

<b>Fontes de radiação</b>	<b>Presença nas usinas sob descomissionamento</b>
Combustível nuclear irradiado	Removidos do reator e estocados na piscina de combustível irradiado de cada usina. Depois de 10 anos deverão ser removidos para o depósito UFC.
Internos do vaso do reator	Removidos do reator e poderão ser estocados no depósito rejeitos do CGR, dependendo da disponibilidade dos Depósitos Finais. Podem ser classificados como rejeitos de alto nível ou médio nível, conforme avaliação radiométrica.
Materiais metálicos ativados por nêutrons – aço carbono irradiado, aço inoxidável irradiado e outros metais.	Permanecem durante as etapas de safstore até o momento do desmantelamento.
Concreto ativado por nêutrons	Permanecem durante as etapas de safstore até o momento do desmantelamento ou descontaminação.
Materiais metálicos contaminados – aço carbono, aço inoxidável e outros metais	Permanecem durante as etapas de safstore até o momento do desmantelamento ou descontaminação.
Concreto contaminado	Permanecem durante as etapas de safstore até o momento do desmantelamento e descontaminação.
Materiais tecnológicos, revestimentos e outros materiais contaminados	Permanecem durante as etapas de safstore até o momento do desmantelamento e descontaminação.

## **9 PROTEÇÃO FÍSICA**

O objetivo desta seção é estabelecer as medidas de segurança envolvidas na proteção das instalações destinadas ao processo e às atividades de Descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Como princípio geral, o descomissionamento irá ocorrer nas próprias instalações do CNAAA (objeto do descomissionamento), após as suas adequações e preparações de infraestrutura necessárias para a realização da operação de descomissionamento.

Desta forma, os procedimentos e as estruturas já implantados para a proteção física do CNAAA serão utilizados e mantidos, após a adequação para o descomissionamento.

### **9.1 Objetivo do Programa**

O objetivo do programa de proteção física do descomissionamento do CNAAA é prover a segurança e a proteção física para as instalações e as adequações necessárias para realização das atividades de descomissionamento do CNAAA. Este programa complementa o programa de proteção física já existente para a planta operacional da CNAAA, adicionando as instalações e as adequações específicas do descomissionamento ao programa original. Este programa está em conformidade com o documento “Plano de Proteção Física da planta da CNAAA” [4], seguindo as mesmas diretrizes e procedimentos estabelecidos no item 13.6 da Ref. 5.

Estes documentos referenciados atendem aos requisitos de proteção física estabelecidos nas normas vigentes [1-3].

As medidas de segurança contidas no Plano de Proteção Física contemplam ou abrangem os seguintes tópicos:

- Investigação inicial de funcionários, e avaliação contínua e revisões;
- Uma força de segurança;
- Barreiras físicas iluminadas;
- Sistema de fechaduras / travas e chaves;
- Sistema de detecção de intrusão;
- Contato com autoridades policiais locais e linhas de comunicação redundantes com autoridades;

- Procedimentos operacionais e administrativos de rotina que monitorem adequadamente as condições das áreas e equipamentos vitais;
- Controle da movimentação de pessoal, materiais e veículos, entrando e dentro da área protegida da planta de forma a assegurar um programa adequado de segurança;
- Procedimentos escritos de proteção física.

## **9.2 Definições**

- **Área de Segurança (Conceito):** Local demarcado patrulhado, protegido e de área vital, para a proteção física de uma ou mais Unidades Operacionais, para o grau de proteção consistente com a sua natureza.
- **Barreira Física (Conceito):** cercas, paredes, tetos e pisos com construção e resistência características de forma a evitar intrusão em uma área demarcada.
- **Área Patrulhada (Conceito):** área de segurança adjacente e externo a uma ou mais áreas protegidas, mantida sobre constante vigilância, cercada e demarcada com avisos e sinais apropriados indicando de que se trata de uma área de segurança.
- **Área Protegida (Conceito):** área de segurança sobre proteção permanente, cercada por uma barreira física e com um número reduzido de acessos controlados, incluindo:
  - Uma ou mais áreas vitais de uma mesma instalação nuclear;
  - Uma instalação nuclear com nenhuma área vital.
- **Área Vital (Conceito):** área de segurança necessariamente dentro de uma área protegida, contendo equipamento vital e/ou material nuclear, dentro de uma estrutura cujas paredes, tetos e piso constituem barreiras físicas.
- **Força de Segurança:** trata-se de pessoal selecionado, treinado, equipado e habilitado pelas Autoridades Estaduais e Federais para garantir a Proteção Física das Unidades Operacionais, a guarda e proteção do patrimônio e atender as diversas situações de emergências. São, portanto, agentes garantidores.



### 9.3 Salvaguardas

Até que o combustível irradiado ou outro material dentro do âmbito da política internacional de não proliferação aplicada a usos pacíficos da energia nuclear, sujeito a salvaguardas, permaneça no local durante operações de descomissionamento, a presença da Força de Segurança terá que ser mantida [6]. Uma vez que o material seja removido, as funções de salvaguarda estarão terminadas.

#### Referências

1. SIPRON-NG-03 - "Norma Geral para Situações de Emergência nas Instalações Nucleares"
2. Norma CNEN-NE-02.01 - "Proteção Física de Unidades operacionais da Área Nuclear"
3. NRC - Regulatory Guide 1.17 - "Protection of Nuclear Power Plants Against Industrial Sabotage"
4. Eletrobrás Eletronuclear; "Plano de Proteção Física para as Unidades 1 e 2 da CNAAA".
5. Eletrobrás Eletronuclear; "Final Safety Analysis Report da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.Unit 2", Revision 13, April 2013.
6. IAEA - Treaty for the Prohibition of Nuclear Weapons in Latin America (Tlatelolco Treaty), 1969.

## **10 GARANTIA DA QUALIDADE**

A ELETRONUCLEAR, reconhecendo a sua responsabilidade global pelo descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, tem o seu sistema de garantia da qualidade implementado no sentido de assegurar que todas as atividades sejam projetadas e implementadas sem comprometer a segurança do público.

As atividades de Garantia da Qualidade a serem implementadas incluem projeto e construção/preparação das instalações necessárias para o desmantelamento, descontaminação, tratamento, embalagem e armazenamento temporário e definitivo de embalados e componentes radioativos além do treinamento de pessoal especializado para a realização destas atividades.

Este capítulo compreende 2 (duas) seções: 10.1, que cobre as atividades de Garantia da Qualidade desenvolvidas durante a preparação para o descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, e 10.2, que cobre as atividades desenvolvidas durante o descomissionamento.

### **10.1 Garantia da qualidade na etapa de projeto e preparação do descomissionamento**

A primeira etapa consiste no projeto, planejamento e preparação da infraestrutura para o descomissionamento, incluindo o projeto e construção / preparação das instalações operacionais necessárias para o desmantelamento, descontaminação, tratamento, embalagem e armazenagem dos componentes radioativos, além do treinamento de pessoal especializado para a realização destas atividades.

Na qualidade de Requerente, a ELETRONUCLEAR, submeterá à aprovação da CNEN o seu próprio Programa de Garantia da Qualidade, bem como os Programas de Garantia da Qualidade dos Contratados Principais, conforme estabelecido na Norma CNEN NN.1.16.

O Programa de Garantia da Qualidade do Requerente define a política a ser seguida no Empreendimento, cobre suas atividades, estabelece as diretrizes a serem

seguidas nos Programas de Garantia da Qualidade acima mencionados. Este Programa de Garantia da Qualidade inclui o escopo de serviços a serem executados pelas Contratadas Principais, conforme indicado em seus respectivos contratos assinados com a ETN.

Os demais Programas Constituintes contêm a descrição do Sistema da Qualidade de cada um deles, compatível com as diretrizes estabelecidas para o Empreendimento.

A implementação dos Programas de Garantia da Qualidade é verificada através de auditorias, realizadas nas organizações envolvidas no projeto, construção, e operação da Unidade UFC, pela ELETRONUCLEAR.

Cada uma das organizações citadas deverá assegurar, mediante cláusulas que farão constar dos contratos que firmarem, com terceiros, que os mesmos observem os critérios de Garantia da Qualidade aplicáveis aos seus escopos de trabalho.

#### **10.1.1 Responsabilidades**

A ELETRONUCLEAR assume, perante a CNEN, a responsabilidade pela implementação de um Programa de Garantia da Qualidade global para este Empreendimento. O propósito deste Programa é assegurar o atendimento aos requisitos estabelecidos na Norma CNEN NN-1.16 “Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e outras Instalações”, atendendo à Resolução CNEN 15/99.

Os contratos entre a ELETRONUCLEAR e os Contratados Principais exigem que estes elaborem e implementem um Programa de Garantia da Qualidade para itens e serviços importantes à segurança, de acordo com as diretrizes do requerente.

No estabelecimento e na implementação dos Programas Constituintes deve ser enfatizado que a obtenção da qualidade na execução de uma determinada tarefa é de responsabilidade dos seus respectivos executores, e não daqueles que, por meio de verificações procuram assegurar que a qualidade tenha sido obtida.

### **10.1.2 Organização**

Neste item serão descritas as atribuições e responsabilidades da Eletronuclear e das Contratadas nas etapas de projeto, preparação do descomissionamento.

### **10.1.3 Supervisão técnica independente**

Conforme indicado nas especificações deste empreendimento, as atividades de inspeção independente e qualificação realizadas no Brasil, deverão ser realizadas pelo Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear - IBQN, como Órgão de Supervisão Técnica Independente – OSTI.

Conforme julgado necessário pela ETN, para as atividades de inspeção independente e qualificação realizadas no exterior, poderá ser contratada a TÜV (Technischer Überwachungsverein).

### **10.2 Garantia da qualidade na etapa operacional do descomissionamento**

Neste item serão descritas atribuições e responsabilidades da Eletronuclear e das Contratadas com relação às atividades de desmantelamento, descontaminação, tratamento, embalagem e armazenagem dos componentes radioativos para a fase de descomissionamento.

### **Referências**

1. Norma CNEN-NN-1.16 - "Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e outras Instalações".
2. Eletrobrás Eletronuclear; "Final Safety Analysis Report da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Unit 2", Revision 13, April 2013.

## **11 ORÇAMENTO DO DESCOMISSONAMENTO E GARANTIA FINANCEIRA**

### **11.1 Estimativa do custo total do descomissionamento**

Conforme apresentado na seção 7, o custo mínimo de descomissionamento da CNAAA foi estimado com base na experiência dos EUA. Neste cenário, os custos de descomissionamento das usinas de Angra 1, 2 e 3 são fortemente dependentes da disponibilidade de um local de armazenamento de rejeitos de baixo nível. Os valores podem ser revisados após estudos mais apurados de estimativa de custo a serem realizados em 2015. Para a Usina Angra 1, a estimativa de para realizar o descomissionamento é de US\$ 431,6 milhões e para as Usinas Angra 2 e Angra 3, US\$ 529,6 milhões cada. Assim, para o sítio da CNAAA o custo de descomissionamento estimado totaliza US\$ 1490,8 milhões. Esses valores não incluem o custo de armazenamento do combustível nuclear irradiado. A Tabela 11.1 resume o orçamento para o descomissionamento da CNAAA baseado na metodologia adotada para estimativa de custo.

É importante ressaltar que estas estimativas preliminares são custos mínimos de descomissionamento. Os custos de descomissionamento são fortemente dependentes das condições técnicas e financeiras do país de origem, o local da usina, a engenharia local, disponibilidade de ferramentas e maquinários especiais, pessoal treinado e instalações disponíveis para depósito de rejeitos. Os valores podem ser revistos quanto mais informações estiverem disponíveis como, por exemplo: condições de transporte, local e custos de armazenamento de rejeitos radioativos no depósito final da CNEN.

Similarmente, os custos relativos ao armazenamento do combustível irradiado poderão ser incorporados quando maiores informações sobre o Depósito Intermediário de Longa Duração (DICOMBUS) também estiverem disponíveis. Contudo, o armazenamento do combustível irradiado dentro do sítio da usina está previsto enquanto o DICOMBUS não entrar em operação. O combustível irradiado das Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 poderão ficar armazenados no UFC, cujo custo de construção deverá ser incorporado ao passivo imobilizado da CNAAA.

## **11.2 Forma de captação de recursos**

Os recursos financeiros necessários para fazer face ao descomissionamento da CNAAA estão reunidos no Fundo de Descomissionamento da CNAAA depositado no Banco do Brasil. Essa garantia financeira é constituída por recolhimentos periódicos feitos pela Eletronuclear a partir de uma percentagem do faturamento bruto da empresa, como é prática normal em outros países, através de depósitos mensais em conta do fundo financeiro para descomissionamento das Usinas Angra 1 e 2, tendo como titular a ELETROBRAS.

Para o tratamento tarifário, a ANEEL considera hoje as Usinas Angra 1 e 2 como Unidade de Caixa único. Sendo assim, a parcela considerada na receita fixa destinada ao descomissionamento não individualiza o montante por usina.

## **11.3 Captação de recursos no caso de um descomissionamento precoce**

No caso de um descomissionamento precoce causado por algum evento inesperado, os recursos financeiros para fazer face às despesas correlatas serão obtidos do seguro das usinas nucleares da CNAAA mais o montante disponível no Fundo de Descomissionamento. A Eletronuclear mantém uma política de seguros suficiente para cobrir eventuais perdas considerando os principais ativos, bem como a responsabilidade civil inerente a suas atividades.

A Eletrobras Eletronuclear entende que as seguintes situações descritas abaixo podem levar a realização de um descomissionamento precoce:

- 1ª Situação - Decisão Voluntária: decisão em que a Eletrobras Eletronuclear opta pela retirada da Usina do mercado. Neste caso, a Empresa deverá atender aos requisitos dispostos pelo Órgão Regulador a fim de garantir a execução segura do processo de descomissionamento precoce da Instalação Nuclear e apresentar a garantia financeira para a realização da atividade.
- 2ª Situação - Ação governamental: no caso de ocorrer uma alteração da política energética do país e que a Empresa venha a ser obrigada a seguir decisões de Estado para desativar suas Usinas Nucleares. Neste caso, tratando-se de uma intervenção superior, certamente estarão incluídos nas ações de Governo a

viabilização dos recursos econômico-financeiros necessários à execução da sua determinação, para complemento ao fundo financeiro disponível na ocasião.

- 3ª Situação - Ocorrência de acidente: fato em que a Empresa descarta a possibilidade de recuperação da instalação para retorno a operação após um acidente. Neste caso, o Seguro de Risco Nuclear / Danos Materiais que a Empresa mantém hoje para as duas Usinas com limite máximo de indenização no valor US\$ 500 milhões para cada uma delas, somado aos valores já recolhidos pela empresa em conta específica no Banco do Brasil, é suficiente para garantir que haverá recursos suficientes para promover o descomissionamento precoce das mesmas.

Esses valores são próximos do custo total estimado para o descomissionamento do sítio da CNAAA apresentado na Tabela 11.1.

Tabela 11.1 – Orçamento previsto para a realização do descomissionamento do sítio da CNAAA (valores de 2012).

<b>Custo para descomissionamento</b>	<b>Valor (US\$ milhões)</b>
Despesas de armazenamento de rejeitos radioativos	745,4
Despesas de mão de obra e serviços	626,1
Despesas de gastos de energia	119,3
<b>Total</b>	<b>1490,8</b>



## **12 ETAPAS DO DESCOMISSONAMENTO DA CNAAA**

### **12.1 Introdução**

De acordo com os requerimentos da norma da AIEA [1], esta seção apresenta as principais etapas, junto com suas respectivas atividades, para a preparação, descontaminação e desmantelamento da CNAAA. As etapas referem-se à estratégia de descomissionamento definidas para a CNAAA [2] e buscam atender a Resolução CNEN No. 133 [3].

As atividades mais complexas ligadas ao descomissionamento de uma usina nuclear são de descontaminação e de desmantelamento de estruturas. Contudo, antes destas atividades serem iniciadas, normalmente ocorre um longo período de transição normalmente para proporcionar o decaimento dos rejeitos radioativos e facilitar as atividades de descontaminação e desmantelamento. As etapas de descomissionamento definidas para a CNAAA perpassam o período de transição, a descontaminação e desmantelamento e a recuperação final do terreno de acordo com o estado final previamente definido.

### **12.2 Etapas do descomissionamento**

As principais etapas de grandes atividades do processo de descomissionamento são [2,4]:

- E1 - Planejamento e preparação
- E2 - Desativação da planta
- E3 - Operação segura da planta desativada
- E4 - Desmantelamento e descontaminação
- E5 - Recuperação do terreno

As etapas E1 a E3 ocorrem dentro do período denominado de transição. Este período tem início com o encerramento das atividades de operação comercial da usina a ser descomissionada e inclui a remoção do combustível irradiado do núcleo do reator e seu transporte até a Unidade UFC. Alguma descontaminação e desmantelamento de sistemas, componentes e estruturas podem ser realizados para facilitar a operação segura da planta desativada. Estas atividades devem ocorrer após a transferência do combustível irradiado para a Unidade UFC.

Após o período de transição, as etapas remanescentes, E4 e E5 deverão ser feitas o mais rapidamente possível, conforme a estratégia de descomissionamento adotada. O objetivo é reduzir a radiação a níveis aceitáveis [5], permitindo o uso restrito ou irrestrito do sítio da CNAAA, de acordo com o estabelecido pela CNEN. Durante esse período, os sistemas e componentes remanescentes no local da usina em descomissionamento da CNAAA serão descontaminados ou removidos, embalados monitorados e transportados para uma instalação de processamento fora da CNAAA, ou direto para um depósito de armazenamento de rejeito apropriado.

A seguir são apresentadas as principais atividades de cada dessas etapas. As etapas seguem a sequência natural do processo mas algumas atividades de etapas distintas podem ser realizadas em paralelo dependendo da estratégia adotada.

### **12.2.1 Planejamento e preparação**

Consiste nas atividades de engenharia e de planejamento antes da remoção do combustível da usina e concomitantemente com a operação comercial da usina em descomissionamento. A duração esperada para esta etapa é de 24 a 36 meses. As principais atividades são:

- 1.1 Inspeção e caracterização do estado do sítio da usina
- 1.2 Preparação do plano preliminar de descomissionamento
- 1.3 Estimativa do inventário de rejeitos radioativos
- 1.4 Definição dos locais de armazenamento dos produtos radioativos
- 1.5 Definição da sequência das atividades principais
- 1.6 Análise das empresas que poderão participar do processo
- 1.7 Equipamentos necessários para as atividades
- 1.8 Preparação das embalagens e transporte de material radioativo
- 1.9 Preparação de local para a embalagem de material a ser transportado
- 1.10 Aspectos legais do descomissionamento (taxas, seguros, etc)
- 1.11 Certificação da existência de recursos para o descomissionamento
- 1.12 Serviços de consultoria

### **12.2.2 Desativação da planta**

Consiste nas atividades de desativação e descontaminação radioativa dos sistemas da usina para colocá-la numa situação segura de desligamento permanente. As atividades podem incluir descontaminação de algum sistema e algum

desmantelamento inicial. A duração desta etapa é variável, pois depende das condições para sua realização, mas sem maiores imprevistos pode ser realizada em 8 meses. As principais atividades são:

- 2.1 Preparação da planta para desligamento e segurança
- 2.2 Remoção do combustível do reator
- 2.3 Remoção, embalagem e transporte do combustível armazenado na piscina
- 2.4 Drenagem do circuito primário
- 2.5 Remoção, embalagem e transporte das resinas trocadoras de íons
- 2.6 Desligamento dos sistemas da usina
- 2.7 Descontaminação química
- 2.8 Descontaminação dos componentes principais do NSSS
- 2.9 Drenagem e descontaminação da piscina de combustível irradiado
- 2.10 Instalação de sistemas monitoração, segurança e vigilância
- 2.11 Drenagem e desenergização dos sistemas contaminados
- 2.12 Embalagem, transporte e armazenamento dos internos do RPV
- 2.13 Monitoramento ambiental
- 2.14 Remoção da água e de outros fluidos operacionais
- 2.15 Tratamento da água
- 2.16 Caracterização do estado da usina
- 2.17 Ferramentas e equipamentos de pequeno porte
- 2.18 Serviços de lavanderia
- 2.19 Serviços de consultoria
- 2.20 Serviços de energia

### **12.2.3 Operação segura da planta desativada**

Consiste nas atividades de monitoramento da usina, colocada em situação segura, até ter início o processo de desmantelamento final. Monitoramento e estocagem do combustível irradiado devem ser colocados separadamente deste item. Neste PPD estima-se que esta etapa tenha uma duração de 58 anos: 7 anos de operação segura de Angra 3 e até 58 anos de operação segura de Angra 1. Os principais itens de preocupação nesta etapa são:

- 3.1 Pessoal de apoio à
- 3.2 Monitoramento ambiental
- 3.3 Seguro Nuclear e taxas
- 3.4 Custos regulatórios

3.5 Custos de consumo de energia

3.6 Segurança física

3.7 Custos de manutenção

#### **12.2.4 Desmantelamento e descontaminação**

Consiste nas atividades de descontaminação radiológica e desmantelamento dos sistemas e estruturas da usina para encerramento definitivo das responsabilidades. Demolição de estruturas não contaminadas deve ser incluída separadamente. Sem imprevistos, esta etapa pode ser realizada em 24 meses. As principais atividades e itens de preocupação são:

- 4.1 Remoção do vaso de pressão
- 4.2 Embalagem, transporte e armazenamento do vaso de pressão
- 4.3 Remoção dos principais componentes do circuito primário
- 4.4 Embalagem, transporte e armazenamento dos componentes do circuito primário
- 4.5 Remoção, embalagem e transporte das tubulações de grande porte
- 4.6 Remoção, embalagem e transporte das tubulações de pequeno porte
- 4.7 Descontaminação dos prédios do reator e auxiliar
- 4.8 Remoção dos sistemas contaminados
- 4.9 Remoção dos racks da piscina de combustível irradiado
- 4.10 Remoção das blindagens biológicas
- 4.11 Remoção dos isolamentos térmicos do primário
- 4.12 Remoção, embalagem, monitoração e transporte de material ativado dos prédios
- 4.13 Monitoramento ambiental
- 4.14 Inspeção e caracterização do estado da usina
- 4.15 Pessoal de descomissionamento e de apoio
- 4.16 Mobilização e desmobilização de equipes
- 4.17 Serviços de consultoria
- 4.18 Aluguel ou aquisição de equipamentos e ferramentas
- 4.19 Serviços de lavanderia
- 4.20 Custo regulatórios, taxas e seguros

### **12.2.5 Recuperação do terreno**

Consiste nas atividades finais relacionadas ao objetivo estabelecido como estado final do sítio após o descomissionamento. As principais atividades são:

- 5.1 Demolição dos prédios após descontaminação
- 5.2 Caracterização radiológica do terreno
- 5.3 Limpeza do solo e da água superficial ou subterrânea
- 5.4 Preparação do local para outro uso determinado
- 5.5 Aprovação final do descomissionamento pelos órgãos reguladores

### **Referências**

1. Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety Series no. 45, International Atomic Energy Agency, IAEA, 2005.
2. Estratégia de descomissionamento das usinas Angra 1, 2 e 3, Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-003-01, Universidade Federal do ABC, 2014.
3. Descomissionamento de usinas nucleoeletricas, Resolução CNEN Nº 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, 2012.
4. Critérios e metodologia para o descomissionamento, Relatório Técnico UFABC-DESCOM-EST-004-01, Universidade Federal do ABC, 2014.
5. Diretrizes básicas de proteção radiológica, Norma CNEN-NE-3.01 Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, 2014.

### 13 CARACTERIZAÇÃO FINAL DO DESCOMISSONAMENTO

O desenvolvimento de um plano para a caracterização de materiais perigosos vai fornecer informações importantes sobre o impacto desses materiais, no tratamento, acondicionamento, embalagem, armazenamento e disposição final. Isso inclui procedimentos, processos e sistemas a serem utilizados para o manuseio, tratamento, acondicionamento, armazenamento e a eliminação de rejeitos radioativos deverão ser definidos. Contudo, estas definições dependem de os rejeitos radioativos oriundos do descomissionamento puderem (ou não) ser removidos da CNAAA para um depósito final.

Antes desta remoção final, os rejeitos radioativos devem ser armazenados temporariamente na CNAAA. As quantidades de rejeitos, a duração prevista de armazenamento, a localização das áreas de armazenagem, os níveis de radiação, os pontos de acesso e a forma do controle da segurança que será mantido deverão ser definidos conforme as condicionantes existentes na época.

Nesta seção apresenta-se a caracterização final do sítio, em termos de volumes de rejeitos radioativos existentes na CNAAA no final do descomissionamento. Apresentam-se também os critérios para a conclusão das atividades, a estratégia de gestão dos rejeitos radioativos e para a liberação do sítio.

#### 13.1 Descomissionamento e critérios de conclusão das atividades

O estado final do sítio da CNAAA após o descomissionamento, definido na seção 3.4.1 deste plano preliminar, é *brownfield*, pois considera a possível utilização do sítio para instalação de novos empreendimentos de geração nucleoeletrônica, instalação radioativa ou industrial no futuro. A conclusão das atividades de descomissionamento deve ocorrer quando os requisitos de estado *brownfield* para o site forem atingidos.

O objetivo deste PPD para a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto é atingir este estado final de forma segura para os trabalhadores envolvidos, o público e o meio ambiente, atendendo aos requisitos normativos. Busca-se realizar o fechamento do ciclo de vida da CNAAA na forma ambientalmente sustentável: os rejeitos radioativos e combustíveis irradiados são depositados adequadamente sem impactar as gerações

futuras; e o sítio da CNAAA é recuperado para novos usos para a sociedade. Para atingir esses objetivos o PPD foi desenvolvido conforme a Resolução CNEN No. 133 [1].

A gestão dos rejeitos é fundamental para atingir esses objetivos [2]. O grupo de gestão de rejeitos da Proteção Radiológica será responsável por garantir que os requisitos e procedimentos desenvolvidos para o manuseio, tratamento, acondicionamento, armazenamento e transporte dos resíduos gerados sejam cumpridos. Este grupo irá garantir que os critérios de aceitação dos rejeitos sejam satisfeitos, em particular, antes do envio para o local de disposição final. Eles podem ser responsáveis pela redução de volume, se uma instalação de redução de resíduos centralizada for estabelecida, e no desenvolvimento de um programa de minimização de resíduos [2].

Esse grupo, em conjunto com a segurança industrial, vai caracterizar os rejeitos e identificar os vários fluxos de resíduos (waste streams), incluindo a verificação e cumprimento dos critérios de isenção. O grupo irá providenciar transporte e eliminação dos resíduos e preparar toda a documentação necessária.

### **13.2 Descrição das etapas mais importantes do descomissionamento**

As principais etapas do descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto são:

- E1 - Planejamento e preparação
- E2 - Desativação da planta
- E3 - Operação segura da planta desativada
- E4 - Desmantelamento e descontaminação
- E5 - Recuperação do terreno

As etapas E1 a E3 ocorrem dentro do período denominado de transição. Neste período tem início, com o encerramento das atividades de operação comercial da usina a ser descomissionada e inclui a remoção do combustível irradiado do núcleo do reator até a Unidade UFC. A primeira usina a ser descomissionadas deve ser Angra 1

e depois Angra 2 e Angra 3. Enquanto estiver em operação comercial uma das usinas nucleares do sítio da CNAAA, as outras já desativadas permanecem na etapa E3 (operação segura da planta desativada).

Após todas as usinas estarem desativadas inicia-se, conforme a estratégia definida na seção 3, as etapas E4 e E5 de desmantelamento e descontaminação e recuperação do terreno, respectivamente.

### **13.3 Descrição dos equipamentos, sistemas e estruturas que serão removidos**

Em princípio todos os equipamentos, sistemas e estruturas atualmente presentes no sítio serão removidos se estiverem disponíveis os depósitos finais apropriados, fora da área do sítio, para receber os rejeitos radioativos gerados durante a operação comercial e durante as atividades de descomissionamento da CNAAA.

Contudo, caso não estejam disponíveis tais depósitos, o UFC, os depósitos do CGR, DIGV e outras estruturas de depósitos de rejeitos que venham ser construídas na CNAAA devem permanecer no local para atender a demanda.

### **13.4 Estimativa dos volumes de rejeitos**

O volume total de rejeitos radioativos gerados durante a operação comercial das usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 é de 5848 m<sup>3</sup>, conforme apresentado na seção 6. O volume de rejeitos radioativos gerados durante as atividades de descomissionamento da CNAAA é de aproximadamente 30000 m<sup>3</sup>, conforme a seção 6. A quantidade de combustíveis irradiados provenientes das Usinas Angra 1 e Angra 2 até outubro de 2014 é de de 1450 elementos combustíveis.

### **13.5 Estratégia de gestão de rejeitos**

A estratégia de gestão de rejeitos inclui aspectos como a possível reutilização e minimização de resíduos, através do uso de redução de geração e técnicas de redução de volume. As técnicas que podem ser empregadas incluem, entre outros, descontaminação, redução de tamanho, otimização de processos e redução de volume, por exemplo, a evaporação dos líquidos ou compactação dos sólidos, incineração. Os métodos de gestão de resíduos radioativos oriundos do desmantelamento, em geral, são semelhantes aos usados na indústria nuclear durante a operação e manutenção das instalações. No entanto, os volumes e



a caracterização dos fluxos de resíduos podem exigir algumas modificações nos métodos utilizados. Rejeitos oriundos de áreas restritas devem ser eliminados ou estocados em aterros ou métodos similares. Os meios de demonstrar que os critérios de liberação são atendidos deverão ser especificados e documentados. Alguns rejeitos deverão ser liberados para uso irrestrito. Para tal deve ocorrer monitoramento e análises específicas para medir e registrar atividades muito baixas.

### **13.6 Liberação do sítio**

A liberação total do sítio da CNAAA deve ocorrer quando todas as estruturas, sistemas e equipamentos forem removidos e o terreno for recuperado para o estado *browfield*, isto é, um terreno apropriado para a instalação de outros empreendimentos como de geração nucleoeleétrica, instalação radioativa ou industrial.

Caso os depósitos de rejeitos radioativos e de combustível irradiado não forem removidos devido à inexistência de depósitos finais apropriados fora do sítio, a liberação do sítio deve ser parcial e condicionada a presença desses materiais radioativos. Contudo, esta situação não impede o aproveitamento do terreno para outros empreendimentos, apenas impõe procedimentos de segurança adequados à presença dos depósitos existentes no sítio.

### **Referências**

1. Descomissionamento de usinas nucleoeletricas, Resolução CNEN No. 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012
2. IAEA, Technical Reports Series No. 399, Organization and Management for Decommissioning of Large Nuclear Facilities, 2001.