INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DESCOMISSIONAMENTO DE UMA USINA DE PRODUÇÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

IVAN SANTOS

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador: Dr. Alcídio Abrão

SÃO PAULO
2008

DESCOMISSIONAMENTO DE UMA USINA DE PRODUÇÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

IVAN SANTOS

RESUMO

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é uma Instituição de Pesquisas e Desenvolvimento que está localizada dentro de uma área densamente povoada, na cidade de São Paulo. O ciclo do combustível nuclear foi desenvolvido desde o *yellow cake* até o enriquecimento dentro do IPEN. Após esta etapa, toda técnica foi repassada à iniciativa privada e à Marinha do Brasil (CTM/SP). Algumas usinas do ciclo do combustível estavam em nível semi-industrial, com produção de mais de 20 $kg.h^{-1}$. Como Instituto de Pesquisa, o IPEN cumpriu sua função no ciclo de combustível, que é desenvolver e repassar a tecnologia**.** Com a necessidade de se encontrar um lugar para implantar novos projetos, o espaço físico escolhido foi no local onde se achava a Usina de Produção de Hexafloreto de Urânio (UF_6), que estava inativa há alguns anos e apresentava riscos de vazamento em potencial, o que poderia ocasionar agressão ao meio ambiente e riscos de acidentes graves. O descomissionamento desta usina exigiu um cuidadoso planejamento por ser um trabalho nunca realizado no Brasil, numa unidade desse tipo com riscos eminentes, visto que envolvia o gás fluoridetro (HF) e ácido fluorídrico, solução altamente corrosiva. Fizeram-se avaliações criteriosas e desenvolveram-se equipamentos especiais, com o intuito de evitar vazamentos e riscos de acidente. No trabalho de descomissionamento, foram obedecidas as normas da CNEN em todas as operações realizadas. Foi calculado o impacto ambiental, que se mostrou desprezível sendo que as doses de radiação, após o término do trabalho, estavam dentro dos limites de público, podendo a área ser liberada para nova utilização. O tipo de descomissionamento realizado foi de remoção completa, retirando-se todos os materiais e equipamentos. Todos os rejeitos foram tratados e/ou armazenados em instalações adequadas.

URANIUM HEXAFLUORIDE PRODUCTION PLANT DECOMMISSIONING

IVAN SANTOS

ABSTRACT

The Institute of Energetic and Nuclear Research – IPEN is a research and development institution, located in a densely populated area, in the city of São Paulo. The nuclear fuel cycle was developed from the Yellow Cake to the enrichment and reconversion at IPEN. After this phase, all the technology was transfered to private enterprises and to the Brazilian Navy (CTM/SP). Some plants of the fuel cycle were at semi-industrial level, with a production over 20 kg/h. As a research institute, IPEN accomplished its function of the fuel cycle, developing and transfering technology. With the necessity of space for the implementation of new projects, the uranium hexafluoride (UF_6) production plant was chosen, since it had been idle for many years and presented potential leaking risks, which could cause environmental aggression and serious accidents. This plant decommission required accurate planning, as this work had not been carried out in Brazil before, for this type of facility, and there were major risks involving gaseous hydrogen fluoride aqueous solution of hydrofluoric acid (HF) both highly corrosive. Evaluations were performed and special equipment was developed, aiming to prevent leaking and avoid accidents. During the decommissioning work, the CNEN safety standards were obeyed for the whole operation. The environmental impact was calculated, showing to be not relevant.The radiation doses, after the work, were within the limits for the public and the area was released for new projects.

SUMÁRIO

RESUMO **I**

ABSTRACT **II**

1 - INTRODUÇÃO **1**

2 - OBJETIVOS **6**

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **7**

3.1 - Considerações Sobre o Urânio e Energia **7**

3.2 - Cronologia dos Principais Eventos Relacionados com o Setor de Prospecção, Pesquisas, Lavra e Purificação de Urânio no Brasil **19**

3.3 - Distribuição das Reservas de Urânio no Brasil **27**

3.3.1 - *Processo de Beneficiamento do Urânio e a Produção de Combustível Nuclear* **27**

3.4 - O Programa Nuclear e os Atuais Níveis de Demanda Energética do Brasil **30**

3.5 - As Usinas Nucleares Brasileiras **33**

3.6 - Usinas Nucleares e o Meio Ambiente **38**

3.7 - Enriquecimento de Urânio no Brasil **39**

3.8 - O Ciclo do Combustível Nuclear **43**

3.9 - Histórico da Fundação do IPEN **45**

3.10 - O Ciclo do Combustível no IPEN **49**

3.11 - Considerações Sobre o Hexafluoreto de Urânio-UF_6 **59**

3.11.1 - Propriedade Química, Física e Termodinâmica do UF_6 **60**

3.11.2 - -. *Geração de Flúor Elementar* **62**

3.11.3 - *Segurança e Cuidados Especiais* **64**

4 - METODOLOGIA **69**

4.1 - Recomendações e Normas de Descomissionamento Aplicáveis às Instalações do Ciclo do Combustível Nuclear **73**

4.2 - Alimentação de Freon **74**

4.3 - Unidade de Transferência de UF_6 **75**

4.4 - Unidade de Produção de UF_6 **76**

4.5 - Unidade de Geração de Flúor **83**

4.6 - Descrição da Utilização do Conjunto, Flange Cega com Junta de Teflon, mais Coluna de Lavagem **84**

4.7 - Avaliações e Considerações Diversas **84**

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO **86**

5.1 - Cursos de Treinamentos e Exames Médicos aos Funcionários da Empresa Contratada **90**

5.2 - Desmontagem da Usina de UF_6 **90**

5.3 - Desmontagem da unidade de Geração de Flúor **98**

5.4 - Desmontagem da Unidade de Freon **99**

5.5 - Aplicação de Salvaguardas **101**

5.6 - Aplicação de Proteção Física e Inventário Físico **102**

5.7 - Procedimentos de Proteção Radiológica **103**

5.8 - Análise e Cálculo Financeiro do Processo de Descomissionamento da usina de UF_6 **105**

5.9 - Avaliação do Impacto Ambiental **109**

5.9.1 - Monitoração dos Efluentes Radioativos Líquidos na Fase Operacional do PROCON e Avaliação do Impacto Ambiental Decorrente **109**

5.9.2 - Monitoração do Rio Pinheiros na Fase Operacional do PROCON e Avaliação do Impacto Ambiental Decorrente **112**

5.9.3 - Monitoração dos Efluentes Radioativos Líquidos na Fase do Descomissionamento da Usina de UF_6 **115**

5.9.4 - Qualidade da Água Subterrânea do IPEN relativa à Fase Operacional do PROCON **117**

5.9.5 - Programa de Monitoração Ambiental nos Poços Durante o Descomissionamento **120**

5.10 - Segurança Ocupacional **123**

5.11 - Logística dos Produtos e Equipamentos **124**

5.12 - Tratamento dos Rejeitos Gerados **125**

5.13 - Planejamento, Procedimento e Liberação dos Rejeitos 125
5.14 - Armazenamento dos Equipamentos 125
6 - CONCLUSÕES 128
ANEXO I - PROJETO DE USINA DE PURIFICAÇÃO DE URÂNIO POR RESINA TROCA-IÔNICA CATIÔNICA FORTE(Ia,Ib e Ic) 129
ANEXO II - USINA DE UF_4 FLUXOGRAMA DE PROCESSO 130
ANEXO III - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DA USINA DE UF_6 131
ANEXO IV - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE CAPTURA E ENVASE USINA UF_6 132
ANEXO V - FLUXOGRAMA DE PROCESSO PURIFICAÇÃO DO FLÚOR E TRATAMENTO DE GASES 133
ANEXO VI - GERAÇÃO DE FLÚOR FLUXOGRAMA DE PROCESSO 134
ANEXO VII - FREON SISTEMA DE FRIO E CIRCUITO DE R113 FLUXOGRAMA DE PROCESSO 135
ANEXO VIII - SISTEMA AQUÁTICO SOB INFLUÊNCIA DO IPEN RIO PINHEIROS 136
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 137

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Classificação das reservas de urânio e os conceitos utilizados 8

FIGURA 2 - Classificação dos recursos de urânio 9

FIGURA 3 - Recursos conhecidos de Urânio 10

FIGURA 4 - Reservas de urânio no Brasil 11

FIGURA 5 Países com maiores reservas de urânio no Mundo 11

FIGURA 6 - Recursos adcionais estimados de urânio no Brasil 12

FIGURA 7 - Paises com maior nível de energia elétrica de origem nuclear no Mundo 13

FIGURA 8 - Participação da geração nuclear na geração total de energia elétrica 14

FIGURA 9 - Participação e oferta de energia nuclear no Mundo 15

FIGURA 10.-.Evolução da participação das fontes de energia no Brasil de 1970 a 2006 16

FIGURA 11 - Balanço energético nacional 18

FIGURA 12 - Ciclo do combustível nuclear 43

FIGURA 13 - Ciclo do combustível aberto 44

FIGURA 14 - Ciclo do combustível fechado 45

FIGURA 15 - Os Drs. Alcídio Abrão e Fausto W. Lima 50

FIGURA 16 - Queima de DUS primeira usina IPEN-Ex-IEA 53

FIGURA 17 - Colunas de Alimentação, primeira usina IPEN-Ex-IEA 54

FIGURA 18 - Elementos combustíveis fabricados no IPEN-Ex-IEA 54

FIGURA 19 - Usina para purificação de urânio 55

FIGURA 20 - Usina para produção de tetra fluoreto de Urânio (UF_4) 56

FIGURA 21 - Usina de produção de nitrato de uranilo 57

FIGURA 22 - Fluxograma das Instalações do PROCON no IPEN 58

FIGURA 23 - Diagrama de fases para UF_6 60

FIGURA 24 - Vista externa da usina de produção de UF_6 64

FIGURA 25 - Cristalizadores primários da usina de UF_6 65

FIGURA 26 - Cristalizadores secundários da usina de UF_6 65

FIGURA 27 - Colunas de lavagem da usina de UF_6 66

FIGURA 28 - Unidade de geração de flúor 66

FIGURA 29 - Unidade de alimentação de freon 67

FIGURA 30 - Coluna de lavagem de flúor 68

FIGURA 31 - Organograma do descomissionamento da usina de UF_6 69

FIGURA 32- Fluxograma da planta da usina de produção de UF_6 72

FIGURA 33 - Tanque 48 Y para armazenar UF_6 75

FIGURA 34 - Reator de chama da usina de UF_6 78

FIGURA 35 - Reator de pratos da usina de UF_6 79

FIGURA 36 - Colunas de lavagem da usina de UF_6 80

FIGURA 37 - Cristalizadores primários com etiqueta de identificação 80

FIGURA 38 - Coletores de cinzas com etiquetas de identificação 82

FIGURA 39 - Modelo de etiquetas de Identificaçõao 88

FIGURA 40 - Macacão tychem 89

FIGURA 41 - Estação filtrante ar comprimido 89

FIGURA 42 - Máscara facial inteira 89

FIGURA 43 - Cinto paraquedista 89

FIGURA 44 - Óculos AVL policarbonato 89

FIGURA 45- Máscara com filtro 90

FIGURA 46 - Capacete vermelho 90

FIGURA 47 - Luva de raspa 90

FIGURA 48 - Luva de PVC 90

FIGURA 49 - Usina de UF_6 aparece com a retirada da proteção lateral 91

FIGURA 50 - Usina UF_6 durante desmantelamento 92

FIGURA 51 - Operador da Eletrotal isolando conexões do cristalizador 93

FIGURA 52 - Válvula com defeito em cristalizador 94

FIGURA 53 - Reator de pratos 94

FIGURA 54 - Condensadores de HF 95

FIGURA 55 - Juntas de teflon 96

FIGURA 56 - Flange Cega 96

FIGURA 57 - Operação de desmantelamento 97

FIGURA 58 - Operação final de desmantelamento 97

FIGURA 59 - Célula eletrolítica geradora de fluor 98

FIGURA 60 - Unidade de freon 100

FIGURA 61 - Compressor de freon R-113 101

FIGURA 62 - Pontos de Monitoração de Ar Atmosférico ,Água de Lençol Freático e Dosimetria Termuluminescente no PMRA 120

FIGURA 63 - Levantamento radiométrico da Usina de UF_6 121

FIGURA 64 - Levantamento Radiométrico após o Descomissioanmento 122

FIGURA 65 e 66 - Uso de Epi's especiais 123

FIGURA 67 - Transporte da Coluna de Lavagem 124

FIGURA 68 - Estocagem do Cristalizador 124

FIGURA 69 - Galpão de Armazenamento de Equipamentos 126

FIGURA 70 - Local da Usina Após o Descomissionamento 127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais propriedades do UF_6 62

TABELA 2 - Composição química percentual de UF_6 62

TABELA 3 - Principais condições do UF4 usado na produção de UF_6 77

TABELA 4 - Relação de equipamentos mais importantes da Usina de UF_6 87

TABELA 5 Funcionários do IPEN envolvidos no descomissionamento da Usina de UF_6 (custo) 106

TABELA 6 - Cálculo de custos com veículos usados no Descomissionamento da Usina de UF_6 107

TABELA 7- Cálculo do custo com treinamentos realizados pelo IPEN 107

TABELA 8 - Cálculo do custo com exames realizados pelo IPEN, em funcionários da Eletrotal 108

TABETLA 9- Cálculo do custo total com descomissionamento da

Usina de UF6 108

TABELA 10- Atividades dos efluentes liquidos liberados por todas as instalações do IPEN 111

TABELA 11 - Radionuclídeos críticos por via de exposição, no sistema aquático sob
influência do IPEN,decorrentes da liberação de efluentes líquidos 114

TABELA 12- Atividades dos efluentes líquidos liberados por todas as instalações do IPEN, no período do descomissionamento da planta de UF_6 116

TABELA 13- Composição química da água subterrânea do PMRA –IPEN 118

TABELA 14 - Pontos de coleta de água subterrânea do PMRA do IPEN 119

ABREVIATURA E SIGLAS

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica

ABACC - Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares

BEN - Balanço Energético Nacional

CCGT- Ciclo Combinado de Turbina à Gás

CENA - Centro de Aplicações de Radiosótopos na Agricultura

CTA - Centro Técnico Aeroespacial

CIPC - Complexo Industrial de Poços de Caldas

CNPq - Conselho Nacional de Pesquisas

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (Ex-Companhia Pesquisas e Recursos Minerais)

CSN - Conselho de Segurança Nacional

D&D - Descomissionamento e Desmantelamento

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

DUA- Diuranato de Amônio

DRQ - Divisão de Radioquímica

DUS- Diuranato de Sódio

EPI - Equipamentos de Proteção Individual

F_2 - Flúor Elementar

GWh - Giga watt hora

HF - Ácido Fluorídrico

IEA - Instituto de Energia Atômica

IEAv - Instituto de Estudos Avançados

INB - Indústrias Nucleares Brasileiras

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IRD - Instituto de Radioproteção e Dosimetria

INEA - Instituto Nacional de Energia Atômica

MME - Ministério de Minas e Energia

MW - Mega Watts

MOX - Combustível Misto de Óxidos de Urânio e Plutônio

Nuclebrás - Empresas Nucleares Brasileiras

ONU - Organização das Nações Unidas

PMRA - Plano Monitoração Radiológica Ambiental

PROCON - Projeto Conversão

RRA - Recursos Razoavelmente Assegurados

RAE-I - Recursos Adicionais Estimados Categoria I

RAE-II - Recursos Adicionais Estimados Categoria II

RE- Recursos Especulados

SICCT - Secretaria de Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia

SEST - Serviço de Engenharia e Segurança do Trabalho

SPR - Serviço de Radioproteção

SPF - Serviço de Proteção Física

SS- Serviço de Salvaguardas

TEP – Toneladas Equivalentes de Petróleo

TNP - Tratado de Não Proliferação Nuclear

TWh - Tera watt hora

UF_4 *- Tetrafluoreto de Urânio*

UF_6 *- Hexafluoreto de Urânio*

U^0 *- Urânio Metálico*

USAM - Usina de Santo Amaro

UO_2 *- Dióxido de Urânio*

USP - Universidade de São Paulo

1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos cinqüenta anos, o Brasil teve como objetivo aumentar a participação da energia nuclear, na produção nacional de eletricidade. Tal meta envolveu o desenvolvimento contínuo de tecnologia, associada à pesquisa, envolvendo o projeto, construção e operação de instalações relativas ao ciclo do combustível nuclear. Isto incluiu também a capacitação tecnológica e industrial de modo a fornecer energia elétrica de origem nuclear, atendendo aos princípios de segurança, viabilidade econômica e compatibilidade ambiental.

No país, o planejamento em ciência e tecnologia das últimas décadas previu também a crescente utilização da tecnologia nuclear em outras áreas, como a medica e a industrial. Para tal cumprimento, as instituições de pesquisa e desenvolvimento mantiveram em operação reatores de pesquisa e instalações para produção de isótopos, bem como desenvolveram as referidas tecnologias. De modo a atingir esse propósito houve o treinamento, o desenvolvimento e a capacitação dos recursos humanos necessários para o estabelecimento e continuidade de todos estes objetivos.

O país investiu na prospecção, mineração, beneficiamento, purificação e industrialização envolvendo os minérios de urânio (U) e tório (Th). O IPEN foi pioneiro no desenvolvimento de pesquisas nesta área, contribuindo com incontáveis resultados em escala analítica, escala piloto e semi-industrial nas diferentes fases de purificação e produção dos compostos de U e Th integrantes do ciclo do combustível nuclear.

De relevante importância para este Instituto foi a construção e operação das várias unidades do ciclo do combustível nuclear. Destacam-se as usinas de purificação de urânio por troca iônica e extração por solventes, de produção de diuranato de amônio, de óxidos de urânio, de tetrafluoreto de urânio, produção de flúor elementar e de hexafluoreto de urânio e a de reconversão do hexafluoreto aos óxidos de urânio.

Na área de metalurgia nuclear citam-se os trabalhos para obtenção de dióxido de urânio apropriado para fabricação de pastilhas para elemento combustível, ligas urânio-alumínio, placas de elemento combustível, elementos combustíveis para o reator IEA-R1 produção de urânio metálico, cerâmicas e materiais especiais e várias outras atividades.

Ao longo do tempo, no IPEN foi instalada uma unidade para o retratamento de combustível nuclear. Desenvolveram-se processos para a química do urânio, tório, terras raras, zircônio, háfnio, berílio e grafita.

Em colaboração com o Ministério da Marinha, em 1987 fizeram-se os primeiros ensaios de enriquecimento isotópico de urânio pela tecnologia de centrifugação, no Centro Tecnológico da Marinha (CTM-SP), Ainda nesta parceria construiu-se, em 1988, o reator IPEN-MB-01.

Os primeiros concentrados de urânio no país foram obtidos a partir da monazita. A monazita é um fosfato de terras ítricas (1-4%), tório (3-4%), SiO_2 (1-2%), pequenas quantidades de urânio (0,02 a 0,3%) e com predominância de terras céricas (49-74%).

A primeira usina piloto do ciclo de combustível instalada no IPEN operou com um concentrado de urânio, denominado de *"yellow cake"*, proveniente do processamento das areias monazíticas onde se preparou, durante anos, diuranato de amônio (DUA) de elevada pureza. O DUA, de pureza nuclear, era então transformado em dióxido de urânio (UO_2), usado na fabricação de combustível nuclear.

O uso indireto de óxidos de urânio para a obtenção de UF_6, utilizado no enriquecimento isotópico do urânio acarreta um grande consumo de flúor elementar, o que se evita se o UF_4 for utilizado como intermediário. Também torna-se mais fácil obter urânio metálico a partir do UF_4 do que a partir dos óxidos de urânio.

A segunda unidade para a purificação de urânio foi montada com os conhecimentos adquiridos nos trabalhos realizados na unidade anterior onde se obteve um UO_2 com características apropriadas para sua conversão a tetrafluoreto de urânio (UF_4).

A unidade seguinte foi a de produção de UF_4, destinado tanto à produção, de urânio metálico como à produção de hexaflluoreto de Urânio.

A quarta Unidade piloto a ser construída foi a de Desnitração do Nitrato de Uranilo, estando assim em funcionamento uma unidade para a preparação de DUA a partir do nitrato de uranilo. Estabelecia-se, assim, uma linha alternativa na qual se obtinha o trióxido de urânio (UO_3) o qual, por redução com hidrogênio, se transformava em UO_2. Este UO_2 reagia então com ácido fluorídrico para ser transformado em UF_4.

Após o domínio da tecnologia de produção de UF_4, necessitava-se chegar ao UF_6. A produção de UF_6 é uma reação química entre o Tetrafluoreto de Urânio (UF_4) e Flúor (F_2). Como não se recomenda a importação ou o armazenamento de flúor ou mesmo seu transporte de uma instalação à outra, era necessário que se tivesse a produção deste gás no próprio local onde se geraria o UF_6. Sendo assim, na usina, além da unidade de produção de tetrafluoreto de urânio, havia a necessidade de se instalar uma planta para a produção de flúor elementar e de se dominar a tecnologia desta produção. Contando com todas as unidades necessárias ao seu funcionamento, a usina de Hexafluoreto de Urânio foi construída e operou com uma capacidade nominal de 20 $kg.h^{-1}$ de U, expresso em Hexafluoreto de Urânio.

A usina de UF_6 iniciou a operação no IPEN em 1986 e encerrou suas operações em 1992. Produziu ao longo deste tempo trinta e cinco toneladas de UF_6 de altíssima pureza, material que foi transferida para o CTM, antiga Coordenadoria de Projetos Especiais (COPESP), juntamente com toda a tecnologia e metodologia científica ora estabelecida e dominada. Cumpriu-se, assim o objetivo de adquirir conhecimentos em escala semi-industrial e acumular

material para o enriquecimento e ainda fornecer hexafluoreto de urânio para as primeiras ultra-centrífugas em operação no País.

Na década de 90 o Brasil não manteve interesse político e econômico na área nuclear, transferindo escassos recursos monetários para o setor, um reflexo do interesse mundial pela energia nuclear no período. Sem investimento e sem desenvolvimento tecnológico no segmento, as unidades piloto do ciclo do combustível nuclear implantadas no IPEN se tornaram obsoletas e pouco competitivas, sendo gradativamente paradas e descomissionadas.

Neste trabalho de doutorado, optou-se pelo descomissionamento da Usina de Produção de Hexafluoreto de Urânio. O descomissionamento desta unidade gerou estudos financeiros e exigiu planejamento rigoroso, devido aos seguintes fatores:

- A localização da usina, dentro de um Instituto de Pesquisas, que por sua vez se situa em uma Universidade, a maior do país e em área densamente povoada.

- A grande quantidade de material perigoso contido dentro desta unidade, o hexafluoreto de urânio (UF_6) e o ácido fluorídrico (HF), altamente corrosivo.

- As condições físicas da usina, parada há muitos anos e sem manutenção, que apresentava um alto risco acentuado de vazamento de UF_6/HF, para o meio ambiente.

Neste trabalho estabeleceram-se os procedimentos e soluções para planejamento, diagnóstico, desmontagem e logística dos produtos originados no processo, discutindo seus aspectos relativos a salvaguardas, proteção física, além de segurança ocupacional e ambiental tanto radiológica (urânio) como para compostos halogenados (flúor). Apresenta-se, também, o custo financeiro, fator de relevância mundial no descomissionamento de instalações nucleares e radioativas.

O descomissionamento de uma usina de produção de hexafluoreto de urânio, aqui apresentado, é pioneiro no mundo, pois se trata do primeiro caso descrito sobre uma unidade deste porte e com estas condições e características.

2 - OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivos o estabelecimento e a execução de um método para o descomissionamento e desmantelamento de uma Usina de Hexafluoreto de Urânio, parte integrante do Ciclo do Combustível Nuclear, instalada no IPEN.

Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para o descomissionamento de uma Usina de Produção de Hexafluoreto de Urânio (UF_6), obedecendo todos os procedimentos e normas, levando-se em conta a saúde e segurança dos trabalhadores, das pessoas envolvidas mais diretamente no trabalho de um modo geral e também com o meio ambiente.

Objetivos Específicos

- Elaboração de procedimentos de radioproteção, salvaguardas, proteção física, associados aos procedimentos exigíveis para compostos de flúor, sob o ponto de vista ambiental e ocupacional, estudando sua viabilidade econômica, nas diretrizes políticas e administrativas atuais.

- Dar uma contribuição ao País, com este trabalho inovador, uma vez que esta foi a primeira Unidade deste porte desenvolvida e montada no Brasil e que, por deixar de funcionar sem que se tivessem sido tomados os cuidados necessários, apresentava riscos ambientais e físicos.

- Deixar o local do descomissionamento apto à instalação de novos edifícios

3. REVISÂO BIBLIOGRÀFICA

3.1 - Considerações sobre o urânio e energia

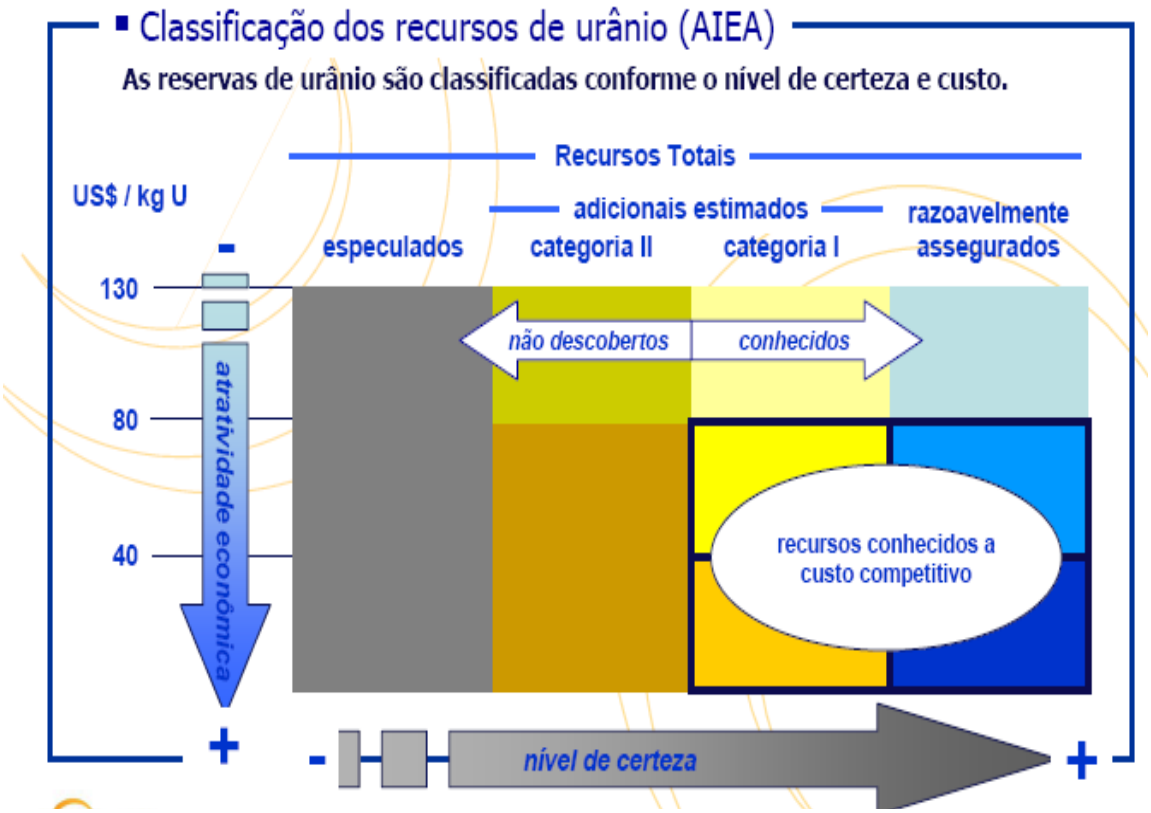
O Brasil possui a sexta maior reserva mundial de urânio, com aproximadamente 310.000 toneladas em U_3O_8. Com o reinício das prospecções o Brasil poderá chegar ao segundo ou terceiro lugar, uma vez que apenas 25 por cento do País foi feita a prospecção.

As reservas de urânio no Brasil seguem a classificação convencional de geologia, baseado no critério do “Código de Mineração Brasileiro”- medidas, indicadas e inferidas.. Ao fazer a conversão para tep (toneladas equivalentes de petróleo) supõe-se que haja perdas da ordem de 30% na mineração e beneficiamento.

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) tem uma classificação própria, que inclui o critério de custo de uma extração e beneficiamento de urânio. Na FIG. 1 apresentam-se a classificação das reservas de urânio e os conceitos utilizados. A classificação das reservas é muito importante porque define o custo do urânio extraído, os investimentos que deverão ser feitos e a viabilidade ou não da exploração. Uma classificação errada poderá levar a empresa exploradora da mina a prejuízos irrecuperáveis.

FIGURA 1 - Classificação das reservas de urânio e os conceitos utilizados

Ao ser feita a prospecção em uma mina de urânio não menos importante na avaliação é a classificação dos recursos deste metal, como mostrada na FIG.2.



Obs: limites de custo da Nuclear Energy Agency (OCDE);

incluem mineração, transporte e processamento, custos ambientais, amortização, indiretos.

- **recursos razoavelmente assegurados – RRA**
  depósitos com tamanho, teor e configuração delineados, de modo que os custos de produção com tecnologias de mineração e processamento conhecidas possam ser determinados
- **recursos adicionais estimados, categoria I – RAE-I**
  recursos em extensões de depósitos já explorados ou com continuidade geológica definida, com grau de incerteza maior que os RRA
- **recursos adicionais estimados, categoria II – RAE-II**
  recursos com evidências indiretas de existência ou esperados a partir de tendências geológicas
- **recursos especulados – RE**
  recursos que se imagina existirem a partir de evidências indiretas ou extrapolações geológicas

FIGURA 2 - Classificação dos recursos de urânio

Na FIG.3 apresentam-se os recursos conhecidos de urânio em 2003. A maioria das rochas contém urânio e, portanto, este elemento se distribui por toda a crosta terrestre.

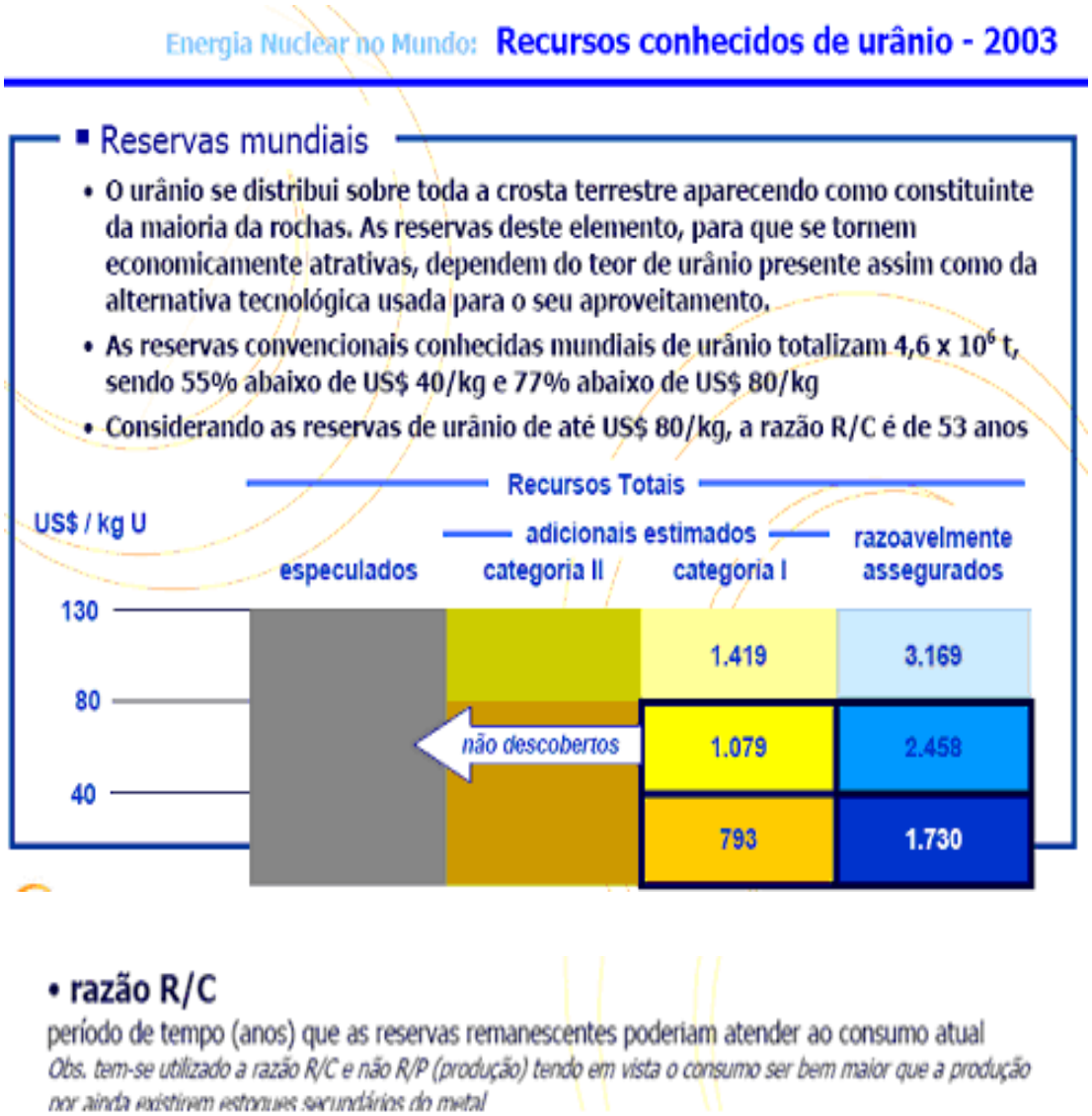


FIGURA 3 - Recursos conhecidos de urânio

No ano de 2003, o Brasil encontrava-se em sexto lugar entre os países que possuem recursos convencionais de urânio, como pode ser observado na FIG. 4

Até o momento em apenas 25% do Território Brasileiro foram feitos estudos de prospecção de minérios contendo urânio, como se apresenta na FIG.5.

- Estudos de prospecção e pesquisas geológicas foram realizadas em apenas 25% do território nacional.
- Mesmo assim, as ocorrências conhecidas de urânio no Brasil como detentor da 6ª reserva mundial, o que permite atender as necessidades domésticas a longo prazo.
- Há, ainda, ocorrências uraníferas associadas a outros minerais, como aqueles encontrados nos depósitos de Pitinga no Estado do Amazonas e área de Carajás, no Estado do Pará, com um potencial adicional estimado de 150.000 t.

	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
Depósito-Jazida	**< 40 US$/kg U**	**< 80US$/kg U**	**Sub-Total**	**< 80US$/kg U**	**< 80US$/kg U**
Caldas (MG)		500	500	4.000	4.500
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200	69.800	94.000	6.770	100.770
Itataia/Santa Quitéria (CE)	42.000	41.000	83.000	59.500	142.500
Outras				61.600	61.600
TOTAL	**66.200**	**111.300**	**177.500**	**131.870**	**309.370**

FIGURA 4 - Reservas de urânio no Brasil

- Em 2003, 7 países (Brasil é o 6º) detinham 77% dos recursos convencionais conhecidos de urânio com **custo abaixo de US$ 130/t**

País	10^3 t	Part.
Cazaquistão	957	21,0%
Austrália	910	19,8%
África do Sul	369	8,0%
Estados Unidos	355	7,7%
Canadá	332	7,2%
Brasil	309	6,7%
Namíbia	287	6,3%
Subtotal	**3.519**	**77,0%**
Demais países	1.069	23,0%
MUNDO	**4.588**	**100%**

Fonte: INB, AIEA

FIGURA 5 - Países com maiores reservas de urânio no Mundo

Na FIG. 6 apresenta-se o mapa com os recursos adicionais estimados no Brasil que, se confirmados, incluirá o país entre os que possuem as maiores reservas do Mundo.

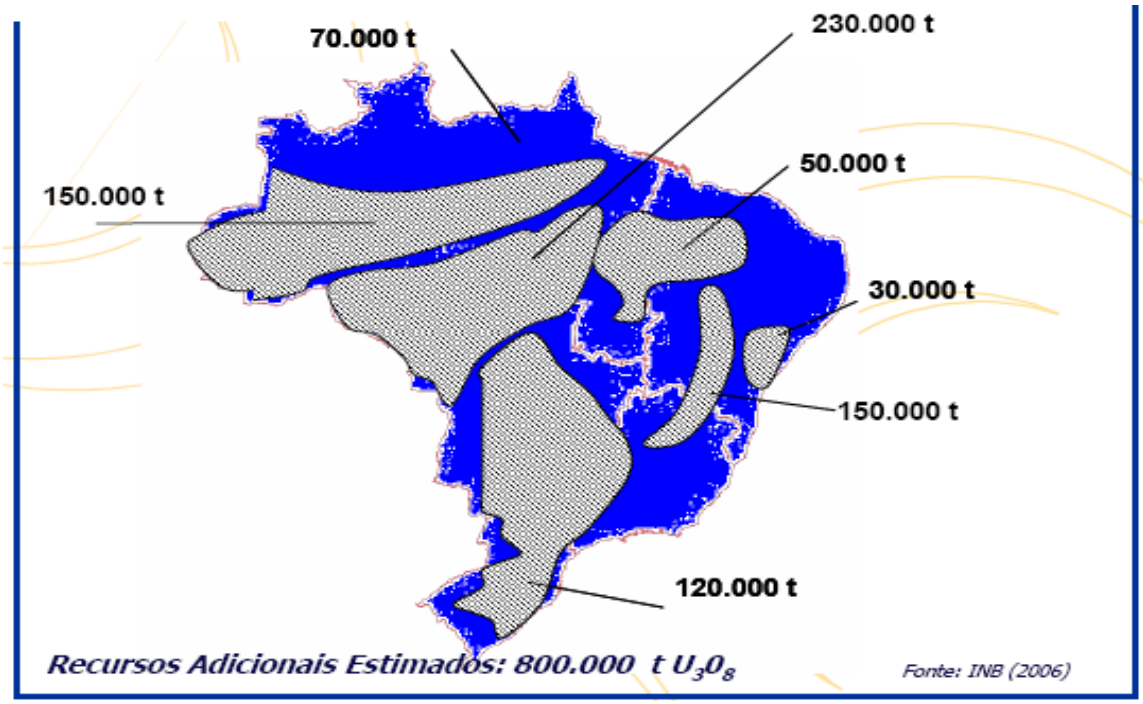
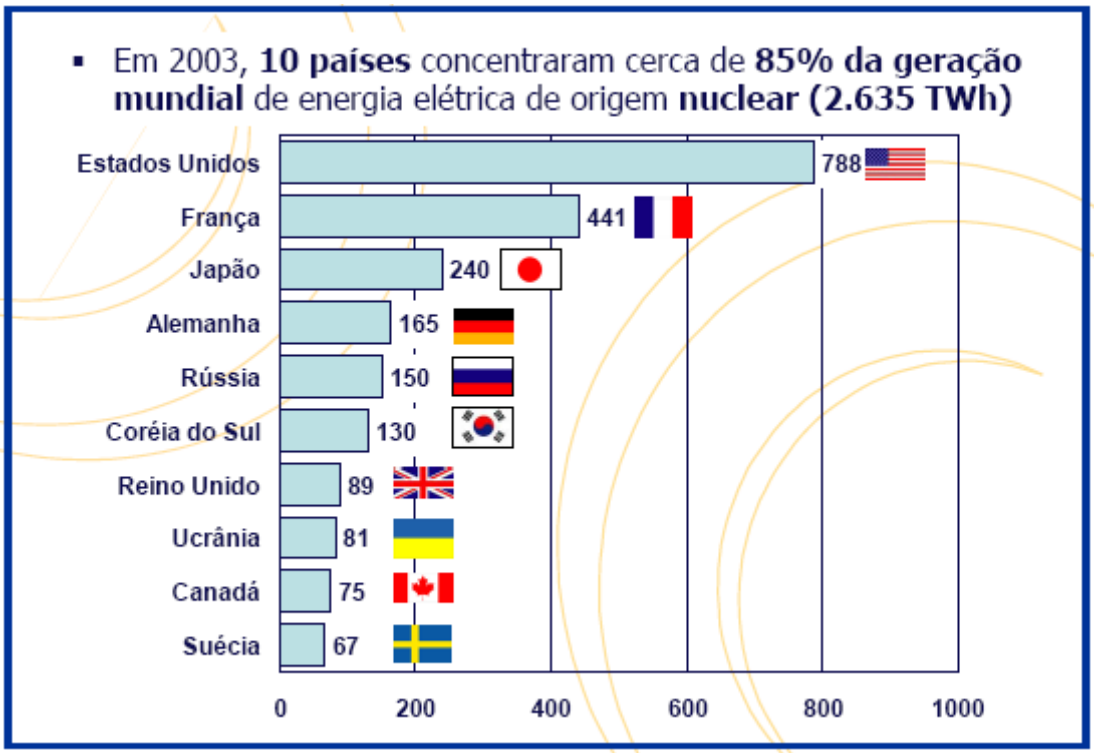


FIGURA 6 - Recursos adicionais estimados de urânio no Brasil.

Assim sendo, o Brasil possui urânio suficiente para abastecer as atuais centrais nucleares em operação, as quatro ou cinco usinas que deverão ser construídas e ainda exportá-lo. Porém, para disponibilizar-se esta quantidade de urânio, haverá a necessidade de novas pesquisas e tecnologias de extração.

Embora o urânio seja uma fonte de energia não renovável, existe no mundo uma quantidade muito grande deste metal e poderá levar muitos anos antes desta fonte ser esgotada. Existem países como o Brasil que não concluíram os estudos de prospecção deste minério. Por ser uma operação que requer muitos recursos financeiros alguns países não iniciaram ainda uma pesquisa mais profunda e abrangente e com certeza haverá novas descobertas e o quadro mundial de países com grandes reservas de urânio sofrerá uma grande mudança.

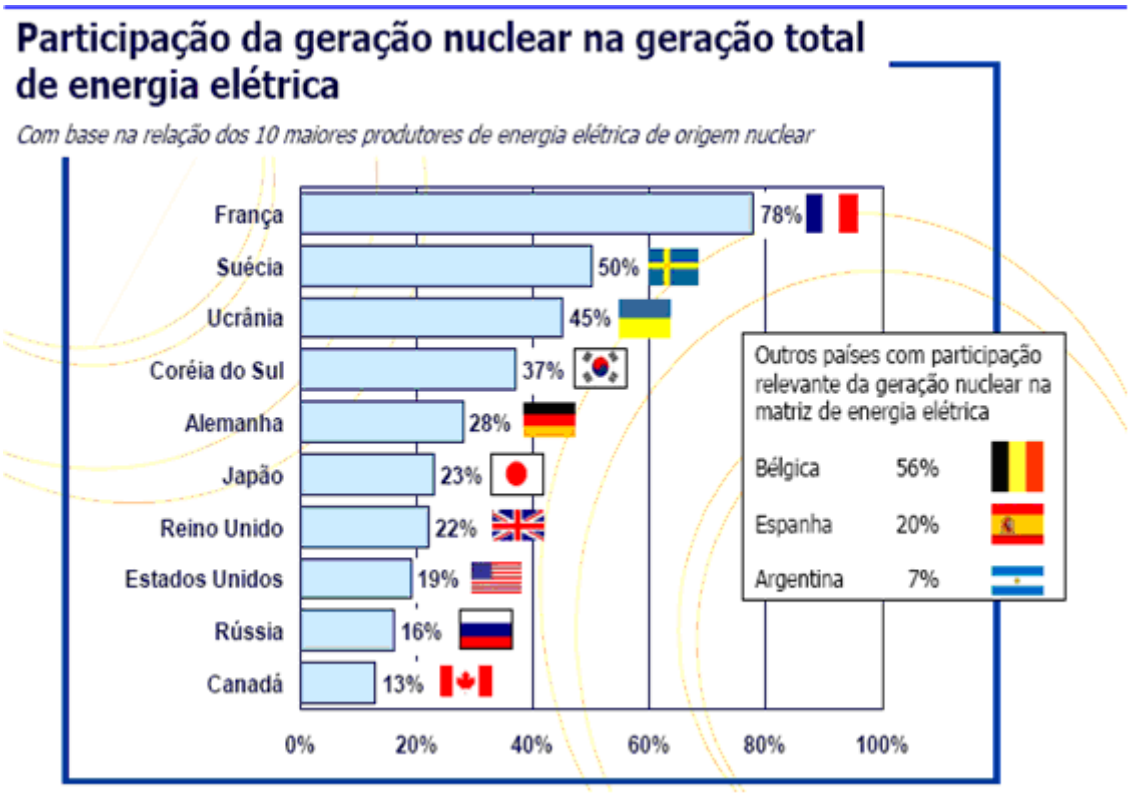
Na FIG. 7 estão relacionados os países que utilizam em maior grau a energia elétrica de origem nuclear. O Brasil não aparece entre eles.



unidade: TWh - Fonte:IEA (2005)

FIGURA 7 - Países que mais utilizam energia elétrica de origem nuclear

Com base na relação dos dez maiores produtores de energia elétrica de origem nuclear foi possível relaciona-los como apresentado na FIG 8

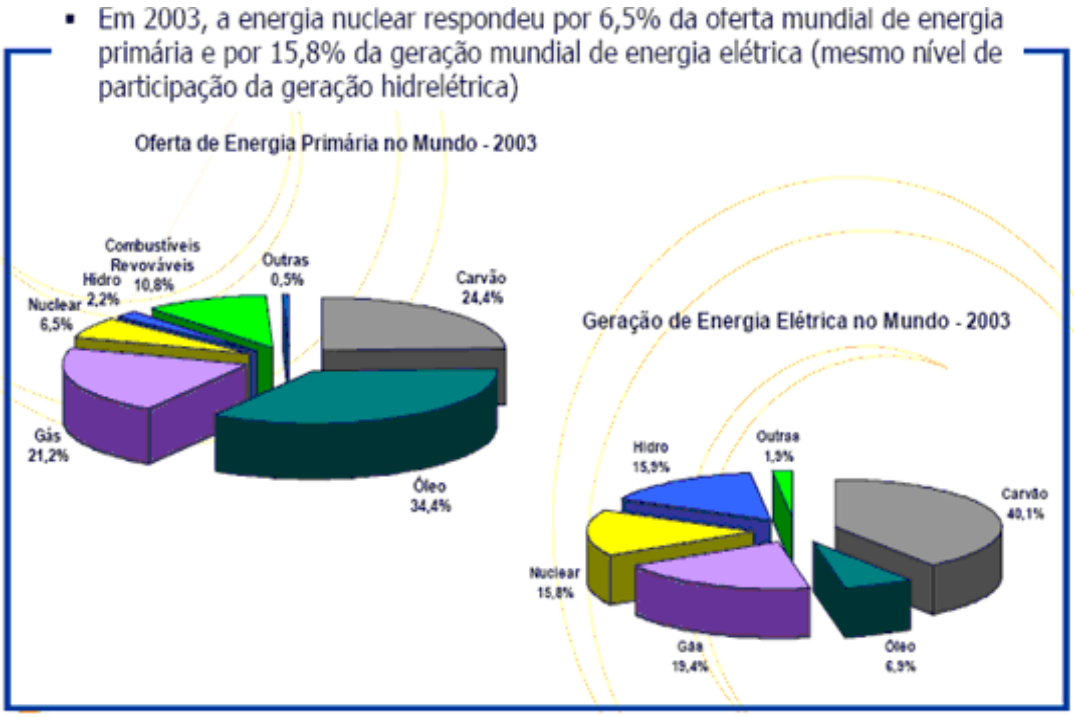


Unidade: TWh

Fonte: IEA (2005)

FIGURA 8 - Participação da geração nuclear na geração total de energia elétrica

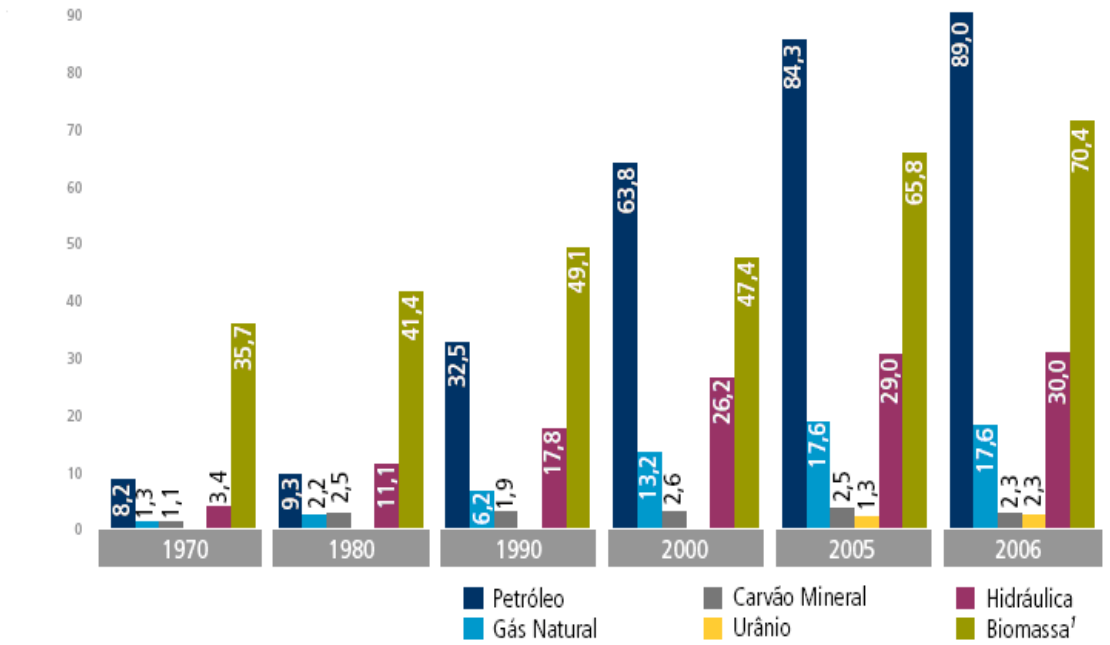
Na FIG. 9 apresentam-se os dados sobre a participação da energia nuclear na matriz energética mundial, em energia primária e em energia elétrica.



Fonte: IEA, 2004

FIGURA 9 - Participação e oferta de energia nuclear no Mundo.

Na FIG.10 apresenta-se a evolução das fontes de energia no Brasil, num período de muitas controvérsias sobre fontes alternativas de energias. É importante saber que o Brasil está desenvolvendo sua matriz energética pensando em formas alternativas de geração de energia que independam de combustíveis fósseis e não agridam o meio ambiente.



[1] Inclui lenha, lixívia, carvão vegetal, produtos da cana-de-açúcar (bagaço e álcool etílico), outros resíduos vegetais e outras fontes renováveis.

FIGURA 10 - Evolução da participação das fontes de energia do Brasil de 1970 a 2006

O Balanço Energético Nacional (BEN) foi elaborado segundo metodologia que propõe uma estrutura energética, de forma a permitir a obtenção de adequada configuração das variáveis físicas próprias do setor energético (MME, 2007). Nele, o tratamento da energia nuclear segue o fluxo do ciclo do combustível nuclear (centro de transformação) ou seja, :o urânio natural na forma de U_3O_8 (energia primária) é transformado em urânio contido no UO_2 dos elementos combustíveis (energia secundária), com as respectivas perdas de transformação.

Devido ao grande número de atividades envolvidas na transformação do urânio natural na forma U_3O_8 em urânio enriquecido contido em pastilhas de UO_2, componentes dos elementos combustíveis, o tempo deste processamento

é, em média, de 21 meses (sem levar em consideração o tempo de reciclagem de parte do urânio e do plutônio dos combustíveis já irradiados). Devido a esse fator, todo urânio que estiver em processamento no ciclo do combustível é registrado como estoque de U_3O_8. A cada ano é estornado do estoque de U_3O_8 a parcela correspondente à produção do urânio contido no UO_2 dos elementos combustíveis, acrescida de cerca de 1,5% pelas perdas de transformação.

A matriz do Balanço Energético Nacional é mostrada na FIG.11, que apresenta a síntese da metodologia, expressa o balanço das diversas etapas do processo energético, a produção, transformação e consumo no Brasil, no ano de 2006(MME,2007).

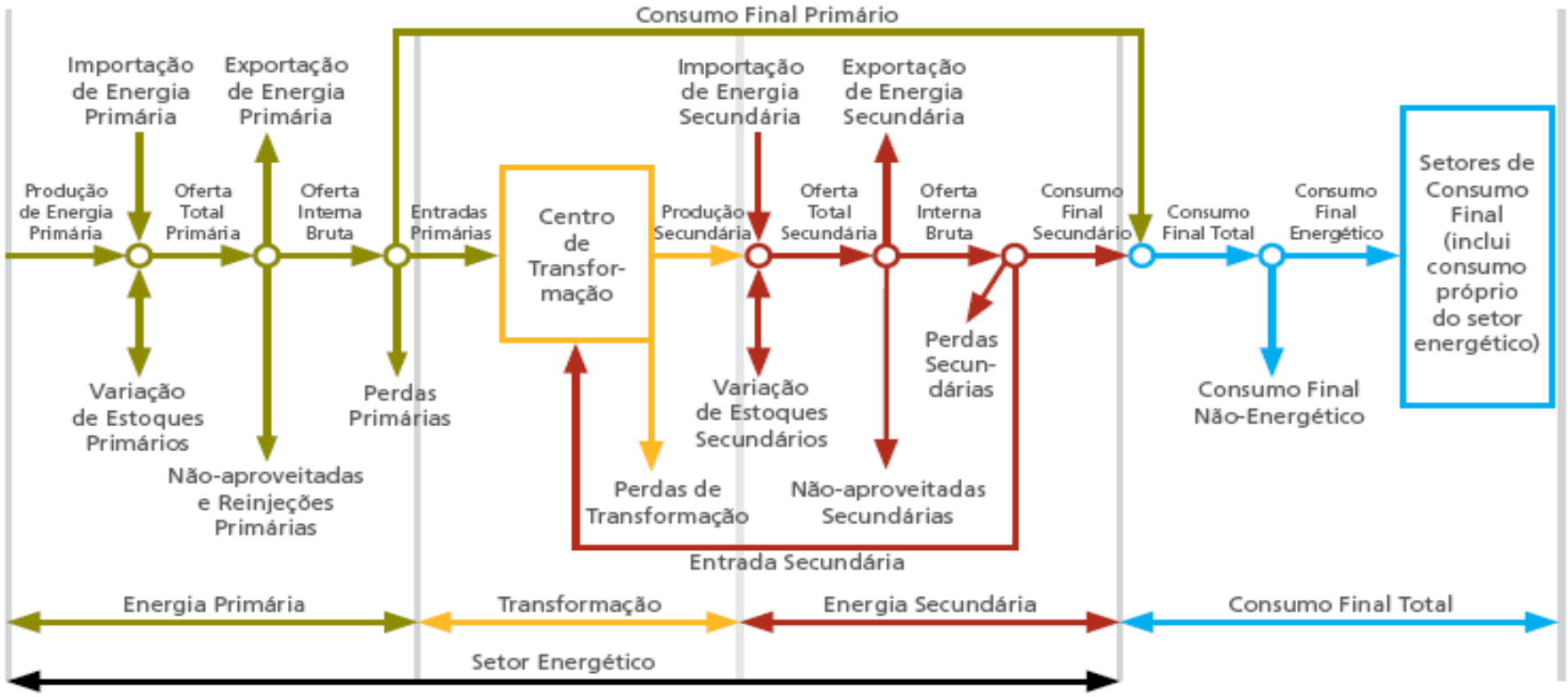


FIGURA 11 - Balanço energético nacional (MME, 2007)

3.2 - Cronologia dos principais eventos relacionados com o setor de prospecção, pesquisas, lavra e purificação de urânio no brasil

A construção de reatores de potência depende de condições específicas de cada país, da demanda por energia, associada ao crescimento econômico e populacional; da disponibilidade de outras fontes energéticas e da aceitação pública, dentre outros fatores. O último aspecto está relacionado a dois elementos cruciais que são o risco associado à operação dos reatores (segurança e possibilidade de ocorrência de acidentes) e ao gerenciamento dos rejeitos gerados. A favor da energia nuclear pode-se argumentar que esta fonte energética não contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa para atmosfera.

A demanda por minerais contendo isótopos físseis e férteis sempre esteve associada ao desenvolvimento do setor nuclear, para fins bélicos ou pacíficos.

Em 1952, o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) iniciou a primeira prospecção sistemática de minerais radioativos no Brasil. Em 1956 o processo de prospecção passou a ser feito através da recém-criada Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A partir de 1970, com uma aplicação mais substancial de recursos financeiros e com a participação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na execução, até 1974 as reservas do país somavam um total de 11.040 t de U_3O_8.

Após a criação da Nuclebrás em dezembro de 1974, os estudos da prospecção brasileira passaram a ser feitos seguindo-se as metas do Programa Nuclear Brasileiro, que foi a busca por autonomia energética. Por ocasião da chamada primeira crise do petróleo, em 1973, o Brasil destinou grandes investimentos à prospecção, pesquisa, desenvolvimento de métodos, técnicas de trabalho e lavra de jazidas de urânio no país.

Um grande número de ambientes geológicos favoráveis ao estudo detalhado foi delimitado, resultando na revelação de novas jazidas, entre elas as províncias de Itataia (CE) em 1976 e Lagoa Real (BA) em 1977, levando o Brasil a ocupar destaque na classificação mundial de reservas de urânio.

De acordo com o Balanço Energético Nacional do Ministério das Minas e Energia (MME) de 1982, as reservas de urânio brasileiras somavam cerca 301.490t em U_3O_8 (MME,2007).

Em 1988 a Nuclebrás foi transformada em Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), permanecendo até os dias atuais, englobando as funções do ciclo do combustível nuclear desde a mineração, passando pelo enriquecimento até a fabricação do combustível nuclear.

A seguir, é apresentada a cronologia dos principais eventos relacionados com o setor de prospecção, pesquisa, lavra e purificação do Urânio no Brasil.

1818 - Criação do Museu Nacional - com incumbência legal de proceder aos estudos geológicos;

1842 - Criada, dentro do Museu Nacional, a Seção de Mineralogia, Geologia e Ciências Exatas;

1843 –Dentro da Secretaria de Estado dos Negócios do Império, foi criada a Seção de Agricultura, Mineração, Colonização e Civilização dos Indígenas;

1860 - Criação da Secretaria dos Negócios da Agricultura, Comércio e Obras Públicas, com competência para exercer as atividades de mineração, excetuada a dos terrenos diamantíferos, cuja administração e inspeção continuaram a cargo do Ministério da Fazenda;

1906 - Criação do Ministério dos Negócios da Agricultura, Indústria e Comércio que sob sua responsabilidade ficavam os estudos e despachos da mineração e legislação, exploração e serviço geológico, estabelecimentos metalúrgicos e escolares de minas;

1907 - Criação do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, vinculado ao Ministério da Indústria, Viação e Obras Públicas;

1933 - Criação da Diretoria-Geral de Pesquisas Científicas, vinculada ao Ministério da Agricultura e subordinada ao Serviço Geológico e Mineralógico;

1933 - Criação do Instituto Geológico e Mineralógico do Brasil, que veio em substituição ao Serviço Geológico e Mineralógico;

1933 - Criação da Diretoria-Geral de Produção Mineral, vinculada ao Ministério da Agricultura;

1934 - Criação do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), através do Decreto 23.979, de 08/03/34, sendo extinta a Diretoria-Geral de Pesquisas Científicas;

1946 - Criada a Comissão de Energia Atômica da Organização das Nações Unidas (ONU), na qual os Estados Unidos propõem a internacionalização das reservas de minerais radioativos, sob o controle da ONU, para ``corrigir as injustiças da natureza´´ (Plano Baruch).

1947 - O Alm. Álvaro Alberto, representante Brasileiro na *Commission Economique de I' ONU pour I' Afrique* (CEA/ONU), propõe a internacionalização das reservas de petróleo e carvão, destruindo os argumentos relativos à correção de injustiças da natureza.

1948 - Assinatura do Ajuste Atômico entre o Brasil e os Estados Unidos. O ajuste estabelecia que haveria a participação dos Estados Unidos na prospecção de minerais radioativos no Brasil, submetia as investigações a um grupo misto de trabalho, e comprometia-se a somente divulgar os resultados com autorização dos Estados Unidos.

1948 – Encerram-se as negociações na CEA/ONU, com a conclusão de que não era viável o monopólio nuclear sob a égide da ONU, aceitando as reivindicações

Brasileiras relativas à propriedade nacional das reservas de minerais radioativos e ao acesso a Tecnologia Nuclear. Continuam, embora envolvidas em polêmicas, as exportações de monazita.

1949 - Início de operações das Indústrias Químicas Reunidas S/A, (Orquima) para purificação de urânio e tório a partir das areias pesadas (associação de monazita, zirconita, rutilo e outros minerais) existentes na costa brasileira. Posteriormente foi denominada Usina Santo Amaro (USAM), tornando-se mais tarde uma subsidiária das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB). Cabe salientar, que as instalações da Orquima não foram formalmente licenciadas, pois iniciaram suas operações antes da implantação do órgão licenciador-fiscalizador (CNEN, em 1956).

1951 - Foi sancionada a Lei 1.310, que criou o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) estabeleceu o monopólio estatal do comércio externo de minérios atômicos e proibiu a exportação de Urânio e Tório, salvo autorização expressa do governo. Note-se que na ocasião não se conhecia em território nacional, nenhuma ocorrência de minérios de urânio. Criado o CNPq, este estabeleceu, em resolução, compensações específicas a serem exigidas na negociação de um novo acordo de exportação de minerais radioativos.

1952 - O Brasil assinou novo acordo atômico com os Estados Unidos, sem a exigência de compensações específicas, as quais diziam respeito ao acesso à tecnologia nuclear. Foi criada a Comissão de Exportação de Materiais Estratégicos (CEME), vinculada ao Itamaraty, retirando do CNPq o poder decisório sobre exportações.

1952 - Início da prospecção sistemática de minérios radioativos, Urânio e Tório, no Brasil pelo CNPq.

1953 - Pela Exposição de Motivos de nº 32 do CNPq, o Alm. Álvaro Alberto propôs a definição de uma política nacional de energia nuclear. Pela proposta, previa-se a produção de Urânio no Brasil (ainda não havia estudo de prospecção no território nacional), o enriquecimento isotópico do urânio, a construção de

reatores, a produção de energia a partir do nuclear; busca do apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico brasileiro em países como a Itália, Inglaterra, Alemanha, Suíça, Holanda, Canadá, Índia e Japão, além de os Estados Unidos, e a Escandinávia formada pelos Países: Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca e pelas ilhas da Islândia.

1953 - O então Presidente Getúlio Vargas determinou ao Conselho de Segurança Nacional (CSN) que estudasse uma política sob o ponto de vista da segurança nacional. O CSN, pela Exposição de Motivos 772, deu apoio total à proposta do CNPq.

1953 - O Presidente Vargas aprovou, então, uma política nuclear independente, com ``compensações específicas ao campo do progresso atômico, visando a produção nuclear para fins pacíficos, com recurso a todos os países amigos visando um progresso mais rápido.

1953 - O Alm. Álvaro Alberto negociou com a *Societé des Produits Chimiques de Terres Rares*, francesa, o fornecimento de uma usina para produção de Urânio nuclearmente puro, que seria produzido do minério de zircônio encontrado em Poços de Caldas, MG. Esta decisão foi revogada em 1954, pelo CNPq, do qual o Alm. Álvaro Alberto havia se demitido, já que no ano anterior, no Governo Café Filho, havia perdido a capacidade de negociar externamente e fora dado tratamento preferencial aos Estados Unidos.

1955 - Foram assinados dois acordos com os Estados Unidos: um de pesquisa conjunta, que previa que os resultados só poderiam ser divulgados com aprovação prévia dos dois governos e outro da execução de um reator de pesquisa.

1955 - Formalização do ajuste de exportação de monazita, para os Estados Unidos, em troca de trigo.

1956 - Em 10 de fevereiro foi criada a Comissão Parlamentar de Inquérito sobre as questões de energia atômica no Brasil. Os anais gerados descrevem os conflitos da época.

1956 - O Presidente Juscelino Kubitscheck decidiu:

-Adquirir a usina de produção de urânio encomendada à França;

-Enviar comissão à Alemanha para buscar as ultracentrífugas encomendadas em 1953;

-Criar a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o Fundo Nacional de Energia Nuclear;

-Denunciar o acordo com os Estados Unidos de prospecção conjunta de minérios atômicos e o contrato de exportação de tório.

1956 - O processo de prospecção de minérios radioativos passou a ser feito através da recém-criada Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

1956 - Fundação do Instituto de Energia Atômica (IEA), autarquia estadual em São Paulo, posteriormente designado de Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, gerenciado financeira e administrativamente pela CNEN.

1957 - Instalação do reator de Pesquisa IEA-R1. Início dos estudos sobre o ciclo do combustível nuclear, no antigo IEA, atual IPEN.

1957 - Foi instalada em Genebra a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

1960 - Criação do Ministério das Minas e Energia (MME), pela Lei nº 3.782. O DNPM passou a incorporar-se ao MME.

1963 - Na fase presidencialista do governo João Goulart, o Brasil fez acordo com a França para a realização de pesquisas sobre jazidas de minérios atômicos.

1969 - Criação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Este em 1994, passou a ter as funções de Serviço Geológico do Brasil, com atribuição de executar o Levantamento Geológico Básico, Aerogeofísico, Geoquímico Regional, Hidrológico Básico, Hidrogeológico Básico, além da gestão das informações de prospecção. A CPRM conduziu os trabalhos de pesquisa para a CNEN até a criação da Nuclebrás, em 1974.

1962 a 1974 - Descoberta das jazidas do Cercado e Figueira, sob responsabilidade da CNEN.

1974 - Criação da Empresas Nucleares Brasileiras (Nuclebrás), responsável pela prospecção de minerais radioativos. Ao se iniciarem os trabalhos sob a responsabilidade da Nuclebrás, as reservas totais de Urânio do Brasil eram de cerca de 15.000 t de U_3O_8, das quais apenas 5.000 medidas, localizadas em Poços de Caldas (MG)

1974 a 1978 - Descoberta das jazidas de Lagoa Real no Estado da Bahia e Itataia, no Estado do Ceara sob responsabilidade da Nuclebrás.

1975 a 1982 - A Nuclebrás elevou as reservas totais de urânio do país a 301.490 t de U_3O_8, com equipes totalmente nacionais e com estratégias de prospecção próprias. Considerando que as reservas conhecidas poderiam atender à demanda do Programa Nuclear Brasileiro da época, com a construção de 8 usinas de 1.300 MW. Considerando as imensas dificuldades sujeitas ao país, na chamada década perdida, as atividades de prospecção foram interrompidas, com a inevitável perda de quadros técnicos, conhecimentos e equipamentos.

1976 a 1977 - Descobertas de novas jazidas de Urânio, entre elas as províncias de Itataia (CE) e Lagoa Real (BA).

1979 - Reestruturação da CNEN, com a incorporação de diversos Institutos de pesquisa: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), em 1979; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em 1982. Adoção de procedimento

de segurança e proteção radiológica, mais abrangente no país. Elaboração do Plano de Proteção Radiológica Ocupacional e do Plano de Exposição Ocupacional para Instalações.

1981 - Implantação do Complexo Industrial de Poços de Caldas (CIPC) mina-usina, pela Nuclebrás.

1988 - Criação das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB). A Nuclebrás foi transformada em INB, permanecendo até a atualidade. Paralisação da prospecção de urânio no Brasil.

1988 - Início dos estudos de viabilidade econômica de exploração da mina em Lagoa Real, no Estado da Bahia pela INB.

1990 - Extinção do Ministério das Minas e Energia e criação do Ministério da Infra-Estrutura, pela Lei nº 8.028 de 12/04/90, DOU de 13/04/90. O DNPM passa a ser incorporado ao recém criado Ministério da Infra-Estrutura;

1992 - Criada a Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC). É um organismo binacional responsável por verificar o uso pacífico dos materiais nucleares que podem ser usados direta ou indiretamente na fabricação de armas de destruição em massa.

1992 - Extinção do Ministério da Infra-Estrutura e re-criação do Ministério de Minas e Energia, pela Medida Provisória 302 de 10/04/92, DOU de 13/04/92. O DNPM passou a ser incorporado ao Ministério de Minas e Energia;

1993 a 1999 - Descomissionamento da Usina Santo Amaro (USAM-INB) pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN);

1994 - Pela Lei nº 8.876 de 2 de maio, o Poder Executivo foi autorizado a instituir como Autarquia o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM);

1994 - O Decreto nº 1.324 de 2 de dezembro, institui como Autarquia o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)

1995 - A Portaria nº 42, de 22 de fevereiro, aprova o Regimento Interno do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)

1996 - Início do descomissionamento do CIPC-INB.

1999 - Retomada da prospecção e pesquisas nas províncias do Rio Cristalino (PA) e Lagoa Real (BA), pela INB.

2000 - Implantação do complexo mina-usina de Caetité (BA), pela INB.

2004-2006- Período do descomissionamento da Usina de Produção de Hexafluoreto de Urânio (UF_6).

3.3 - Distribuição das reservas de urânio no Brasil

As principais reservas de urânio brasileiras estão distribuídas em sete jazidas: Itataia (CE), Espinharas (PB), Amorinópolis (GO), Lagoa Real (BA), Quadrilátero Ferrífero (MG), Poços de Caldas (MG), FIGueira (PR). A jazida de Itataia, localizada na parte central do Estado do Ceará, embora seja a maior reserva de urânio do país (142,5 mil toneladas), a mineração está condicionada à produção de ácido fosfórico, ou seja, depende da exploração do fosfato que se encontra associado ao urânio.

Atualmente a produção brasileira está centrada na unidade da INB na província uranífera de Lagoa Real, no Estado da Bahia. Outro centro de produção possível de entrar em operação é o de Itataia no Ceará, onde o Urânio seria recuperado como um co-produto junto com o fosfato da apatita e da colofanita.

3.3.1 - Processo de Beneficiamento do Urânio e a Produção de Combustível Nuclear

O primeiro complexo mínero-industrial para a extração e beneficiamento do Urânio no Brasil foi instalado pela Nuclebrás no município de Caldas (MG), em 1982. Devido à complexa constituição do minério encontrado nessa região,

fez-se necessário o desenvolvimento de um processo específico de extração do urânio e elementos associados. Começou também a ser utilizado o processo de tratamento químico do urânio para transformação em “yellow cake”, ou seja, teve início a produção de Urânio para o desenvolvimento do ciclo do combustível nuclear. Atualmente, a extração de Urânio dessa região ficou inviável econômicamente não sendo mais explorada. As instalações de Poços de Caldas foram inicialmente utilizadas em processo químico da extração de Monazita e de minerais contendo o Urânio como subproduto, hoje se encontra em processo de descomissionamento.

A extração do concentrado de Urânio U_3O_8 (yellow cake) é feita hoje na unidade de beneficiamento das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), localizada próximo aos municípios de Caetité e Lagoa Real, no sudoeste do Estado da Bahia. A capacidade de produção é de 400 toneladas/ano de U_3O_8, e as reservas dessa região estão estimadas em 100 mil toneladas de urânio sem outros minerais associados, quantidade suficiente para suprir a demanda das usinas nucleares de Angra I e II por mais de 100 anos. Em 2001, foram enviados para o exterior, oriundos de Caetité, para serviços de conversão e enriquecimento, 86 t de diuranato de urânio (DUA), equivalentes a 73 t de U_3O_8 (INB, 2002).

Para realizar o processo de enriquecimento do U_3O_8, esse material é transformado em um gás com elevado valor energético, aumentando a concentração de U^{235}. O Brasil domina toda técnica de transformação do yellow cake até o enriquecimento, porem as instalações que poderiam realizar estas operações estão em fase final de montagem e estão localizadas no Centro Tecnológico da Marinha (CTM) em Aramar, na cidade de Iperó no Estado de São Paulo.

As etapas seguintes de produção do combustível nuclear são realizadas na unidade da INB localizada em Resende no Estado do Rio de Janeiro, a Fábrica de Combustível Nuclear (FCN). O processo de fabricação inicia a reconversão do gás em pó de dióxido de Urânio (UO_2). Segundo dados da INB, no ano de 2001 foi alcançada uma produção de 58,3 t de UO_2. O pó de dióxido

de Urânio é prensado em pastilhas para a produção do elemento combustível (conjuntos de varetas recheadas com as pastilhas de Urânio) para serem utilizadas nos reatores das usinas de Angra I e II.

Em 2001 foram produzidos 16 elementos combustíveis para a 1ª recarga de Angra II, bem como 40 elementos combustíveis para a 10ª recarga de Angra I (INB, 2002). A INB já inaugurou e, incorporou o processo de enriquecimento, de de Urânio em ultracentrífugas, (que será comentado posteriormente), em uma parceria com a Marinha do Brasil que desenvolve as centrifugas em suas instalações em Iperó /Aramar, um processo diferente do método de difusão de gás que foi usado no início dos trabalhos . As ultracentrífugas são máquinas que giram à velocidade de 70 mil rpm, e foram desenvolvidas no Brasil à partir de um projeto adquirido juntamente com o acordo Nuclear para compra das Usinas de AngraII e III, feito com a Alemanha em 1975 (anteriormente República Federal da Alemanha).

Para o funcionamento eficiente dos reatores nucleares, usados na geração de energia elétrica ou como força propulsora, o combustível deve apresentar o Urânio-235 na proporção entre 2% e 3%, enquanto que nas bombas atômicas requer-se 90%. Como o minério contém apenas 0,7%, o urânio deve passar por um processamento de elevação do teor desse isótopo, conhecido como enriquecimento de Urânio. O primeiro método utilizado em escala industrial foi o da difusão gasosa, Outro método consiste na ultracentrifugação do gás, de forma a poder coletar-se as moléculas mais leves fora da borda da centrífuga. Esse método ainda se encontrava em fase experimental em 1975 quando o presidente Geisel assinou o Acordo Brasil-Alemanha, no qual constava, além da aquisição das centrais nucleares de Angra II e III, a transferência dessa segunda tecnologia de enriquecimento desenvolvida até aquela época pela Alemanha.

3.4 -- O Programa Nuclear e os Atuais Níveis de Demanda Energética do Brasil

O “Livro Branco” do Programa Nuclear Brasileiro foi elaborado em 1977 com o objetivo de promover a construção de Reatores Nucleares para a geração de energia elétrica no Brasil a médio e longo prazo.

Este programa fazia parte da estratégia do Governo Federal de criar formas alternativas para diminuir a dependência das importações de petróleo, produto que era a base da geração de energia no Brasil. Nesse período, a partir de 1973, iniciou-se uma crise internacional, gerando grandes aumentos. Baseado nas projeções do “Plano 90”, formulado em 1974 pelas Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás). O “Livro Branco” considerou que como a expectativa de crescimento da demanda de eletricidade no Brasil seria em uma média de 8,7% a 11,4% e que o consumo dobraria a cada sete anos, haveria, então, a necessidade de uma potência energética instalada na ordem de 180 a 200 mil MW até o final do século XX.

Tendo em vista que o potencial hídrico nacional, estimado em 150 mil MW na época, estaria esgotado até o ano 2000, então o Governo Federal considerou a Energia Nuclear como a única alternativa realmente viável, alegando que naquela época as usinas nucleares já haviam alcançado um alto grau de confiabilidade técnica e competitividade de seus custos de produção frente ao quadro da economia de petróleo.

A expectativa de crescimento da demanda nacional de energia elaborada pelo Governo Federal considerava os níveis de crescimento econômico do período do “Brasil Potência”, época em que o crescimento econômico brasileiro apresentou altas taxas de crescimento anual, principalmente devido às políticas governamentais de industrialização do país feito através de financiamento externo.

Entretanto, atualmente compreende-se que as taxas de crescimento econômico no Brasil, após o ano de 1979, foram bem menores se comparadas

com a década de 1970, devido a períodos de crises e recessão econômicas que ocorreram no contexto internacional nas décadas de 80 e 90. Foi constatado também que o potencial hídrico brasileiro ultrapassou a estimativa de 150 mil MW, apresentada pelo Governo naquela época, e a de 213 mil MW, apresentado pela Eletrobrás em 1982.

O crescimento econômico ocorrido no país nas últimas décadas gerou um aumento considerável da demanda energética brasileira, porém muito abaixo das expectativas anunciadas pelo governo naquela época. Na análise do quadro de produção nacional de energia elétrica a partir da década de 70, destaca-se o crescimento das hidroelétricas como principal fonte geradora, com uma capacidade total instalada de 65.311 MW em 2002 (MME, 2006).

A produção de energia elétrica de origem nuclear não acompanhou esse aumento da demanda energética nacional das últimas décadas. A energia elétrica gerada foi de 657 MW no período de 1985 a 1999, com Angra I e ampliada para 2.007 MW, devido a construção da usina de Angra II, no período de 2000 a 2002 (BEN-MME, 2006).

Atualmente, a geração hidroelétrica representa uma parcela superior a 70% do total da oferta de eletricidade gerada no Brasil, enquanto que as Usinas Nucleares de Angra I e II representam apenas 3,6%, uma parcela pouco significativa quando considerado a demanda no contexto nacional. Entretanto, as usinas de Angra II e Angra I ocupam respectivamente o primeiro e o segundo lugar entre as geradoras térmicas brasileiras. As duas usinas representam aproximadamente 45% da energia consumida no Estado do Rio de Janeiro. A construção de uma terceira usina na região, com potência de 1.350MW, elevaria esse percentual para aproximadamente 60%. A produção energética da usina de Angra II, por exemplo, teria sido capaz de cobrir o consumo de energia elétrica do Estado do Pará ou toda a eletricidade consumida nos Estado de Goiás e Espírito Santo juntos, durante todo o ano de 2001.

No momento, a produção brasileira é destinada ao mercado interno, entre outros, para atender a demanda dos reatores das usinas de Angra I e II e

futuramente de Angra III, caso o governo brasileiro decida por sua construção. Todavia, o cenário da energia nuclear está aberto e pode representar oportunidades reais para o País no cenário interno assim como no externo, especialmente se for levado em consideração que o Brasil detém a sexta maior reserva mundial de Urânio, isto com apenas 25% do território Brasileiro prospectado.

Neste escopo os aspectos relacionados com a constante atualização de regulamentos e normas técnicas, qualificação e treinamento continuado de pessoal, disponibilização de infra-estrutura adequada e desenvolvimento de pesquisas direcionadas que permitam, por exemplo, adequar projeções feitas para cenários desenvolvidos para países com condições ambientais diferentes da nossa são aspectos essenciais. São absolutamente necessários que órgãos reguladores e operadores não sejam entidades antagônicas entre si e sim co-responsáveis por um projeto de desenvolvimento nacional visando o bem estar da população brasileira.

Tomando-se por base o que foi verificado nos centros de produção de Urânio ao longo das últimas décadas, a adoção de requisitos regulatórios cada vez mais restritivos levou a um aumento de eficiência do setor produtivo, redução de gastos na mitigação de impactos ambientais e formulação de abordagens criativas no relacionamento com comunidades potencialmente afetadas pelos projetos de produção. Ou seja, o bom desempenho ambiental de uma instalação traz evidentes benefícios econômicos e financeiros para o País.

Por fim, deve ser entendido que o relacionamento com a opinião pública deve ser pautado por práticas transparentes, tanto do órgão operador quanto do órgão regulador englobando aí ações pró-ativas de esclarecimento, além de práticas concretas no campo da responsabilidade social. Na medida em que o Brasil consiga atingir um aprimoramento sustentável nessas práticas, o futuro do programa nuclear brasileiro, num cenário desafiador e complexo, poderá ter condições reais de desenvolvimento e expansão.

3.5 - As Usinas Nucleares Brasileiras

A introdução das Usinas Nucleares no Brasil deu-se no início da década de 70, período do chamado “milagre brasileiro”, quando o Governo Federal fazia previsões otimistas quanto ao crescimento e desenvolvimento econômico no país (chegando a 10% ao ano), tanto para esta quanto para as demais décadas e afirmava que o potencial hidroelétrico estaria esgotado até o ano de 2000. Constatou-se, entretanto, que as previsões referentes ao crescimento econômico não se concretizaram, sobretudo devido ao período de crise mundial que se instalou a partir da década de 80. O moderado crescimento econômico do país acompanhou a produção energética que esteve baseada principalmente na geração hidroelétrica como principal fonte. No ano de 2001 ocorreu o chamado “apagão”, que serviu de alerta quanto à produção e o potencial hidroelétrico brasileiro, não sendo permitido ao país a dependência apenas dessa fonte de energia.

Localizada na praia de Itaorna, município de Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto possuí em operação as usinas de Angra I e II, além de uma área onde estão colocadas as fundações para a construção de Angra III. A usina nuclear de Angra III teve sua construção iniciada em 1983, porem foi paralisada em 1986 por falta de recursos. A contratação para a construção desta usina ocorreu em 1976, juntamente com Angra II que só foi concluída em 2000. Angra I levou 13 anos para ser construída e somente entrou em operação em 1985. A construção da usina nuclear de Angra III é permeada de situações e eventos que impedem sua finalização.

A usina Angra I tem uma potência de 626 MW. Começou a funcionar em 1981, mas em seguida foi paralisada por defeitos técnicos. Apenas no final de 1983 é que retomou seu funcionamento, em formas de testes. Foram muitos anos para entrar operação permanente com sua capacidade total. Os problemas que cercam essa usina são numerosos, como tecnologia cara e já obsoleta, construção em local inapropriado, problemas térmicos que freqüentemente

paralisam o funcionamento da usina e até a ausência de qualquer plano seguro de evacuação da população local no caso de um acidente.

A usina de Angra II já está construída Angra III está com previsão de construção para o ano de 2008.

Como a continuação do programa nuclear passou, primeiramente, pela decisão do prosseguimento das obras de Angra III, é sobre esta atividade que se deve debruçar de início, para chegar a conclusões sobre a continuidade da opção nuclear, pelo menos enquanto perdurar o estado atual desta tecnologia Neste particular assume importância decisiva o cronograma de construção. A tradição brasileira mostra interrupções constantes no cronograma de construção devido a restrições orçamentárias. A continuação de Angra III, independentemente de outros fatores que serão abordados, somente deveria ser retomada se fossem garantidos os recursos necessários para uma construção contínua e programada para ser completada num prazo máximo de 5 anos.

No final do ano de 2002, ocorreu uma retomada na discussão sobre a possibilidade de se finalizar a construção de Angra III. Entretanto, devido à proximidade das eleições presidenciais, não avançaram as tentativas nesse sentido. No início de 2003 ocorreram pressões políticas, no recém assumido governo, para que as negociações para o financiamento da construção de Angra III fossem reiniciadas. O governo afirmou que, somente estudos sociais, econômicos e ambientais adequados permitiriam que essa possibilidade pudesse ser cogitada.

Estudos realizados, pelas empresas Iberdrola (espanhola), EdF (francesa) e pelo Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (norte-americano), revelaram que Angra III precisaria de 1,7 bilhões de dólares para ser concluída. Jjá foram gastos 750 milhões de dólares em equipamentos e anualmente 20 milhões de dólares são utilizados na manutenção desses equipamentos adquiridos, necessários para seu funcionamento. A Eletronuclear contratou a USP para fazer levantamento de gastos para a finalização de Angra III e esta universidade

verificou que, após o inicio das obras, a usina deverá ficar pronta em cinco anos e seis meses, sendo necessários para isso 1,8 bilhões de dólares.

Sendo concretizada a construção, Angra III contribuiria com mais de 1350 MW de potência para a matriz energética nacional representando, juntamente com Angra I e II, cerca de 60% do consumo de energia do Estado do Rio de Janeiro.

A questão da construção de Angra III e o desenvolvimento do setor energético nuclear no Brasil estão condicionados a norma do art. 225,§6º da Constituição Federal, que determina que a Energia Nuclear no Brasil seja de competência exclusiva da União. Esta situação, de certa forma, prejudica o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil, pois a tendência de desenvolvimento está vinculada à iniciativa privada e o governo não dispõe de recursos necessários para fazer investimentos na área, o que torna a construção da Usina de Angra III dependente de recursos financeiros do exterior.

A perspectiva limitada para a energia nuclear hoje é atribuída, em última análise, a quatro problemas não resolvidos que são discutidos a seguir:

(a) Custos

Análises de custos da geração de origem nuclear, quando executadas considerando os custos reais, sem qualquer favorecimento ou subsídio do governo, indica que a opção nuclear tem custos totais maiores, considerando toda a vida do ciclo (projeto, construção, operação e descomissionamento), quando comparados com ciclos combinados de turbina a gás (CCGT) e carvão, embora o carvão ainda seja uma opção energética de produção de energia elétrica em massa a ser considerada na matriz energética brasileira.

Um estudo interdisciplinar, liberado em julho de 2003, pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) estabelece 6,7 centavos de dólar por kilowatt/hora como custo base para a energia nuclear, comparado com 4,2 centavos de dólar para o carvão e gás natural. Considerando-se o custo do controle de emissões

poluentes o carvão salta para 5,4 centavos de dólar e o gás natural para 4,8 centavos de dólar. Já há quem afirme que o gás de Santos poderá chegar ao mercado consumidor a R$ 0,20 por metro cúbico contra os R$ 0,40 do gás boliviano. Freqüentemente se confunde, intencionalmente, custos operacionais (O&M – Operação e Manutenção) com custos de produção de energia, omitindo-se os custos de remuneração do capital ativo em serviço. Portanto, a continuação de Angra III exige que as questões de custos sejam devidamente endereçadas com análises claras e transparentes frente a opções energéticas de origem fóssil como o gás natural, em que pese sua grande vantagem de sequestro do CO_2.

(b) Segurança

A energia nuclear tem sofrido arranhões adversos na sua imagem como opção energética segura para a saúde e o meio ambiente, comprometendo-se de forma profunda devidos aos acidentes dos reatores de Three Mile Island em 1979 e Chernobyl em 1986. A estes se somam também outros acidentes menores nos Estados Unidos, Rússia e Japão. Existe também uma grande preocupação com relação ao transporte seguro de materiais nucleares e com a segurança das instalações nucleares contra ataques terroristas.

(c) Proliferação

A energia nuclear encerra riscos potencias de segurança notadamente através da possibilidade do uso indevido das instalações nucleares com a finalidade da obtenção de tecnologia para fins militares. Ciclos nucleares que envolvem o reprocessamento físico e químico dos elementos combustíveis utilizados como materiais em armas atômicas, com tecnologias de enriquecimento do urânio e obtenção plutônio, são especialmente preocupantes, O Brasil assinou tratados internacionais que o impedem de utilizar a tecnologia nuclear para fins militares.

(d) Rejeitos

A energia nuclear ainda não resolveu o desafio do gerenciamento a longo prazo dos rejeitos radioativos. Uma vez que estes rejeitos oferecem perigo para as gerações presentes e também futuras, o Brasil como grande parte dos países produtores de energia por meio nuclear, vem estudando o problema a fundo e acompanhando o desenvolvimento dos outros países nesta área. Hoje os Reatores Nucleares são muito mais seguros que os da primeira e segunda geração,.Os países mais adiantados como EUA, Inglaterra, Canadá, e outros já pesquisam e desenvolvem a geração 4 de reatores modernos, e muito mais seguros que devem entrar em operação até 2030.

A construção da usina nuclear de Angra III não representa solução definitiva para um problema de demanda energética futura, levando em consideração que, em países como o Brasil, o crescimento econômico gera um aumento do consumo de energia em iguais proporções. Esta usina não representaria parcela considerável dentro do contexto nacional. Contudo, em relação ao Estado do Rio de Janeiro, Angra III seria um caso a parte, pois este estado depende muito da geração hidroelétrica proveniente de outras regiões. Dessa forma, Angra III constitui-se como um empreendimento atrativo, pois, poderia representar uma solução para minimizar a dependência energética do estado em relação a outras regiões. Além disso, a alternativa das usinas térmicas a gás, adotada pelo governo para diversificação da produção energética nacional, não se mostraram tão atrativas devido a se manter dependente da importação de gás.

O alto custo de instalação de Angra III é também um fator que dificulta o prosseguimento do programa nuclear. Este indicativo elevaria muito o preço da energia gerada pela usina, além dos recursos financeiros necessários na construção, que provavelmente seriam fornecidos através de empréstimos externos. É essencial haver uma reorganização quanto a operação e manutenção para uma maior eficiência energética e segurança das plantas

industriais em funcionamento. Atualmente, os resíduos radioativos gerados por essas usinas, apesar de estarem totalmente identificados e monitorados, representam certo risco por não terem um destino definitivo.

Entretanto, o desenvolvimento da tecnologia de produção de urânio enriquecido, através de todas as fases do ciclo do combustível, representaria a possibilidade de gerar internamente todo o combustível necessário para operar as usinas nucleares, utilizando o potencial das reservas de minerais de urânio brasileiras.

O Brasil detendo a sexta reserva mundial de Urânio, garante o suprimento de combustível até o final da vida útil das 3 usinas do complexo Almirante Álvaro Alberto em pleno funcionamento.

3. 6 – Usinas Nucleares e o Meio Ambiente

O mundo vive uma crescente preocupação com o meio ambiente e com o aquecimento do planeta. Grupos que condenavam o uso de energia nuclear pelos perigos que poderia representar, revisaram suas posições e acompanharam de perto o desenvolvimento de reatores de quarta geração, muito mais seguros e também a não emissão de poluentes à atmosfera pelas usinas nucleares. Com estes acenos o governo brasileiro, aponta para a conclusão de Angra III, e a construção de mais quatro usinas até 2030.

Mesmo com o racionamento iminente, ainda não se computou o potencial hidráulico da bacia Amazônica. Os custos de produção e operação das usinas nucleares são bastante altos, cerca de três vezes mais que os de uma usina hidrelétrica equivalente. Em síntese, o preço por quilowatt gerado por uma fonte nuclear sai três vezes mais caro que o gerado por fonte hidráulica. Isto significa que as usinas nucleares tendem a elevar as tarifas para o suprimento de eletricidade. Mas, devido ao esgotamento dos recursos hídricos próximos aos principais centros consumidores, com as dificuldades para o licenciamento ambiental dos aproveitamentos hídricos remanescentes e o constante crescimento da demanda de energia, a participação da energia nuclear na

produção de energia elétrica é fundamental, na medida em que contribui para a melhoria na qualidade de vida da população e para o desenvolvimento econômico do país.

3.7 - Enriquecimento de urânio no Brasil

O governo da China manifestou o propósito de estabelecer um acordo de cooperação nuclear com o Brasil o qual forneceria urânio na forma de *"yelow cake"* para ser usado em usinas nucleares. Os recursos dessa venda seriam investidos no programa nuclear brasileiro.

Para gerar energia, o urânio precisa ser enriquecido, processo pelo qual se aumenta a concentração do elemento U^{235}, que aparece na natureza de forma impura e rarefeita. O Brasil domina todas as fases desse processamento e está próximo de alcançar a produção industrial do ciclo completo nas Instalações de Resende (RJ), cuja vistoria internacional foi alvo de polêmica.

Com pouco enriquecimento, 3 a 5 % o urânio é combustível para usinas de produção de energia elétrica. Com enriquecimento médio, 18 a 20 % serve como combustível para submarinos e reatores de pesquisas. O Brasil só admite seu interesse nessas duas possibilidades, reiterando a todo tempo que abdica do alto enriquecimento, destinado à produção de armamentos nucleares.

O avanço brasileiro e de outros países em desenvolvimento na área da tecnologia nuclear tem causado alguma inquietação na comunidade internacional, porém o Brasil assinou todos os tratados internacionais.

A tecnologia de enriquecimento isotópico de Urânio através de laser, pesquisada desde 1981 pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), de São José dos Campos, possui diversas aplicações, desde o desenvolvimento de combustível para reatores de pequeno porte para utilização em submarinos, até para geração de energia elétrica através de Unidades Autônomas Compactas de Produção de Energia. A técnica, que já atingiu resultados somente alcançados em laboratórios instalados em seis

países (EUA, Inglaterra, França, Japão, Rússia e China), poderá ser aplicada também na produção de radiofármacos (substâncias radioativas para o uso no diagnóstico e tratamento de doenças, principalmente o câncer) e no desenvolvimento de novos materiais como, por exemplo, ligas metálicas e materiais magnéticos.

O enriquecimento de Urânio é o processo pelo qual se aumenta a concentração de um de seus isótopos, o U^{235}, que é muito pequena no Urânio natural (cerca de 0,7%). O isótopo U^{238} é o mais abundante na natureza (cerca de 99,3%), porém o U^{235} é mais adequado para produção de energia. Por isso, a maioria dos reatores térmicos atuais opera com Urânio enriquecido.

Para se aumentar a concentração do U^{235}, é preciso obter uma grande quantidade de átomos do isótopo, retirados do urânio natural. Existem alguns métodos de separação de isótopos que já vêm sendo utilizados ao redor do mundo. Um dos mais conhecidos é a ultracentrifugação, que já é utilizada há vários anos por alguns países, inclusive o Brasil onde foi desenvolvida pela marinha brasileira Há também a difusão gasosa, utilizada pelos EUA, França e Rússia, que se caracteriza pelo alto consumo de energia durante a operação.

O método desenvolvido no IEAv é baseado no uso de lasers e é considerado hoje o mais indicado para o Urânio, do ponto de vista econômico e ecológico, já que consegue extrair quantidades muito maiores do isótopo U^{235} a partir do Urânio natural, usando menos Urânio que os outros métodos e gerando rejeitos em menor quantidade e menos radioativos, o que reduz o risco de vazamento de materiais radioativos ou tóxicos.

A separação de isótopos de Urânio por lasers baseia-se na diferença de absorção de luz de diferentes cores.. Existem cerca de 92 mil linhas (comprimento de ondas), somente na região do visível (porção da luz que o ser humano consegue enxergar), que permitem a separação dos isótopos de urânio. Um dos objetivos da pesquisa é escolher as 3 ou 4 mais eficientes, complementa. No modelo experimental, já foi possível identificá-las através de técnicas de espectroscopia.

Durante o processo, existem três etapas fundamentais: a primeira consiste na transformação do urânio sólido em vapor (sistema de evaporação); a segunda é a utilização do laser para separação dos isótopos (espectroscopia de fotoionização) e a terceira é a coleta do U^{235}, após ionização (sistema de coleta).

Apesar desta tecnologia já ter sido desenvolvida em outros países, os detalhes técnico-científicos e de engenharia têm sido mantidos em sigilo. Durante estes anos, o IEAv colaborou com a Marinha para a construção de um reator que utiliza urânio enriquecido a 3%. Atualmente, está sendo projetado um segundo reator, que utilizará urânio enriquecido a cerca de 20%, em que o IEAv terá uma participação maior nos cálculos térmicos. No que se refere ao ciclo de combustível, o IEAv está desenvolvendo um processo complementar ao da Marinha, que já possui um processo de enriquecimento de Urânio por ultracentrifugação.. A meta é alcançar o enriquecimento de urânio a 20%.

Os estudos do laser para separação isotópica consumiram, desde 1981 até hoje, investimentos da ordem de US$ 2,5 milhões e apesar de ser uma atividade reconhecida universalmente como cara, seu exercício se justifica pela necessidade, igualmente reconhecida, de geração de energia mediante reatores nucleares.

Atualmente, a equipe do IEAv está avaliando a possibilidade de construção de uma usina piloto para verificar, na prática, os resultados obtidos após todos estes anos de pesquisa e levantar as dificuldades e os custos da produção de Urânio em grande escala. Porém, a construção deste projeto dependerá dos recursos disponíveis, uma vez que implica em grandes investimentos.

A unidade de enriquecimento de urânio de Resende, no Rio de Janeiro, foi palco de grande polêmica. Com o objetivo de não mostrar a tecnologia utilizada em suas centrífugas, o Brasil impôs condições à inspeção da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), gerando especulações quanto aos objetivos do Programa Nuclear Brasileiro. Tal desconfiança foi considerada pelo Brasil como completamente infundada por autoridades representativas tanto do

governo, como de centros de pesquisa deste setor. Embora o Brasil não tenha uma tradição beligerante, num ambiente paranóico como o atual tudo passa a ser motivo de alarme.

A Constituição Federal do Brasil, em seu artigo 21, proíbe a utilização da energia nuclear para fins que não sejam exclusivamente pacíficos. Além do Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP), firmado em 1997, o Brasil também é signatário do Acordo Quadripartite para a Aplicação de Salvaguardas, em vigor desde 1994.

O cenário mais temido sobretudo, mas não apenas, pelos americanos seria aquele em que vários países "irresponsáveis" tivessem acesso a armamento nuclear. O número de governos que dispõem dessa tecnologia têm crescido desde 1945: Estados Unidos, Rússia, Inglaterra, França, China, Índia, Paquistão e, provavelmente, Israel. A humanidade tem sabido evitar, desde as atrocidades de Hiroshima e Nagasaki, o uso de recurso tão devastador quanto imprevisível. Diz-se que bomba nuclear é um instrumento para ter, não para usar. A possibilidade de retaliação imediata é o que tem contido os governos que podem empregá-lo. Mas a proliferação, é claro, só aumenta o risco.

A opinião pública brasileira é pacifista. São raras e até agora quase folclóricas as manifestações a favor de um programa militar atômico no Brasil. A visão do Itamaraty sempre foi a de que não convém ao país líder de uma região deflagrar uma corrida nuclear, seu vizinho seria forçado a acompanhá-lo e a vantagem prévia desapareceria.

Foi exatamente o que se passou entre dois rivais asiáticos, Índia e Paquistão, hoje paralisados pelo medo um do outro. Por mais que a Argentina tenha perdido peso estratégico, flertar com a idéia parece um risco desnecessário, perigoso e caro. Que nosso programa prossiga e se mantenha como tem sido: pacífico.

Esta desconfiança entre os dois países e a comunidade mundial, cresceu tanto que, Brasil e Argentina resolveram criar uma agência entre os dois países

nos moldes da AIEA , então surgiu em 1992 a Agência Brasileiro Argentina de Contabilidade e Controle de Materiaia Nucleares (ABACC), que faz a fiscalização nos dois países na área nuclear em conjunto com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA)

Apesar da polêmica em torno da energia nuclear, que se justifica pelo perigo representado pelos resíduos radioativos, ela é hoje utilizada em diversas áreas do conhecimento, sendo responsável por avanços tecnológicos de grande importância no meio científico internacional.

3.8 - O Ciclo do Combustível Nuclear

Na tecnologia mundial, são conhecidos dois tipos de ciclo do combustível nuclear: o ciclo aberto e o ciclo fechado, conforme apresentado na FIG. 12. O ciclo aberto compreende o inventário e a estocagem final do combustível nuclear após o uso no reator de potência. Tal estocagem deve ser executada de acordo com as salvaguadas internacional.

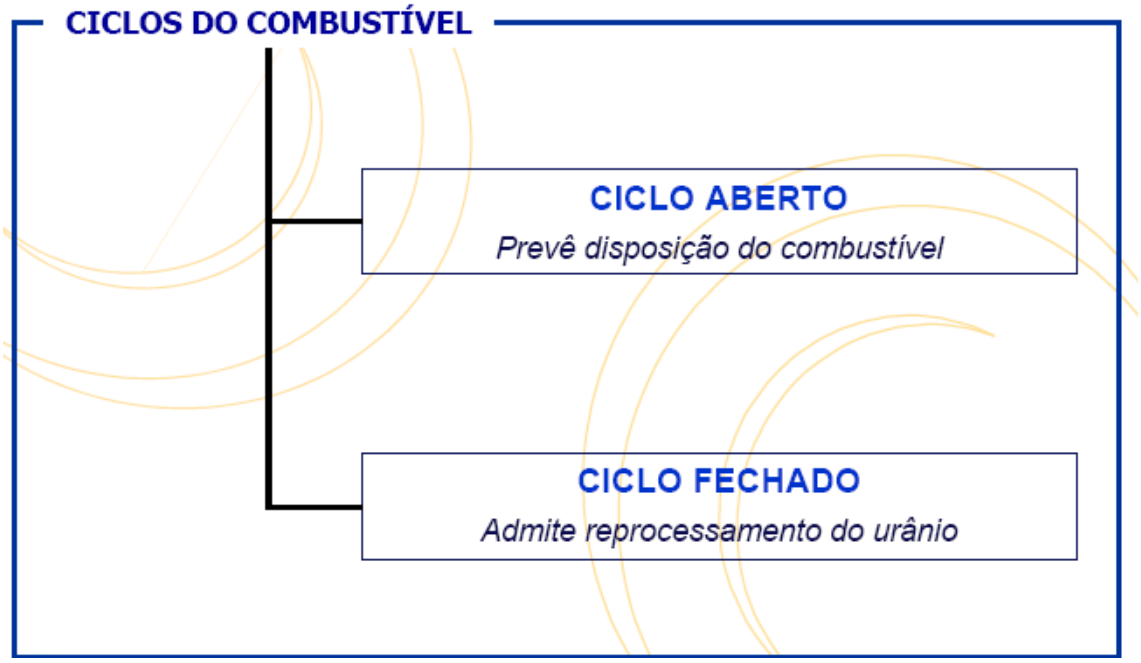


FIGURA 12 - Ciclo do combustível nuclear

Na FIG.13 apresenta-se o ciclo do combustível aberto, utilizado no Brasil,.desde a mineração até a disposição final do combustível irradiado e dos rejeitos

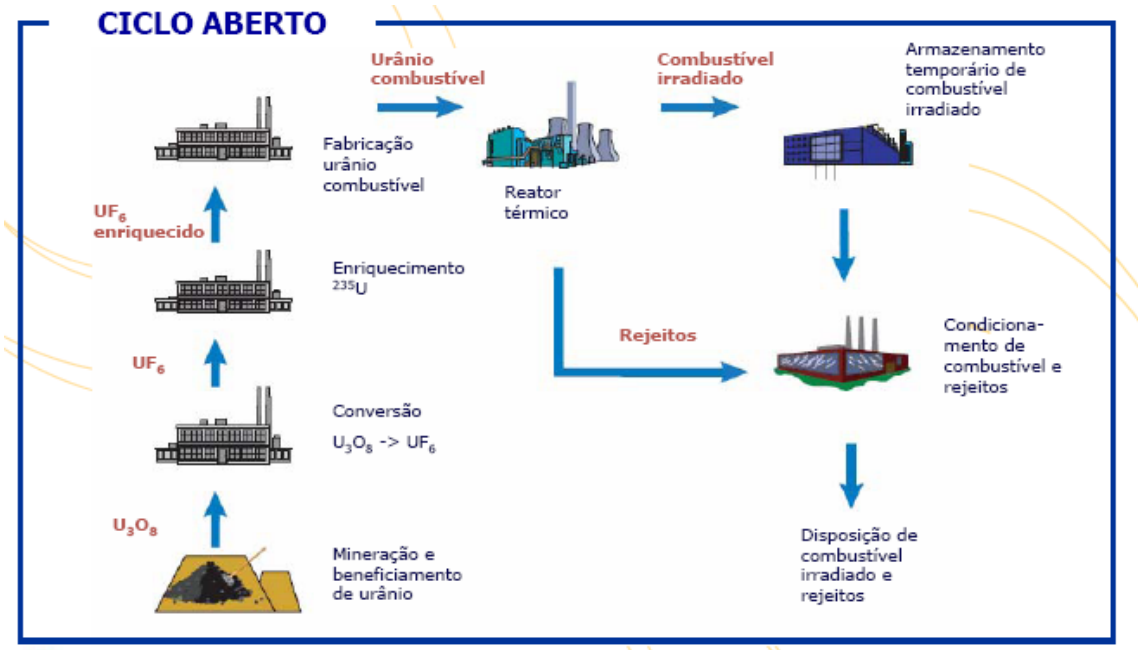
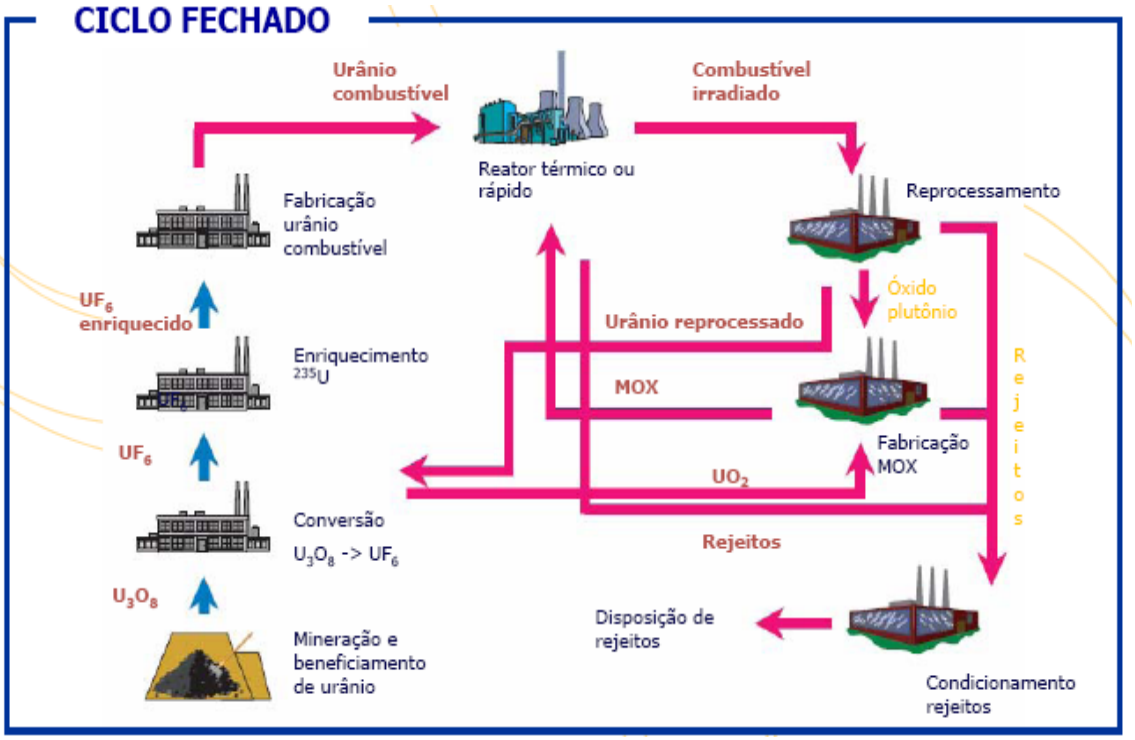


FIGURA 13 - Ciclo do combustível aberto.

O Brasil não utiliza o ciclo fechado, que necessita combustível misto de óxido de urânio e plutônio, como mostrado na FIG 14 O motivo é que o Brasil não reprocessa o combustível queimado..



MOX: combustível misto de óxidos de urânio e plutônio

FIGURA 14 - Ciclo do combustível fechado.

3.9 - Histórico da fundação do IPEN

Em 31 de agosto de 1956 foi criado o Instituto de Energia Atômica (IEA), subordinado administrativa, técnica e cientificamente ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq). Criado pelo Decreto Federal n°39.872 da Presidência da República, nos moldes do convênio firmado entre o Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e a Universidade de São Paulo (USP), na cidade de São Paulo. O referido Convênio CNPq/USP data de Janeiro de 1956 (Proc.RUSP 1614/57) - para a criação de um órgão de âmbito nacional para pesquisas de energia atômica para fins pacíficos. Até 19 de Fevereiro de 1963 o IEA ficou juridicamente ligado ao CNPq e a partir desta data foi transferido para a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Este vínculo com a CNEN permaneceu até 7 de Junho de 1972, quando por meio de Convênio com a Universidade de São Paulo (USP), o IEA passou a pertencer àquela Universidade. Em 16 de Março de 1979, ao vincular-se à Secretaria de Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Governo do Estado

de São Paulo (SICCT), o IEA passou a chamar-se Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

Desde o Decreto Federal n° 39.872 de 1956 o IEA, de âmbito nacional, tem por objetivo "*desenvolver pesquisas sobre energia atômica para fins pacíficos; produzir radioisótopos para estudos e experiências em qualquer ponto do País; contribuir para a formação, em ciência e tecnologia nucleares, de cientistas e técnicos provenientes das várias unidades da Federação; estabelecer bases, dados construtivos e protótipos de reatores destinados ao aproveitamento da energia nuclear, para fins industriais, de acordo com as necessidades do País".*

Várias negociações precederam a criação do IEA. Em Janeiro de 1956 foi assinado o seguinte Convênio entre o Conselho Nacional de Pesquisas e a Universidade de São Paulo (Processo RUSP 1614/57): *"O CNPq representado neste ato pelo seu Vice-Presidente, Prof.dr Heitor Grillo e a USP pelo seu Magnifico Reitor Prof.Alipio Correa Neto, acordam em assinar um Convênio para a criação de um Instituto de Energia Atomica de âmbito nacional, tendo em vista o aprovado na 298ª Seção de 20 de Dezembro de 1955 do Conselho Deliberativo do CNPq (Proc CNPq 132/56) e nos seguintes termos: I - O presente Convênio, celebrado entre o CNPq e a USP, tem por objeto a criação de um Instituto Nacional de Energia Atômica (INEA), de âmbito nacional, localizado em São Paulo. Esse Instituto terá por finalidade: desenvolver pesquisas sobre a energia atômica para fins pacíficos; produzir radioisótopos para estudos e experiências em qualquer ponto do País; contribuir para a formação em ciência e tecnologia nucleares, de cientistas e técnicos provenientes das várias unidades da Federação; estabelecer bases, dados construtivos e protótipos de reatores destinados ao aproveitamento da energia atomica, para fins industriais, tendo em vista as necessidades do País."*

0 Instituto deveria se chamar Instituto Nacional de Energia Atômica, como reza o artigo III deste Convênio: A Universidade de São Paulo forneceria uma área de terreno, estendendo-se por 300 metros em volta do reator, e providenciaria, com a dispensável urgência, o projeto e a construção do prédio

necessário à instalação do reator e dos laboratórios anexos. A Universidade poria igualmente à disposição do Instituto Nacional de Energia Atômica (INEA) recursos, em pessoal científico e técnico bem como equipamentos, que poderiam ser úteis ao desenvolvimento dos programas do Instituto. Após o funcionamento o INEA passou a ser chamado de Instituto de Energia Atômica (IEA)

O IEA se desenvolveu tendo como módulo central o próprio reator. Deve-se a instalação do reator à iniciativa do Prof.Dr. Marcello Damy de Souza Santos. O Prof. Dr.Damy já reinvindicava, no início de 1956, para São Paulo, a instalação do primeiro reator nuclear de pesquisas. Terminada a construção do edifício, foi feita a montagem do reator. Foi um momento emocionante o da primeira criticalidade, que é o estágio do reator nuclear em que cada nêutron libertado produz uma fissão em média, em 16 de Setembro de 1957. Desde a primeira operação, diga-se de passagem, bem sucedida, até os dias atuais, o reator IEA-R1 continua operando, batendo um recorde de trabalho, felizmente sem qualquer acidente durante estes cinqüenta anos de operação, comprovando ser um equipamento muito confiável.

Desde os primeiros tempos contou o Prof.Dr Marcello Damy com a colaboração dos Profs. Drs Fausto Walter Lima, da Divisão de Radioquímica e Produção de Radioisótopos, Rômulo Ribeiro Pieroni, da Divisão de Radioproteção e Radiobiologia, Luiz Cintra do Prado, da Divisão de Física Nuclear, Paulo Saraiva de Toledo, da Divisão de Física de Reatores e Tharcizio Damy de Souza Santos, da Divisão de Metalurgia Nuclear.

Em 1963 o IEA passou a ser órgão da CNEN pelo Regulamento da Comissão Nacional de Energia Nuclear (art.114), aprovado pelo Decreto Federal n°51.726, de 19.02.1963. Em 27.02.1970 o Decreto Lei Estadual cria, como entidade autárquia, o IEA. Ainda neste ano, em 29.05.1970, pelo Decreto-Lei n° 250, que passou a produzir efeitos a partir de 7 de Junho de 1972, com a assinatura do Convênio previsto no mencionado Decreto-Lei e no Decreto de 19/11/70, celebrado entre a CNEN e a USP. O Decreto Federal 67.620 extingue o IEA como órgão independente da CNEN.

Em 1979 o IEA passou a operar com o nome de IPEN (16/03/79), vinculado à Secretaria de Estado da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, Decreto n° 13.427, de 16/03/79 (art.3°, II, "d", art.11, III).

Em 1982 o IPEN passou à égide da CNEN, como Unidade Administrativa. Foi feito um convênio entre o Governo do Estado de São Paulo e a CNEN, com a interveniência do Ministério das Minas e Energia, da SICCT e da USP, para reintegrar o IPEN, mediante comodato de seus bens, nas atividades do desenvolvimento das aplicações pacíficas da energia nuclear, a cargo da CNEN e monopólio da União (Lei n°1.982, de 28/12/82).

Hoje o IPEN é uma Autarquia do Governo do Estado de São Paulo, gerida técnica e administrativamente pela CNEN. Com a mudança de sua designação de IEA, para IPEN, houve uma ampliação de seu campo de trabalho, que atualmente se estende a todas as formas de energia.

O IPEN tem como objetivo principal a realização de pesquisas e desenvolvimento nos campos das aplicações pacíficas da energia nuclear, desenvolvendo a pesquisa fundamental e aplicada na área nuclear.

A contribuição do IPEN e de seus pesquisadores para o progresso científico e tecnológico do País tem sido ressaltada em várias ocasiões. Destacam-se entre estas atividades a: instalação das unidades de produção de radioisótopos, técnica de análise por ativação neutrônica, experimentos de física nuclear, ciclo do combustível e o desenvolvimento da tecnologia de purificação de compostos de urânio até o nível de pureza nuclear. Desde o início, a produção de radioisótopos se destinou às aplicações em medicina, indústria e agricultura. O Centro de Aplicações de Radioisótopos na Agricultura (CENA), em Piracicaba, faz uso de radioisótopos (fósforo-32) produzidos no IPEN.

De relevante importância para este Instituto foi a construção e operação das várias unidades do ciclo do combustível nuclear. Destacam-se as usinas de purificação de urânio por troca iônica e extração por solventes; de produção de diuranato de amônio, de óxidos de urânio, de tetrafluoreto de urânio, produção

de flúor elementar e de hexafluoreto de urânio, reconversão do hexafluoreto aos óxidos de urânio.

Na área de metalurgia nuclear citam-se os trabalhos para obtenção de dióxido de urânio apropriado para fabricação de pastilhas para elemento combustível, ligas urânio-alumínio, placas de elemento combustível, elementos combustíveis para o IEA-R1 produção de urânio metálico, cerâmicas e materiais especiais e várias outras atividades.

Em 1963 foram fabricadas placas para os elementos combustíveis do Reator Argonauta, localizado no Rio de Janeiro. Foram feitos, ainda, combustíveis nucleares para utilização na primeira unidade sub-critica RESUCO, inaugurado em 1967 na Universidade Federal de Pernambuco.

Ao longo do tempo, no IPEN foi instalada uma unidade para o retratamento de combustível nuclear. Desenvolveram-se processos para a química do urânio, tório, terras raras, zircônio, háfnio, berílio e grafita.

Em colaboração com o Ministério da Marinha, fizeram-se os primeiros ensaios em (1987) de enriquecimento isotópico de Urânio pela tecnologia de centrifugação, no CTM-SP, Ainda nesta parceria construiu-se (1988) o reator IPEN-MB-01.

3.10 - O Ciclo do Combustível no IPEN

Após o início do funcionamento rotineiro do Reator do Instituto de Energia Atômica (IEA) em 1957 e estando terminadas as experiências relativas ao tratamento de água para uso em instalações nucleares, iniciaram-se na Divisão de Radioquímica do IEA os estudos relacionados, principalmente, com o reprocessamento de elementos combustíveis. Constituíram-se estes estudos no desenvolvimento de técnicas de trabalho relativas às separações químicas de urânio e produtos de fissão, tório-232 e urânio-238 e plutônio-239, continuando a linha de trabalho (Lima e Abrão, 1961). Na FIG. 15 estão os Dr. Alcídio Abrão e Dr. Fausto W. Lima, que iniciaram o Ciclo do Combustível Nuclear no IPEN.

FIGURA 15 Dr. Alcídio Abrão e Dr. Fausto W. Lima.

A finalidade principal desses estudos era o treinamento e formação de pesquisadores para virem a constituir um grupo de radioquímicos que então pudessem desenvolver processos que fossem atribuídos à Divisão e, conseqüentemente ao Instituto de Energia Atômica (IEA), hoje Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Nessa ordem foram executados trabalhos que diziam respeito, principalmente, à separação de produtos de fissão e análise de componentes, em concentrações muito baixas, em vários materiais.

Em setembro de 1959, o Chefe da Divisão de Radioquímica, Dr. Fausto Walter Lima foi consultado sobre a possibilidade de iniciar estudos relativos à produção de compostos de urânio nuclearmente puros e de ampliá-los, numa

fase posterior, para construção de uma Usina Piloto que estudaria processos sob o ponto de vista industrial.

Dois métodos em particular tinham que ser considerados pela Divisão para início dos trabalhos em questão: Resinas Iônicas ou Extração por Solventes.

Várias foram as razões que levaram o (IPEN-Ex-IEA) optar pelo método de resinas iônicas. Uma delas é que já se tinha o conhecimento do método que utilizava resinas de troca iônica, enquanto o de extração por solventes estava sendo estudado pela empresa privada, a Orquima/ Nuclemon, para o caso de tório e terras raras sendo, portanto, uma duplicação de esforços. Nossas experiências com resinas já era bastante grande desde 1956, pois os estudos levados a efeito quando do treinamento para a formação do grupo de radioquímicos do IEA tinham, em sua grande maioria, sido executados com técnicas de resinas Iônicas.

Uma outra razão é que, na época, a instalação para trabalho com resinas podia ser feita de modo simples e com menor investimento do que uma instalação para extração com solvente, que exigia equipamentos de alta precisão mecânica como, por exemplo, colunas pulsantes. Estes equipamentos, praticamente todos feitos de aço inoxidável, evidentemente aumentaria muito o custo da instalação, além de exigir um tempo muito mais longo para a montagem do que a instalação de colunas com resinas, com a mesma mão de obra. Além disso, um levantamento prévio provou a possibilidade da fácil aquisição, no Parque Industrial de São Paulo, de praticamente todos os componentes, a maioria feitos de plástico, para construção da usina com resinas.

O método de purificação a ser escolhido deveria ser o mais versátil possível e tal que permitisse a produção, não apenas de diuranato de amônio, que seria usado posteriormente para a produção do dióxido de urânio, mas também a produção de material que se prestasse à produção de urânio metálico, por redução com magnésio ou cálcio.

Era importante considerar também a possibilidade de produção de material que pudesse ser facilmente transformado em hexafluoreto de urânio, o qual serviria para os estudos de separação dos isótopos do urânio.

A solução adotada permitiu que se obtivesse não apenas o diuranato de amônio puro, mas também, com pequenas modificações no esquema inicial, fluoreto de uranila e tetrafluoreto de urânio. Este último composto para utilização como precursor para a redução a urânio metálico, por calciotermia ou magnesiotermia, bem como pode ser usado como ponto de partida para a produção de hexafluoreto de urânio.

Estes dois últimos aspectos do problema ficariam bastante prejudicados se fosse adotada a técnica de extração por solventes em virtude de não ser possível a redução direta do urânio de valência VI, na forma de nitrato de uranilo, que é o produto que se obtém quando se trabalha por extração com solventes, a urânio de valência IV para se formar o tetrafluoreto de urânio. Seria necessária primeiramente a conversão do nitrato de uranilo a sulfato ou a cloreto, ou então a transformação térmica do nitrato a óxido, que seria posteriormente atacado com ácido fluorídrico.

Estas considerações influenciaram para que se optasse pela técnica das resinas iônicas e assim tirar o máximo proveito da experiência então acumulada desde 1957.

Nas FIG.16 e 17 apresentam-se partes da usina de produção de Diuranato de Amônio (DUA), instalada na Divisão de Radioquímica, do antigo IEA, hoje IPEN, em 1959.

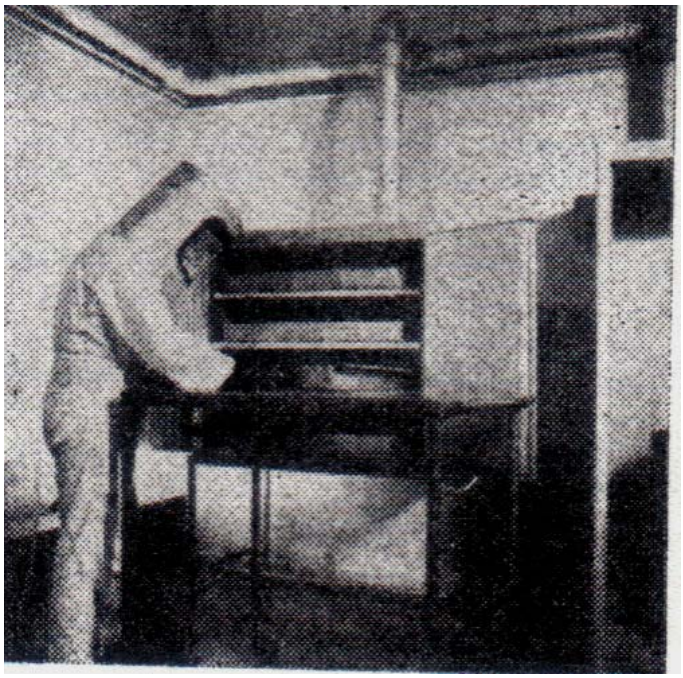


FIGURA 16**.** Queima do DUA, primeira usina IPEN (ex-IEA)

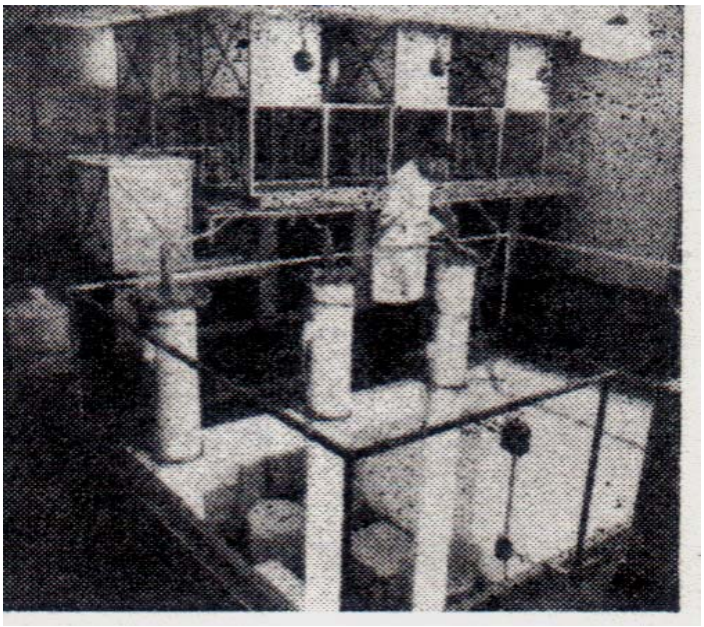


FIGURA 17 – Colunas de alimentação, primeira usina IPEN (ex- IEA)

A primeira usina piloto do ciclo de combustível instalada no IPEN operou de 1960 a 1963, com o concentrado de urânio proveniente do processamento

das areias monazíticas, industrialização feita pela empresa Orquima S.A. Este concentrado foi fornecido ao IPEN pela Comissão Nacional de Energia Nuclear. Nesta unidade foram preparadas aproximadamente quatro toneladas de diuranato de amônio (DUA) de elevada pureza (Abrão, 1994).

Transformou-se este DUA em dióxido de Urânio (UO_2) e usou-se na fabricação de elementos combustíveis, mostrados na FIG 18. Estes elementos combustíveis, fabricados pelo IEA foram empregados na construção de uma Unidade Subcrítica (RESUCO), em 1960.

FIGURA18 - Elementos combustíveis fabricados no IPEN (ex-IEA) em 1960

Esta primeira unidade piloto baseava-se no princípio de troca iônica com resina catiônica forte. No ANEXO I**,** apresenta-se o projeto desta usina. Esta tecnologia foi patenteada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Uma decisão arrojada para a época foi a montagem da segunda Unidade para purificação de Urânio, nas novas instalações da Divisão de Engenharia Química, que fora criada em dezembro de 1966. (Abrão; França Jr,, 1970). Na

FIG. 19 apresenta-se uma imagem da segunda Unidade Piloto para Purificação de Urânio.

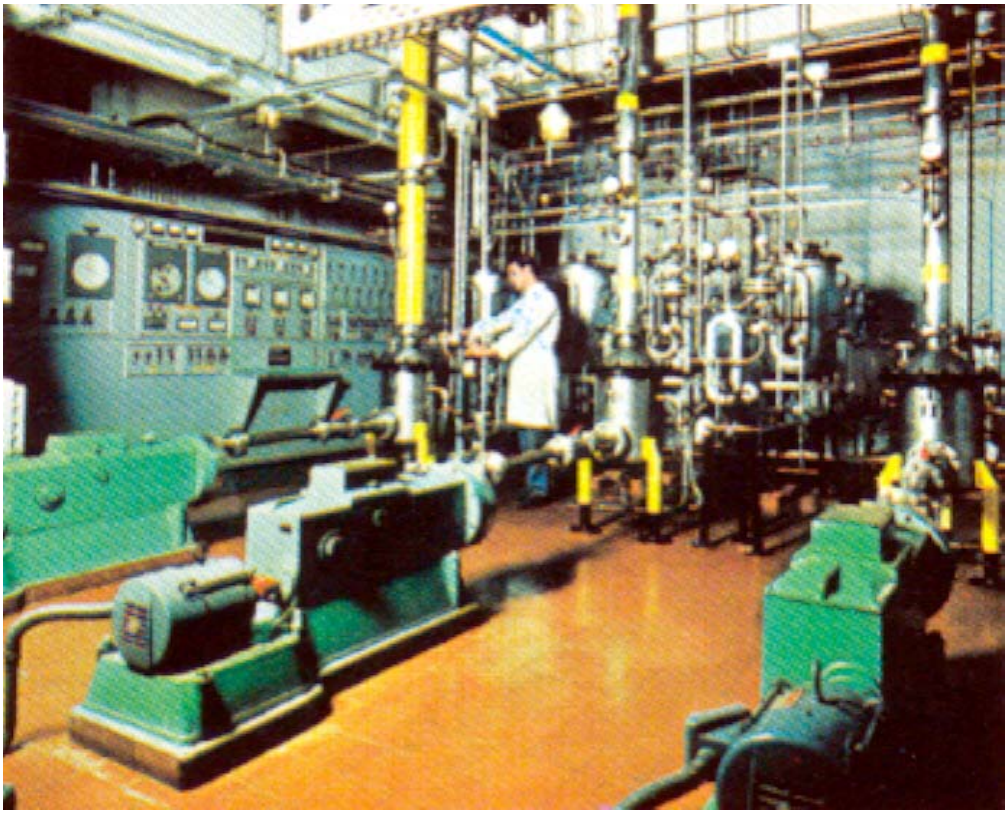


FIGURA 19 – Unidade Piloto para Purificação urânio.

Após experiência previamente obtida, com os conhecimentos adquiridos na primeira usina, na preparação de UO_2 apropriado para conversão a UF_4, instalou-se, em 1970, uma unidade piloto para produção de UF_4 destinado à redução a Urânio Metálico e à obtenção de Hexafluoreto de Urânio. Na FIG. 20 mostra-se esta unidade. Obteve-se o primeiro lote de UF_4, de modo contínuo, em 1973 (Cussiól, 1974). No ANEXO II, apresenta-se o fluxograma de processo da Usina de Produção de Tetrafluoreto de Urânio.

FIGURA 20 - Usina de produção de tetrafluoreto de urânio (UF_4)

A quarta Unidade piloto construída foi a de Desnitração do Nitrato de Uranilo. Estava assim, em funcionamento a unidade de purificação de Urânio para a preparação de DUA a partir do nitrato de uranilo, estabelecendo-se uma linha alternativa para obtenção de trióxido de urânio (UO_3), diretamente das soluções de nitrato de uranilo puro. Na FIG. 21 apresenta-se uma imagem desta usina (Baba, 1982).

Após o domínio da tecnologia de produção de UF_4, necessitava-se completar o ciclo com o desenvolvimento e montagem de uma unidade de produção do gás Hexafluoreto de Urânio (UF_6). A produção de UF_6 é uma reação química entre o Tetrafluoreto de Urânio (UF_4) e Flúor (F_2), Não é recomendado a importação ou armazenamento de flúor e como também o seu transporte de uma instalação para outra. Para produzir o UF_6 tornava-se , então, obrigatória a geração de Flúor Elementar no próprio local de uso. Sendo assim, para se produzir o Hexafluoreto de Urânio havia também a necessidade de se dominar a tecnologia de produção de Flúor Elementar de alta pureza.

FIGURA 21 Usina de produção nitrato de uranilo.

A partir de 1975, o IPEN aplicou consideráveis esforços no treinamento de pessoal quanto ao manuseio de ácido fluorídrico anidro (HF 100%) e à produção de flúor elementar, conseguindo dominar a tecnologia de fabricação deste componente para a posterior fabricação do Hexafluoreto de Urânio. Era chegado o momento de se instalar uma unidade maior. Esta deveria gerar Flúor em escala tal, de modo a ter condições de acumular UF_6 suficiente para os primeiros experimentos de enriquecimento isotópico no País.

Em 1980 foi então planejado, projetado e implantado no IPEN o Projeto Conversão (PROCON), para produção de Hexafluoreto de Urânio, sendo uma parceria entre o Ministério de Minas e Energia e o Governo do Estado de São Paulo.

A instalação do PROCON consolidou as pesquisas desenvolvidas pelas diversas equipes do IPEN, ao longo de mais de vinte e cinco anos. Em 1986 concluíram-se as obras da Usina e iniciou-se a produção do UF_6.

No PROCON a Usina de Hexafluoreto de Urânio foi operada em uma capacidade nominal de 20 $kg.h^{-1}$ de U expresso em Hexafluoreto de Urânio natural ou expresso como 27 $kg.h^{-1}$ de UF_4. Esta usina contava ainda com a unidade para alimentação de Freon e a unidade para obtenção de Flúor Elementar, que empregou o processo de eletrólise em sais fundidos. Na FIG. 22 mostra-se o fluxograma das instalações do PROCON, com destaque para a usina piloto de UF_6.

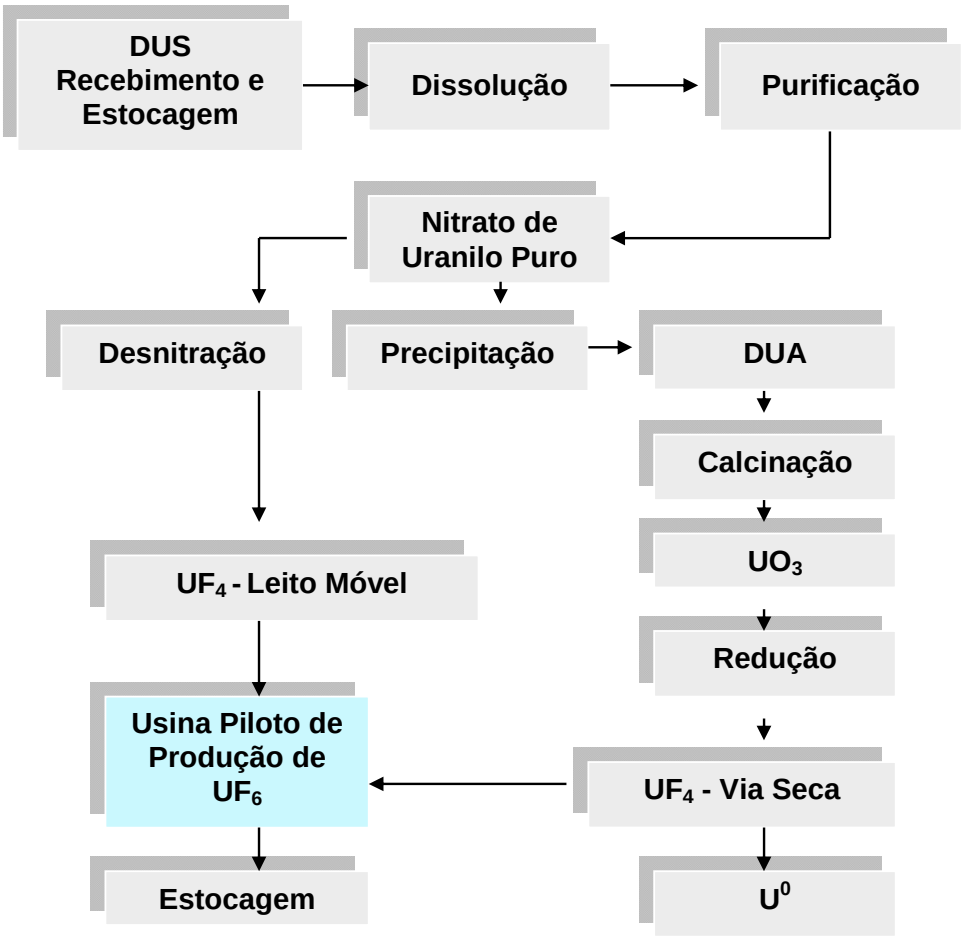


FIGURA 22 - Fluxograma das instalações do PROCON

A usina piloto de UF_6 iniciou a operação no IPEN em 1986 e encerrou suas operações em 1992. Na sua vida útil produziu trinta e cinco toneladas de UF_6 de altíssima pureza, material que foi transferida para o Centro Técnico da Marinha (CTM) antiga Coordenadoria de Projetos Especiais (COPESP) juntamente com toda a tecnologia e metodologia científica ora estabelecida e dominada. Cumpriu-se o objetivo de adquirir conhecimentos em escala piloto, acumular material para o enriquecimento e fornecer hexafluoreto de urânio para as primeiras ultra-centrífugas em operação no País.

3.11 - Considerações sobre o hexafluoreto de urânio-UF_6

O UF_6 foi descoberto em 1909 por Ruff e Heinzelman, que o prepararam pela reação de flúor com urânio metálico (U^o), carbeto de urânio (UC_2) ou pentafluoreto de Urânio (UF_5)

Após a descoberta, por trinta anos deu-se pouca atenção ao composto, até o desenvolvimento da fissão nuclear, quando se tornou muito importante por ser o único composto de urânio que, dependendo da temperatura, pode estar na forma gasosa.

Abelson recomendou o uso do UF_4 como fonte preferida de urânio na preparação de UF_6, pela reação 1 (FILHO, 1983).

$$UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6 \qquad (1)$$

Esta reação é executada a 250º C em um reator de cobre ou monel. O UF_4 é preparado pela reação de UO_2 com HF a 450-500ºC. O Flúor é produzido pela eletrólise do HF anidro, contendo KF como eletrólito, em uma célula de níquel com eletrodos de carbono.

A corrente de gás produzida no reator é resfriada a baixas temperaturas e o UF_6 deposita-se, na forma sólida, em uma armadilha fria imersa em banho condensador. O sólido condensado é então purificado por destilação fracionada a pressões maiores que a do seu ponto triplo.

3.11.1 - Propriedade Química, Física e Termodinâmica do UF_6

O UF_6 é um sólido cristalino branco que sublima lentamente à pressão e temperatura ambientes. Seu ponto triplo é 64,02°C e 1137,5 mm de Hg. No estado gasoso o UF_6 comporta-se quase como um gás perfeito, não se notando qualquer associação. É usado no processo de difusão gasosa para a separação isotópica do Urânio.

O UF_6 possui alta estabilidade termodinâmica e elevada volatibilidade. Na FIG.23 apresenta-se o diagrama de fases do UF_6, identificando o ponto tríplice, ponto crítico e ponto de sublimação do composto.

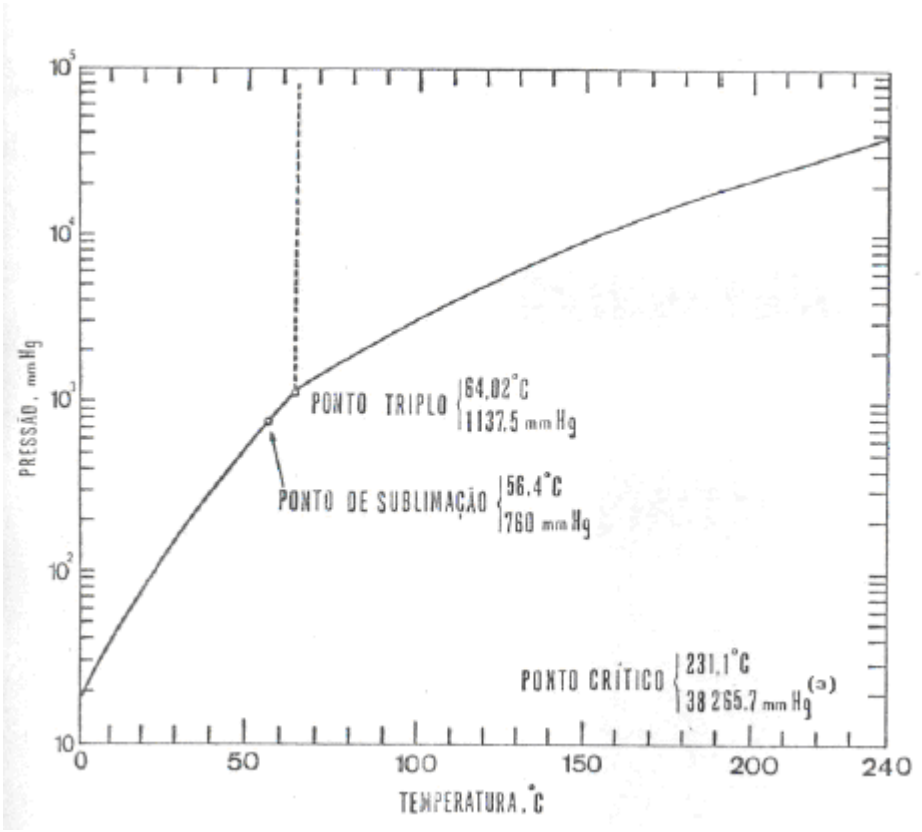


FIGURA 23 - Diagrama de fases para UF_6

O UF_4 foi recomendado como um material de partida por Abelson, devido à importância na economia de F_2. Foi recomendada uma temperatura de 274º C e o uso de (NaCl) fundido como catalisador.

$$UF_{4\,(s)} + F_{2\,(g)} \rightarrow UF_{6\,(g)} \quad (\Delta H° = -60\ Kcal) \quad (2)$$

Atualmente o UF_6 é obtido nas usinas industriais pela reação do tetrafluoreto de urânio com flúor gasoso em temperaturas superiores a 250º ocorrendo rapidamente sem a presença de catalisador. Na produção, o composto pode ser coletado como um líquido, pela compressão e resfriamento.

O UF_6 é muito reativo em relação à água, hidrolisando facilmente na presença de traços de água, formando fluoreto de uranilo e ácido fluorídrico, segundo a reação representada pela equação (3).

$$UF_6 + 2H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4\ HF \quad (\Delta H° = -\ 50{,}5\ Kcal) \quad (\ 3\ )$$

Observa-se que, praticamente, um grama de água transforma dez gramas de hexafluoreto, razão pela qual, em qualquer equipamento ou instalação para UF_6, procura-se evitar a presença de água. A TABELA 1 resume as propriedades principais do UF_6, as quais devem ser consideradas no processo de produção da espécie química.

TABELA 1 - Propriedades principais do UF_6

Parâmetro	Valor
Ponto Triplo	64,054°C a 1134 mm Hg
Ponto de sublimação	54,4 ± 0,2ºC
Pressão de Vapor sólido (mm Hg)	log P=6,38363=0,007577/(t+183,416)
Pressão de vapor do líquido (mmHg)	log=6,93718-1091,537/(t+217,32)
Temperatura crítica	Faixa estimada de 217 a 249ºC
Pressão crítica	Faixa estimada de 44 a 63 atm
Densidade do líquido	3,674g/cm^3 a 64º C
Entalpia (ΔH) de formação	- 516 Kcal/mol p/$UF_{6(s)}$ a 25º C
Entalpia (ΔH) de vaporização	6,907 Kcal/mol a 64,01º C
Entalpia (ΔH) de fusão	4,588 Kcal/mol a 64,01ºC
Entalpia (ΔH) de sublimação	11,495 Kcal/mol a 64,01ºC

Na Tab 2, apresenta-se a composição quantitativa do UF_6.

TABELA 2 Composição química percentual do UF_6.

Análise Quantitativa do UF_6	
Hexafluoreto de Urânio (UF_6)	91,4% (molar)
Fluoreto de Hidrogênio (HF)	8,6% (molar)
Tetrafluoreto de silício (SiF_4)	2,7 μ de Si/g de U
Tetrafluoreto de Carbono (CF_4)	0,01(molar)

Assim, para a obtenção de UF_6 é necessário estar agregada a Unidade de Produção de Flúor Elementar, que faz parte da reação química. Para fazer a captura em cristalizadores é necessário mais um componente a Unidade de Freon.

3.11.2 -. *Geração de flúor Elementar*

O Flúor Elementar não era produzido no Brasil nem havia disponibilidade no comércio local, teria que ser produzido pelo usuário. O Flúor é obtido pela eletrólise de fluoretos fundidos do tipo KF.HF, cuja composição deve ser escolhida convenientemente. As células cletrolíticas de temperatura médias usam eletrólito cuja composição é 2KF.3HF e operam ao redor de 80 a 100°C (Abrão e col., 1980).

Foi um desafio tecnológico para o país o projeto, a construção e instalação, com tecnologia e mão de obra nacional, de uma unidade maior para geração de Flúor. Entre os vários problemas, cuja solução deixou o País com um bom acervo tecnológico, estavam a construção dos equipamentos, como as células eletrolíticas, colunas de absorção,compressor para flúor, purificação de HF anidro e de F_2. No ANEXO III mostra-se o Fluxograma de processo de geração de flúor. solução dos mencionados problemas inclui as condições do processo para a operação das células de geração do Flúor Elementar.

Com o domínio desta metodologia foi aberto um largo caminho para o país, porque outros produtos poderiam ser fabricados, como por exemplo, o hexafluoreto de enxofre (SF_6) e agentes fluorantes inorgânicos.

O flúor elementar e seus derivados inorgânicos e orgânicos são considerados hoje, como produtos de extrema importância em todos os países desenvolvidos e em desenvolvimento, quer pelos seus aspectos tecnológicos e econômicos, quer pelas suas inúmeras aplicações em vários setores industriais. Atualmente, pode-se dizer que a tecnologia do flúor elementar e dos produtos obtidos a partir dele é monopólio dos países altamente industrializados.

3.11.3 - *Segurança e Cuidados Especiais*

Todos os operadores deviam seguir instruções de segurança descritas no manual de operação para a unidade piloto. Antes de preparar o eletrólito, verificar a completa limpeza da célula e seus acessórios e de todas as linhas. Secar completamente as linhas e as células. Não permitir resíduos de graxas, óleos e,fiapos de pano e estopa .Limpar bem os eletrodos e todos os acessórios em contato interno com a célula. Os operadores deverim cuidar de todos os detalhes, verificando os materiais de proteção individuais e os medicamentos de primeiros socorros.

Nas FIG. de 24 a 30 apresentam se a vista externa e interna das Unidades para a produção de UF_6, no IPEN.

FIGURA 24 - Vista externa da usina de UF_6.

FIGURA 25 - Cristalizadores primários da usina de UF_6

FIGURA 26 - Cristalizadores secundáriosda usina de UF_6

FIGURA 27- Colunas de lavagem da usina de UF_6

FIGURA 28 - Unidade de geração flúor

FIGURA 29 - Unidade de alimentação de freon

FIGURA 30 - Coluna de lavagem de flúor

No ANEXO IV mostra-se a planta de processo da usina de UF_6 (edifício do reator)..

O descomissionamento desta usina, com todas as unidades pertencentes a ela foi o alvo deste trabalho Ressalta-se que ao término dos estudos do Ciclo do Combustível Nuclear, no IPEN, estas usinas foram fechadas sem que tivessem sido tomados os cuidados de limpeza e proteção de seus equipamentos. Conseqüentemente, houve a necessidade de um maior cuidado na sua desmontagem.

4 - METODOLOGIA

O organograma mostrado na FIG. 31 apresenta a metodologia utilizada no descomissionamento da usina de UF_6, com as fases integradas no processo de descomissionamento e desmontagem (D&D), realizados.

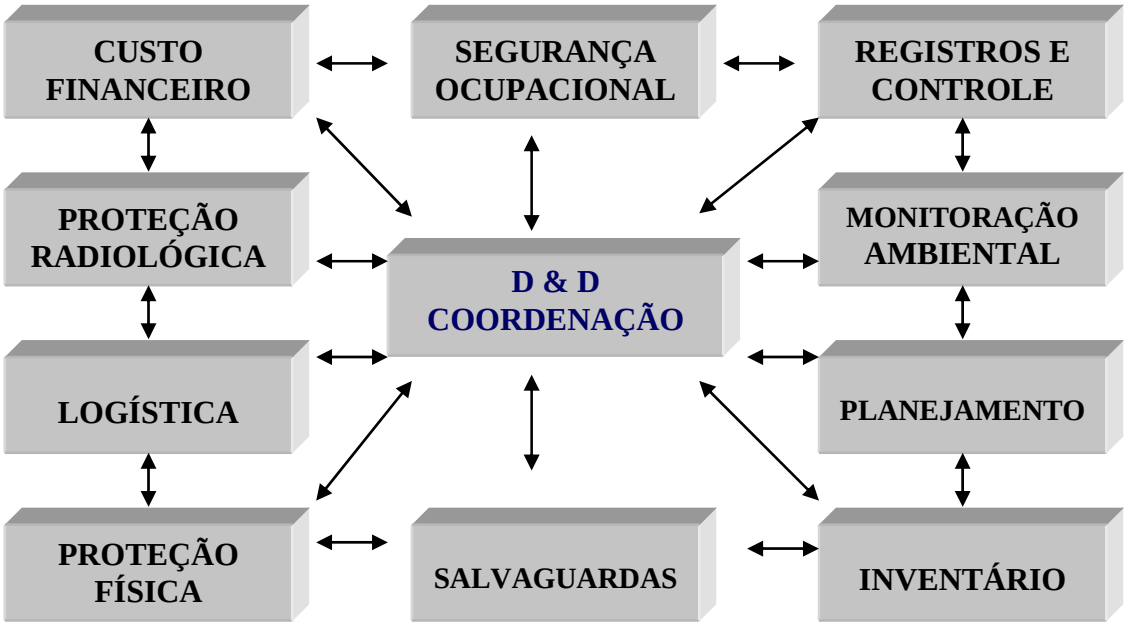


FIGURA 31 - Organograma do descomissionamento da usina de UF_6.

Para o início dos trabalhos deve-se ter conhecimento do que implica o comissionamento e o descomissionamento de uma instalação nuclear, como dado a seguir.

Comissionamento: é o conjunto de técnicas e procedimentos de engenharia aplicados de forma integrada a uma unidade ou planta nuclear, visando torná-la operacional, dentro dos requisitos de desempenho especificados em projetos. Seu objetivo central é assegurar a transferência da unidade industrial do construtor para o operador, de forma ordenada e segura, certificando a sua operabilidade em termos de segurança, desempenho, confiabilidade e rastreabilidade de informações.

Descomissionamento: é o conjunto de procedimentos estabelecidos visando tomar todas as providências necessárias para a desativação de uma instalação nuclear ao final de sua vida útil, observando-se todos os cuidados para proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores e das pessoas em geral, simultaneamente, ao meio ambiente.

Nos Países em desenvolvimento a radioatividade natural é responsável pela maior parte da exposição da população em geral. Nos paises desenvolvidos a radiação originária de atividades médicas é uma vez e meia (1,5) maior que a radiação natural Estas incluem fontes externas, tais como radiação cósmica e substâncias radioativas existentes na crosta terrestre, materiais de construção, fontes internas, resultantes da inalação e ingestão de substâncias radioativas naturalmente existentes no ar e na dieta alimentar. A população mundial como um todo vem sendo submetida à radiação natural, numa razão relativamente constante e por um período de tempo bastante longo (UNSCEAR, 2000).

Determinadas práticas ou atividades humanas têm acumulado radionuclídeos naturais aos níveis significativos, sob o ponto de vista radiosanitário, ocasionando um incremento de dose em certos grupos populacionais. Tais situações mereceram, por parte da comunidade científica internacional, estudos detalhados até então dirigidos aos radionuclídeos artificiais produzidos pela indústria nuclear (UNSCEAR, 1993). Dentre os produtos originados de matérias-primas naturais, sobre os quais houve intervenção humana, têm-se os diversos produtos originados em muitas etapas do ciclo do combustível nuclear, os quais exigem procedimentos de proteção radiológica, normas e limites ocupacionais e ambientais. Este critério foi considerado em todas as etapas do trabalho aqui executado.

Um pré-requisito para se iniciar o trabalho de descomissionamento, é que todo o material nuclear e os resíduos sejam removidos da planta. Assim, o inventário de material radioativo é reduzido à radioatividade contida nos componentes desmontados. Esta radioatividade residual está presente na forma sólida. Dependendo das circunstâncias individuais, existem três tipos de descomisssionamento, que são a imobilização segura, a remoção parcial com

imobilização segura e a remoção completa (Koelzer, 2007). No presente trabalho executado empregou-se a remoção completa.

No mundo, foram descomissionados até 2006 mais de 410 reatores de pesquisas, porém são poucas as informações sobre descomissionamento de uma usina piloto do ciclo do combustível,nuclear, principalmente para a produção de UF_6. Sabe-se que na década de 90, século XX, o Oak Ridge National Laboratory (ORNL), realizou um descomissionamento de uma Usina de Produção de UF6, com o objetivo de aumentar sua produção e introduzir novos componentes, mas devido ao segredo tecnológico o relatório não foi divulgado.

As unidades piloto do Ciclo do Combustível, a partir do yellow cake, compreenderam os seguintes processos:

- Dissolução do concentrado de urânio e purificação, para a obtenção de nitrato puro.
- Precipitação e calcinação do urânio, para a obtenção do trióxido de urânio – UO_3.
- Transformação do nitrato de uranilo puro em UO_3, por desnitração.
- Transformação do UO_3 em UO_2, para a obtenção do UF_4 por leito móvel.
- Transformação do UO_2 em UF_4 por via aquosa.
- Transformação do UF_4 em UF_6

Estas transformações químicas já foram apresentadas no fluxograma da FIG. 22**.**

Na FIG. 32 apresenta-se o Fluxograma da Planta para Produção de UF_6 no Projeto de Conversão do Urânio (PROCON), que foi empregada no IPEN. As unidades geradoras de Flúor e Freon são apresentadas em destaque, por serem instalações em prédios separados.

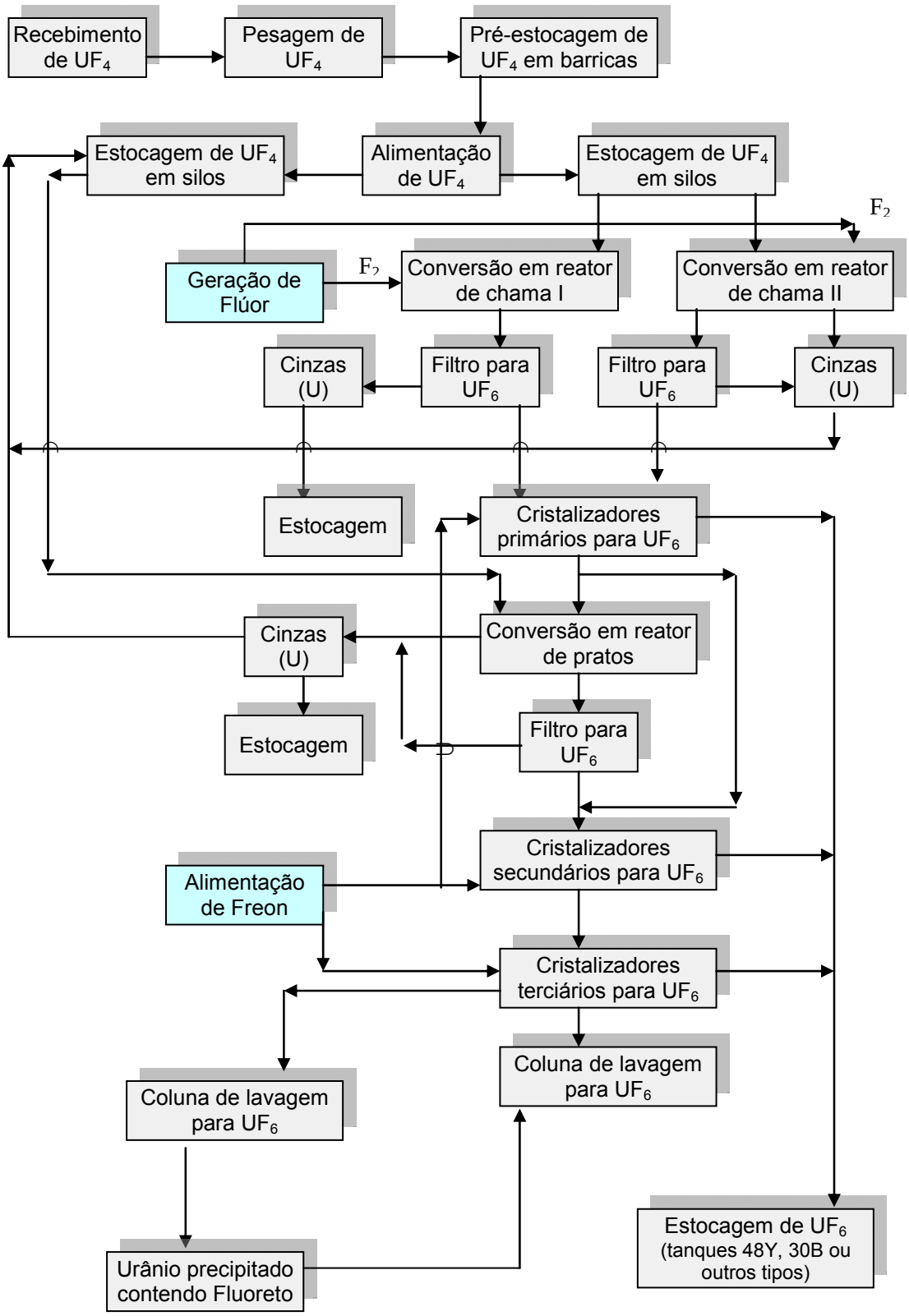


FIGURA 32 - Fluxograma da uusina de produção de UF_6. com as unidades de geração de flúor e alimentação de gás freon Integradas.

Vale lembrar que a metodologia desenvolvida neste trabalho de descomissionamento englobou a Planta para Produção de UF_6, a Unidade Geradora de Flúor, e Unidade de Alimentação de Freon, que foram diferenciadas e descritas separadamente. A unidade de Transferência, por ser uma instalação simplificada não foi detalhada.

4.1. - Recomendações e Normas de Descomissionamento Aplicáveis às Instalações do Ciclo do Combustível Nuclear

Cabe salientar que nesta unidade não foram aplicados os procedimentos que são recomendados para a desativação de uma instalação nuclear deste tipo. A unidade foi mantida parada por mais de treze anos, sem uma limpeza prévia das linhas de carga e descarga, contendo uma quantidade significativa de UF_6 e/ou HF no interior dos cristalizadores e dutos em geral.

Fato agravante foi que no intervalo de não operação da usina não houve manutenção e vários equipamentos importantes foram retirados, o que impediu o seu funcionamento imediatamente antes da desmontagem, para fins de diagnóstico, identificação de problemas ou limpeza.

Devido a estas circunstâncias, foi necessário planejar e propor mecanismos e procedimentos de manipulação de compostos de Flúor (estáveis) e compostos de urânio (radioativos), em instalações com processo de corrosão acentuado, com risco aumentado para acidentes, exposição e contaminação ocupacional.

Para fazer um descomissionamento em uma unidade deste tipo, com capacidade de produzir até 20 $kg.h^{-1}$ de U, em hexafluoreto de urânio natural seria necessária uma equipe treinada, de preferência pertencente ao grupo técnico do IPEN. Como a maioria dos técnicos e engenheiros que operaram esta unidade não trabalham mais na Instituição ou foram transferidos para outros projetos, foi necessário contratar uma empresa externa.

No mercado brasileiro procurou-se uma empresa com experiência em desmontagem, com especialização na área nuclear e manuseio com produtos químicos corrosivos, porém não existia no mercado qualquer empresa que atendesse estas exigências. Optou-se pela contratação de uma empresa com grande experiência em desmontagem industrial, e foi imprescindível preparar treinamentos específicos nas áreas de interesse e oferecer aos funcionários da empresa contratada.

4.2 - Alimentação de Freon

Na operação da usina a utilização de Freon foi de vital importância na captura do UF_6 dentro dos cristalizadores. Após a reação do F_2 com o UF_4 é produzido o UF_6 gasoso que é direcionado para os cristalizadores. Dentro dos cristalizadores existe um feixe de tubos que recebe o Freon R12, a uma temperatura de -14°C. O UF_6 que estava no estado gasoso passa ao estado sólido. Tecnicamente, diz-se que ele foi capturado no interior do cristalizador.

Para se fazer o descarregamento do UF_6 cristalizado em tanques 48Y, mostrado na FIG.33, usou-se o processo inverso, no qual se utilizou Freon R113, à temperatura de (80±2)°C, que fez a transformação de cristais em líquido, utilizando-se uma pressão de 3,5kg/cm^2, e transferindo-se o material para os tanques de armazenamento.

FIGURA 33 - Tanque 48Y para armazenar UF_6

4.3. – <u>Unidade de Tranferência de UF_6</u>

O objetivo principal da unidade de Transferência de UF_6, durante as operações do Ciclo do Combustível, era o de homogeneizar, amostrar e transferir UF_6 sob forma líquida dos cilindros 48Y e 30B para ampolas de amostragem tipo 2S ou, sob a forma gasosa, de cilindro tipo botijão de gás para cilindro do tipo 5A.

O processo de amostragem e transferência era dividido nas seguintes subunidades.

- Recebimento
- Aquecimento
- Amostragem/transferência
- Limpeza

Os equipamentos envolvidos nestas operações eram:

- Balança Digital com capacidade 500 kg e sensibilidade de 200 g
- Caldeira
- Balança tipo plataforma com capacidade para 22.500 kg e sensibilidade de 2 kg
- Conjunto Pórtico/talha com capacidade para 16000 kg
- Caldeira Elétrica
- Autoclave

Para cilindros 48Y e 30B utilizava-se caldeira elétrica, que produzia vapor a 125 ºC a uma pressão de 2,5kgf/cm^2. Este vapor gerado era utilizado por meio de um radiador interno, do tipo autoclave, para o aquecimento do cilindro com UF_6. Para o aquecimento de cilindros menores, do tipo botijão de gás GLP, utilizavam-se cintas de aquecimento (unidade adaptada e transformada em deposito de armazenamento)

4.4 - Unidade de Produção de UF_6.

O hexafluoreto de urânio é produto de uma reação química, tendo como reagentes, o flúor elementar (F_2) e o tetrafluoreto de urânio (UF_4). O processo químico inicialmente foi realizado em dois estágios, o primeiro no reator de chama e o segundo no reator de pratos.

As principais condições do reagente UF_4 usado na produção de UF_6, usando reator de prato ou de chama são apresentadas na TAB..3

Tabela 3 Principais condições do UF_4 usado na produção de UF_6

	Reator de Chama	**Reator de Pratos**
Forma Física	Pó	Granulado+Pó
Teor de UO_2F_2	7% Max	**
Teor de UF_4	92%	**
Teor de UO_2	1,5%max	**
Teor de H_2O	0,5%max	0,5%max
F_2 Elementar Gasoso	HF 3%	temperatura 100°C
Densidade	1,5g/cm^3	1g/cm^3
Granulometria	50 a 80 mesh	80mesh
Embalagem	Bombonas 50 kg	Bombonas 50 kg

O tetrafluoreto de urânio era alimentado nos silos de estocagem intermediários , por meio de calhas vibratórias , em bateladas de 30 a 50 kg . A capacidade de estocagem em cada silo era de 500 kg, porém, para se evitar problemas de permanência do material por tempo mais prolongado. Usou-se 50% do previsto, em ambos os silos, através de roscas dosadores (superior e inferior), o material é introduzido nos reatores de chama e pratos.

No caso do reator de chama, mostrado na FIG.34, o UF_4 era alimentado estequiometricamente, e o flúor com excesso de 20 a 30%. Já o reator de pratos,

mostrado na FIG.35, que apresenta característica funcional diferente do reator de chama, era alimentado com excesso de UF_4, em relação ao estequiométrico do flúor.

FIGURA 34 Reator de chama da usina de UF_6

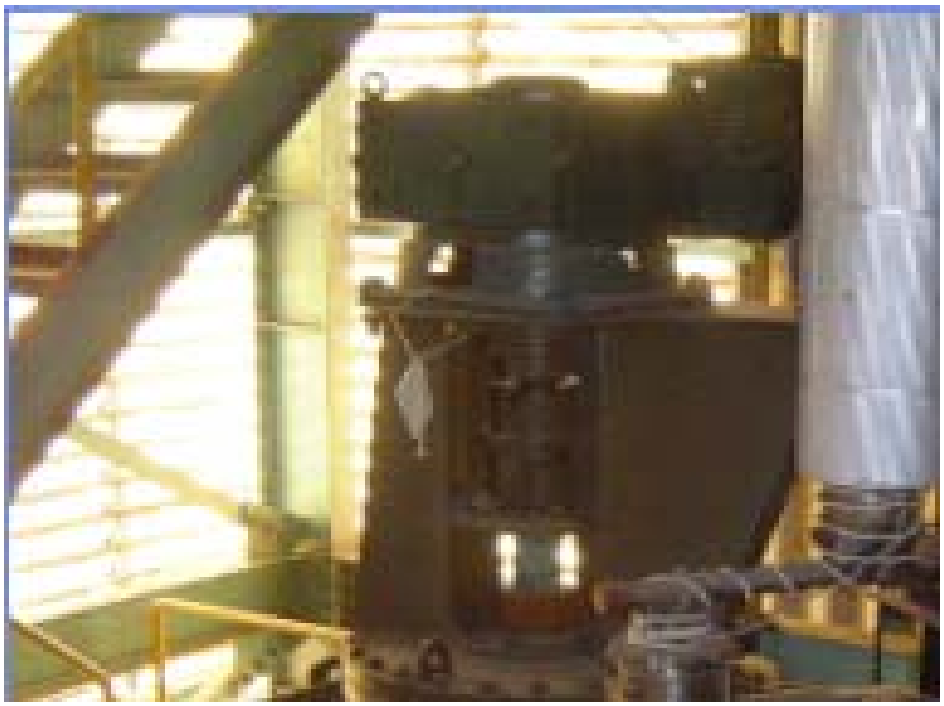


FIGURA 35 - Reator de pratos da usina de UF_6

Convém destacar que o reator de pratos consumia UF_4 com granulometria diferente do reator de chama consumindo, inclusive, mistura de UF_4 e cinzas. Isto porque ele é um reator de aproveitamento do excesso de Flúor proveniente da reação química representada pela equação 4 ,realizada a 500°C.

$$UF_4 + F_2(g) \rightarrow UF_6(g) \quad ; \quad \Delta H_{reação} = 108x10^3 \text{ BTU lbmol}^{-1} \qquad (4)$$

Inicialmente o reator de chama e o reator de pratos eram aquecidos com ar quente circulando na camisa, até atingir a faixa de 450 à 500 ºC ; enquanto que o circuito de freon R12 , já estaria ligado para que as baterias de cristalizadores primários estivessem à temperatura superior a -14°C. .Dispondo de todos os equipamentos auxiliares em funcionamento (coluna de lavagem, aquecimento das linhas, condensadores de HF) o UF_6, após passar pelo sistema de filtragem não deveria mais conter flúor, mas apenas UF_6 ,HF e N_2. Todo UF_6 depositava-se nas armadilhas dentro dos cristalizadores primários e uma pequena quantidade de UF_6 gasoso flua para colunas de lavagens de UF_6, mostrada na FIG.36.

FIGURA 36 - Colunas de lavagem da usina de UF_6

Neste estágio toda massa de UF_6 era conhecida, mediante leitura no painel de controle das células de cargas.

O UF_6 retido nos cristalizadores primários, mostrados na FIG. 37, também se encontrava no estado sólido.

FIGURA 37 - Cristalizadores primários com etiqueta de identificação

Para a retirada do material era necessário que se fizesse esta massa passar por uma mudança de fase, ou seja, de sólido para líquido. Para que isto acontecesse introduzia-se um fluxo de Freon R113 quente (85 a 90C°), que fluia pelo feixe tubular no interior do cristalizador, permitindo que todo sólido se transformasse em líquido. A operação era lenta e só se podia iniciar o aquecimento, quando o equipamento estivesse à temperatura ambiente.

O tempo necessário para deixá-lo em condições de descarga era de 5 a 7 horas, a uma pressão de 3,5kg /cm^2. As cargas máximas nos cristalizadores primários eram de 800 kg e nos secundários de 300 kg de UF_6, respectivamente .Qualquer anormalidade no controle de pressão e temperatura a solução imediata erai diminuir ou desligar o aquecimento do sistema de Freon e verificar os instrumentos de medida (manômetros e sensores de temperaturas).

A temperatura no interior dos reatores de chama era fundamental para fazer fluir cinzas, flúor e traços de HF, para o sistema de filtragem, onde as cinzas eram totalmente retidas ; enquanto que o UF_6 ao entrar no cristalizador , depositava-se nas partes frias. No cristalizador que se encontrava à temperatura de -15C°, nem todo F_6 passava da fase gasosa para sólida, 1% em peso conseguia sair juntamente com os gases flúor e HF.

No reator de pratos era efetuado o 2º estágio da reação química, utilizando o flúor proveniente do reator de chama e UF_4 com granulometria diferente da reação anterior (sistema contra corrente). Todo flúor era consumido nesta reação química, porque se alimentava UF_4 em excesso no reator. Este equipamento não foi utilizado durante a operação da usina, sendo usado apenas em testes experimentais..

O valor do excesso de UF_4 era estipulado durante a operação, porque caso o flúor continuasse saindo na coluna de lavagem UF_6, seria necessário corrigir a alimentação de UF_4. Todo UF_6 produzido neste equipamento fluia para o sistema de filtragem. O UF_4 não reagido ia para um silo de estocagem e posteriormente para um coletor de cinzas, mostrado na FIG. 38 e em seguida era reciclado para o processo no próprio reator de pratos.

FIGURA 38 - Coletores de cinzas com etiqueta de identificação

O procedimento adequado aplicado a uma Usina de UF_6, antes de encerrar suas atividades, exige um processo contínuo de limpeza das linhas de carga e descarga de UF_6. Faz-se a difusão de nitrogênio inerte nas linhas, com o objetivo principal de forçar o deslocamento de todo o gás (UF_6) excedente, para os cristalizadores. A seguir faz-se a transferência do material contido nos cristalizadores para os tanques de armazenamento (48 Y). No ANEXO VI apresenta-se o fluxograma de Processo de Captura e Envase da Usina de Hexafluoreto de Urânio.

No caso da unidade alvo deste trabalho, estes procedimentos não foram seguidos na época por falta de uma política clara e objetiva das diretrizes por parte do Governo, com relação à continuidade ou interrupção das atividades do Ciclo do Combustível Nuclear no IPEN.

Os países desenvolvidos que exploram esta tecnologia utilizam pressão negativa, ou seja, dentro da instalação a pressão é menor que a pressão externa. Assim, quando acontece um vazamento este fica contido dentro da instalação,,que utiliza potentes exaustores e transfere o UF_6 para tanques especialmente preparados para este fim. Com isso evitam-se vazamentos para o meio ambiente. A unidade de produção do IPEN não utilizava este recurso, e, sim colunas de lavagem.

A usina de produção de UF_6 do IPEN, durante o tempo de operação utilizou quatro colunas de lavagem; duas para UF_6, uma para ácido fluorídrico (HF) e outra para flúor (F_2). Estas colunas trabalhavam com circulação de solução alcalina (KOH - 4 mol. L^{-1}), pH 11-12, em circuito fechado. À medida que o pH tendia a 8, a correção era realizada por um operador.

Após treze anos fora de operação algumas peças como bombas, motores e alguns equipamentos elétricos foram retirados da Usina para utilização em outros projetos. Diversos outros equipamentos pararam de funcionar devido ao tempo de inatividade

Em conseqüência destes problemas houve uma dificuldade muito grande para colocar uma das colunas de lavagem em operação, especificamente para o descomissionamento.

4.5 - Unidade de Geração de Flúor

A unidade geradora de Flúor foi estudada e apresentou questões diferentes daqueles da usina de UF_6. A unidade de geração de Flúor, quando da operação da usina, trabalhava com HF líquido, o que representa um risco maior na operação de descomissionamento.

Introduziram-se, para esta etapa do trabalho, equipamentos de segurança específicos para manuseio de HF líquido, tais como botas de nylon, luvas plásticas e macacão do tipo tychem. Avaliou-se com muita cautela o fluxograma da geração de flúor, que é apresentado nos ANEXO V e VI. Foram identificados

e sanados defeitos na válvula principal da Célula Eletrolítica. Com este procedimento foi possível fechar as linhas de transporte de F_2.

4.6 - Descrição da Utilização do Conjunto, Flange Cega com Junta de Teflon, mais Coluna de Lavagem

No procedimento aqui estabelecido, antes de se abrir uma tubulação contendo UF_6, separam-se, previamente, as flanges cegas (sem furos) e as juntas de teflon adequadas. Liga-se a coluna de lavagem, para absorver o UF_6 que ao entrar em contato com a umidade forma UO_2F_2. A tubulação que foi aberta ficou vedada com a utilização deste equipamento, sem perigo de apresentar qualquer vazamento. Todas as tubulações de carga e descarga foram desmontadas e isoladas com flanges cegas e juntas de teflon. Esta etapa foi minuciosa e executada com segurança e com EPI's adequados.

As descargas de solução contendo urânio gerado nas colunas de lavagem foram controladas, armazenadas em bombonas de polietileno, e enviadas ao depósito de Salvaguardas. Durante o período de descomissionamento esta Usina foi inserida no Programa de Monitoração de Efluentes, que é mantido em escala rotineira há longos anos no IPEN

4.7 - Avaliações e Considerações Diversas

No período de aproximadamente 13 anos em que as unidades estiveram paradas, alguns equipamentos ficaram totalmente expostos às condições ambientais. Desta forma, tornou-se importante identificar pontos de corrosão, para avaliar o desgaste que tais equipamentos sofreram devido aos produtos neles contidos e também avaliar o desgaste relativo ao tempo em que a unidade ficou desativada.

Elaborou-se a avaliação de todos os equipamentos, acessórios e linhas de carga e descarga e silos de estocagem. Enfim, todos os componentes foram submetidos ao diagnóstico visual e teste de raspagem e ranhuras e resistência à punção.

Como se Identificou a presença de compostos de urânio e flúor, os materiais foram catalogados *in loco* ainda montados, descritos, identificados por códigos e etiquetados. Foram então avaliados para posterior manipulação, manejo, transporte e armazenagem, segundo os padrões exigíveis. Neste diagnóstico, foram identificados quais itens deveriam ser submetidos à limpeza externa, prévia ao manuseio.

A partir do diagnóstico elaboraram-se os procedimentos a serem seguidos na manipulação, determinando-se se o corte, ferramentas e proteção, caso a caso.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras pesquisas realizadas para o descomissionamento da usina de UF6, tiveram início em novembro de 2004. Fizeram-se as primeiras avaliações sobre descomissionamento, estudandos-se como outros países encontravam-se com relação a este tema. Fez-se um levantamento bibliográfico sobre como este assunto era tratado em países como os EUA, Alemanha, Espanha, Rússia, entre outros..

Verificou-se que o mundo se encontrava adiantado nesta área, porém em reatores de pesquisas, onde mais de quatrocentas unidades teriam sido descomissionadas. Não se encontraram informações importantes sobre descomissionamento de unidade produtora de UF_6.

Como a unidade em questão é a única no país, apresenta características especiais e sua produção foi interrompida de maneira incorreta, tornou-se um desafio descomissionar esta unidade sem comprometer o meio ambiente, trabalhadores e pessoas do público.

A maior preocupação foi com o ácido fluorídrico (HF), na forma de gás ou líquido, o qual é extremamente corrosivo e perigoso, podendo causar a morte em humanos, quando inalado em grandes quantidades. Convocou-se o Serviço Médico, o Servico de Engenharia e Seguranca do Trabalho, o Servico de Proteção Radiologica e o Servico de Protecao Fisica, para apresentarem planos individuais com aplicação no descomissionamento desta usina.

O Serviço de Engenharia e Segurança do Trabalho (SEST) preparou planos especiais, treinamentos e especificação dos EPI's necessários à empresa contratada. O Serviço de Proteção Radiológica (SPR) preparou um plano para área controlada e aplicou treinamento aos trabalhadores com material radioativo. O Serviço de Proteção Física (SPF) fez o planejamento e forneceu a estrutura necessária para aplicação dos seguintes procedimentos:

- Avaliação Preliminar

- Limpeza Geral da Usina

- Levantamento Radiométrico da Usina

- Identificação e Etiquetagem dos Itens.

Fez-se, inicialmente, um inventário físico de todos os equipamentos e materiais importantes sob o ponto de vista do material nuclear contido neles e da funcionalidade da planta , como mostrado na TAB 4.

TABELA 4 - Relação dos Equipamentos mais importantes da Usina de UF_6

Especificação	**Quantidade**	**Material Contido**
Calhas vibratórias para alimentação de UF_4 nos Silos	2	UF_4
Reator de Chama	2	UF_4
Filtros microporosos	3	UF_4
Elevador de barricas	1	UF_4
Cristalizador primário	3	UF_6
Cristalizador secundário	3	UF_6
Coluna de lavagem de gases UF_6	2	Solução contendo urânio
Silos para estocagem intermediária de UF_4	2	UF_4
Silos intermediários para coleta de Cinzas no reator de pratos	1	Material não reagido no processo (UF_4)
Reator de pratos	1	Cinzas+UF_4
Coletor de cinzas	3	Material não reagido (UF_4)
Pontos para engate de cilindros de Estocagem de UF_6	2	UF_6 Cristalizado
Cilindro 48Y(armazenamento UF_6)	1	UF_6 gás/ cristalizado

Todos os materiais inventariados receberam uma etiqueta com o nome do equipamento , taxa de exposição , material contido no mesmo, FIG. 39.

Nome: Reator de Chama	**Nº etiqueta**: 005
Descrição: Equipamento usado na reação química UO_2F_2	
Número patrimônio: 52432	
Material Contido: UF_4	
Taxa de Exposição: 1,5μs/h	
Localização: Primeiro Pavimento	**Data** 23 / 04 / 06

FIGURA 39 - Modelo de Etiqueta de Identificação

Todas as tubulações que conduzem gases e outros produtos usados possuem cores diferenciadas, detalhe que facilitou muito a operação durante o desmantelamento. Mesmo assim, alguns procedimentos foram adotados antes de se iniciar o descomissionamento, como a identificação do contaminante potencial e em qual equipamento se encontrava.

Foram identificados: UF_6 gás (a); UF_6 Cristalizado (b) e UF4 Não Reagido (c). Estes contaminantes foram encontrados em diferentes locais:

(a) e (b): Cristalizadores Primários

(b): Linhas de Cargas e Descargas

(c) Reator de Chama e Linhas Auxiliares

A empresa contratada forneceu alguns equipamentos de proteção individuais (EPI's), porém o IPEN adquiriu novos equipamentos para se enquadrar dentro das normas do Ministério do Trabalho. Entre esses se citam capacetes, mascaras, cintos de segurança, sistema de filtragem de ar, escafandros e outros produtos. Antes do início de qualquer trabalho foram feitos testes a frio ou simulações com os equipamentos novos. Nas FIG. de 40 a 48 apresentam-se os EPI'S usados no descomissionamento da Usina de UF_6.

MACACAO·TYCHEM·BR,ZIPER,PALA·C/FITA·ADES·G·95127 DUPONT·¶ ¶ ¶	EST·FILTRANTE·AR·COMPRIMIDO·HERCLEAN·4·SAIDAS·¶ ¶ ¶ ¶
FIGURA 40 - Macacão Tychem BR ,com Zíper ,Resistente a Ácido Fluorídrico (HF)	FIGURA 41 - Estação Filtrante para Ar Comprimido com 4 Saídas

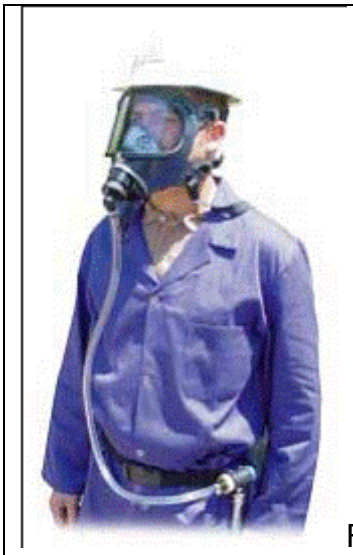


FIGURA 42 - Máscara Facial Inteira em Borracha

CINTO·PARAQ/NYLON/ACOLCHOADO·C/REGULAGEM· ¶	OCULOS·AV·L·UNICA·POLIC·IN·C/ELAS·SPLASH·GOGGLEGEAR·AEARO·¶ - ¶
FIGURA 43 - Cinto Paraquedista em Nylon com Regulagem	FIGURA 44 - Óculos AVL Policarbonato com Elástico

FIGURA 45 - Máscara com Filtro	FIGURA 46 - Capacete Vermelho MSA
FIGURA 47- Luva de Raspa	FIGURA 48 - Luva de PVC com Forro

5.1 - Aplicação de Cursos de Treinamentos e Exames Médicos aos Funcionários da Empresa Contratada.

Todos os funcionários da empresa contratada (Eletrotal) foram examinados e foram atestadas suas condições de saúde antes e após o término dos trabalhos. Foi solicitada ainda coleta de urina para avaliar a presença de urânio antes e depois do descomissionamento. Foram aplicados treinamentos aos funcionários em Radioproteção, utilização de roupas especiais e trabalhos com HF.

Em nenhum dos exames solicitados aos funcionários houve quaisquer problemas advindos do trabalho realizado.

5.2 - Desmontagem da Usina de UF_6

Fizeram-se várias consultas aos operadores e engenheiros para estimar a quantidade de UF_6 contida no interior dos dutos e reatores da usina. Chegou-se à conclusão que aproximadamente 300 kg de UF_6 se encontravam no interior da instalação.

Depois de vários estudos, investigação e planejamento, o trabalho teve início com a desmontagem da proteção lateral que dava acesso aos cristalizadores primários e secundários. Na FIG 49 apresenta-se a vista lateral da usina, já sem a parede protetora, possibilitando o acesso. aos cristalizadores primários e secundários. Já na FIG. 50 mostra-se a mesma instalação após a retirada dos cristalizadores secundários, os quais foram transferidos para o depósito de armazenamento.

FIGURA 49 - Usina de UF_6 sem a proteção lateral e com o acesso aos cristalizadores

FIGURA 50 - Usina de UF_6 com Retirada Total da Proteção Lateral, após a Remoção dos Cristalizadores Secundários

Após a retirada dos citados cristalizadores secundários, foi possível fazer o isolamento das linhas dos cristalizadores primários e outras linhas. Para isso foi necessária a utilização de alguns equipamentos especiais, porque nesta etapa começaram a aparecer sinais da presença de UF_6 cristalizado, que apresenta um sério problema, pois ao entrar em contato com a umidade transforma-se em UO_2F_2, formando uma densa nuvem branca. Com extremo cuidado foi feita a retirada dos cristalizadores primários, local da planta onde se encontrava a maior quantidade de UF_6 presente na unidade.

Esta operação de retirada dos cristalizadores primários foi dificultada pelos defeitos apresentados nas válvulas principais que serviam para controlar a passagem de UF_6. O tempo gasto para sanar todos estes problemas foi de aproximadamente dois meses. Na FIG 51 apresenta-se a imagem do momento da operação de isolamento de um cristalizador primário, para posterior retirada.

FIGURA 51 - Operador da empresa Eletrotal isolando conexões do cristalizador primário, em preparação para a retirada

Na FIG. 52 mostra-se a o trabalho realizado com a válvula que apresentou defeito no momento da desmontagem.

FIGURA 52 - Válvula com defeito em um cristalizador primário

Após a retirada dos cristalizadores primários, foram retirados os reatores de chama e o reator de pratos, apresentado na FIG.53.

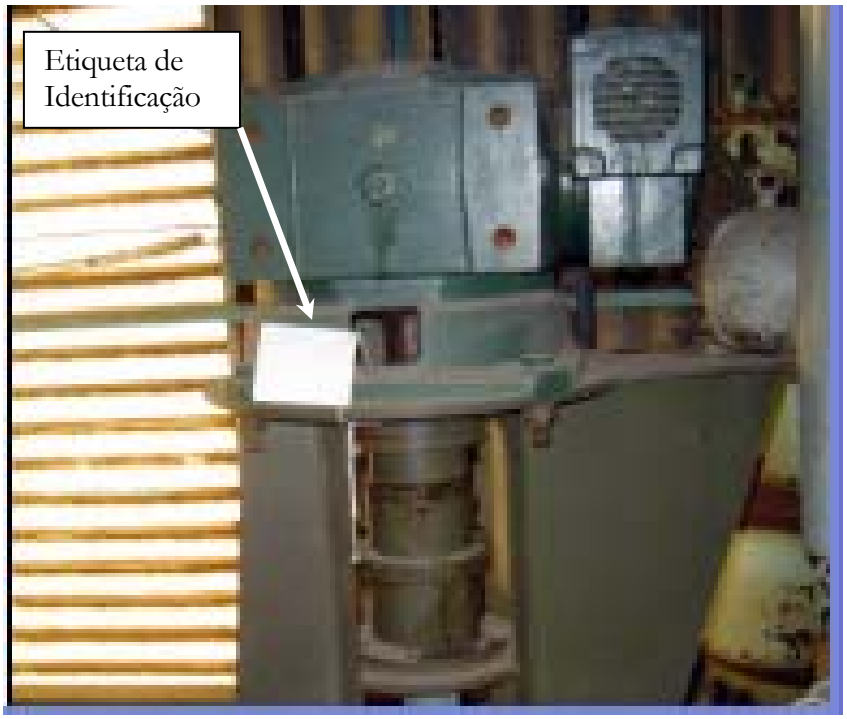


FIGURA 53 - Reator de pratos

Em seguida foram examinados e desmntados os filtros intermediários, coletores de cinzas e os condensadores de HF, mostrados na FIG 54.

FIGURA 54 - Condensadores de HF com etiqueta de identificação

Para efetuar este procedimento foram usados acessórios específicos, planejados e desenvolvidos nas oficinas do IPEN,. Os principais acessórios incluem flange metálica cega, junta de teflon e cone de madeira, de vários tipos ou vários tamanhos. Tais acessórios foram elaborados nas diversas bitolas das linhas e dutos existentes. Esses acessórios foram construídos, em tempo hábil, após o processo de identificação e durante a desmontagem. Nas FIG. 55 e 56 mostram-se alguns acessórios empregados.

FIGURA 55 - Junta cega de teflon

FIGURA 56 - Flange cega metálica

As FIG. 57 e 58 apresentam a seqüência final do desmantelamento das estruturas metálicas das instalações da Usina de UF_6.

FIGURA 57 - Operação de desmantelamento.

FIGURA 58 - Operação final de desmantelamento.

5.3. Desmontagem da unidade de Geração de Flúor

Foram introduzidos equipamentos de segurança específicos para trabalhos com HF líquido, tais como botas de nylon, luvas plásticas e macacão do tipo tychem. Foi avaliado com muita cautela o fluxograma da geração de flúor, que é apresentado no ANEXO VII. Foram identificados e sanados defeitos na válvula principal da célula eletrolítica. Com este procedimento foi possível fechar as linhas de transporte de F_2. Na FIG. 59 apresenta-se a célula eletrolítica, antes do descomissionamento.

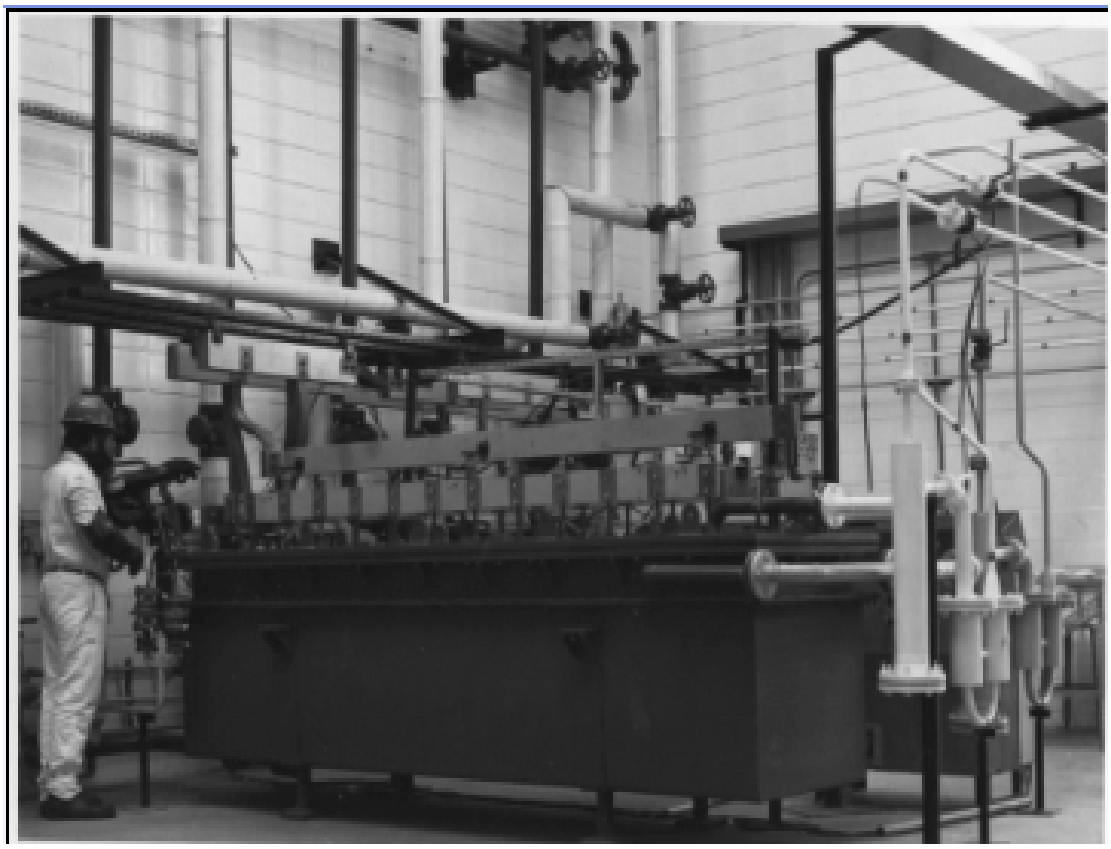


FIGURA 59 - Célula eletrolítica geradora de flúor

Para as linhas de transporte de F_2 foram feitos diversos isolamentos utilizando válvulas e outros acessórios, tendo sido o objetivo atingido, que era o de se fazer o descomissionamento sem agressão ao meio ambiente, aos operadores e ao público em geral.

No ANEXO VIII apresenta-se o fluxograma de purificação e tratamento de gases. Várias pessoas que operaram e que desenvolveram e montaram a unidade foram consultadas. Alguns testes foram realizados para definir quantidades de material existente no interior das linhas e equipamentos da unidade.

A célula eletrolítica foi retirada como primeira opção por não apresentar problema aparente. Em seguida foram analisadas as linhas de transporte de F_2 para a Usina de UF_6, nas quais se identificou a ocorrência de refluxo (retorno de material). Detectado este problema fez-se o isolamento destas linhas com flange cega mais junta de teflon. Superada esta situação, foi dada continuidade à finalização desta operação de descomissionamento da usina de geração de flúor.

5.4 - Desmontagem da unidade de Freon

A unidade de Freon gerou providências diferenciadas, com relação ao tipo de material e tipo de equipamentos usados. O Freon é muito pirofórico. Foi notada a presença de material dentro dos tanques cuja quantidade se estimou serem 600 litros. Fez-se a transferência do material (freon) para tambores metálicos e estes foram removidos para o depósito de armazenamento de produtos químicos.

Em toda esta operação foram utilizadas ferramentas de corte a frio, para evitar aquecimento das tubulações e diminuir significativamente o risco de explosão.

. A unidade de freon, vista na FIG. 60, continha compressores de freon a quente e a frio, porém o material encontrava-se em sua maior parte em um tanque externo e em alguns tanques intermediários.

FIGURA 60 - Unidade de freon.

Do modo como se realizou o trabalho da transferência do freon para outros recipientes não ocorreram incidentes consideráveis. A desmontagem teve início pelos compressores R12/113, os quais são mostrados na FIG. 61.

FIGURA 61 - Compressores R113 da unidade de freo

5.5 - Aplicação de Salvaguardas

A aplicação de salvaguardas no descomissionamento foi muito importante, sob o ponto de vista de controle de UF_6 dentro da instalação.

Após a parada da usina de produção de UF_6, não houve uma definição clara da direção do IPEN sobre a continuidade ou não da produção de UF_6, fato que impediu o Serviço de Salvaguardas (SS) de calcular o material (urânio e seus compostos) dentro da Unidade.

Com poucos anos de inatividade algumas peças foram retiradas, outras desativadas, inclusive as células de carga que impediu que o SS aplicasse contabilidade nesta Instalação.

5.6 - Aplicação de Proteção Física e Inventário Físico

No descomissionamento os equipamentos, acessórios e suportes foram incluídos no Inventário Físico (IF), a fim de se determinar o Material Não Contabilizado (MNC). A freqüência da verificação foi diária e os procedimentos para a realização do inventário físico foram estabelecidos no respectivo planejamento. O MNC foi determinado pela seguinte expressão:

$$MNC = Fi + E - S - Ff \qquad (5)$$

Onde:

Fi= inventário físico inicial no tempo ti.
E= soma das variações de inventário que representem acréscimos (entradas) ao inventário para período considerado.
S= soma das variações de inventário que representem decréscimos (saídas) do inventário para o período considerado.
Ff= inventário físico final no tempo tf.

A coordenação do descomissionamento estabeleceu, manteve e executou os seguintes procedimentos para a realização do inventário físico:

a) descrição das funções e responsabilidades do pessoal envolvido no inventário;

b) especificação da necessidade ou não, de interrupção das atividades na área de balanço de material, bem como da retirada de material nuclear do processo;

c) localização, listagem e identificação de cada item de inventário;

d) definição dos métodos de medidas;

e) Estimativa da quantidade de material nuclear associados a cada item de inventário, excetuando-se aqueles itens para os quais a validade da medida anteriormente feita puder ser assegurada pelo uso de dispositivos de contenção

ou equipamentos de vigilância, quando poderão ser mantidos por técnicas de amostragem;

f) ajuste dos registros ao inventário físico e determinação do MNC

A proteção e a segurança dos materiais, equipamentos e acessórios durante o descomissionamento foram de vital importância, para se evitarem desvios e o acesso de pessoas não autorizadas.

Para tal objetivo foi elaborado um plano abrangente para proteção de materiais e equipamentos da usina e da empresa contratada. Este plano incluiu o isolamento de toda área em volta das unidades que foram submetidas ao descomissionamento.

Em seguida foi elaborada uma relação com nomes de todas as pessoas autorizadas a ter acesso à área. Foi estabelecido um horário de trabalho (8:00 ás 17:00 horas) e neste período foi mantida uma vigilância efetiva, de modo a se controlar o acesso das pessoas, obedecendo a lista pré-estabelecida . No período da noite foi mantido o isolamento da área e inspeções hora/ hora no local, pela guarda do IPEN. A ocorrência de casos não estabelecidos anteriormente foi resolvida pelo coordenador.

5.7 - Procedimentos de Proteção Radiológica

Vários estudos demonstram claramente que a exposição à radiação faz parte de algumas atividades humanas. O desenvolvimento tecnológico se, por um lado contribui para a melhoria da qualidade de vida em termos sociais e econômicos, por outro pode aumentar o risco de exposição à radiação. Algumas atividades humanas estão, portanto, diretamente relacionadas com a exposição à radiação.

Assim, é importante conhecer-se a dose e o risco inerente a todas as práticas que envolvem os materiais nucleares e radioativos, para que se possa avaliar conjuntamente o benefício ou detrimento advindo da prática e analisar o custo necessário para minimizar o risco.

No Brasil, existe uma regulamentação relativa às atividades humanas envolvendo fontes naturais e artificiais de radiação, que contempla a fiscalização das Instalações que manuseiam radionuclídeos naturais associados ao ciclo do combustível nuclear.

A norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear,Licenciamento de Instalações Radiativas, “CNEN-NE-6.02”, de outubro de 1984 (CNEN, 1984), estabelece que estão isentas de processo de licenciamento as instalações que envolvam, em qualquer instante: (a) substâncias radioativas com atividade específica inferior a 100 Bq g-1 e (b) radionuclídeos cujas atividades totais, dentro de cada classe, não excedam os seguintes valores: classe A, 0,1 mCi (3,7×103 Bq); classe B, 1 mCi; classe C, 10 mCi e classe D, 100 mCi. Os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{232}Th são considerados classe A, ou seja, sua radiotoxicidade é muito alta.

Outra norma da CNEN, “Gerência de rejeitos radioativos em Instalações Radiativas”, CNEN-NE-6.05, publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 17 de dezembro de 1985, estabelece que rejeitos sólidos podem ser eliminados no sistema de coleta de lixo urbano, desde que a sua atividade específica não exceda 7,5×104 Bq kg^{-1} (CNEN, 1985).

A norma “Diretrizes Básicas de Radioproteção, CNEN-NE-3.01”, de 1988, estabelece limites para trabalhadores e o público, no que concerne à exposição à radiação devida às instalações nucleares e radioativas (CNEN, 1988).

No descomissionamento desta Unidade, a aplicação de proteção radiológica se deu em todas as etapas do processo, desde o início das execuções até o armazenamento final de todos os componentes. Em concordância com o Serviço de Radioproteção do IPEN elaborou-se um plano completo, de modo a cumprir as exigências normativas da CNEN.

No plano de Radioproteção elaborado foram adotadas as seguintes ações: monitoração de área, monitoração ambiental e monitoração pessoal. O processo contou com a supervisão de radioproteção já estabelecida na

Instituição, sendo gerados relatórios periódicos. Em nenhum momento durante a operação de descomissionamento se detectou a presença de radionuclídeos que contrariasse qualquer uma das normas da CNEN.

5.8 - Análise e cálculo financeiro do processo de descomissionamento da usina de UF_6

Em qualquer descomissionamento do ciclo nuclear o custo financeiro é muito importante. Desta forma, procurou-se desenvolver este trabalho dentro de uma meta bem estabelecida, relacionando-se os participantes da operação aos custos advindos do trabalho por eles exercido, como mostrado na TAB.4.

A opção pela utilização de veículos do IPEN em todas as etapas deste trabalho, foi com o objetivo principal de se evitar contaminação radiativa em outros veículos, além de evitar contato de motoristas sem preparo para as atividades que foram realizadas. O custo com motoristas, combustível além da depreciação do custo dos mesmos, é apresentado na TAB. 5.

TABELA 5 Funcionários do IPEN envolvidas no descomissionamento da usina de UF_6(custo)

Empresa	**Função**	**Quantidade**	**Trabalho (Hora/dia)**	**Nível**	**Custo (R$)**
IPEN	Coord. Geral	1	8	S	17.400,00
IPEN	Supervisor Radioproteção	1	1	S	8.200,00
IPEN	Médico do Trabalho	1	1	S	1.056,00
IPEN	Enfermeira	1	1	S	843,00
IPEN	Técnico de Radioproteção	2	8	M	5 280,00
IPEN	Técnico de Segurança	1	1	M	660,00
IPEN	Motorista de Ambulância	1	8	M	5.280,00
IPEN	Motorista de Caminhão	1	6	M	3.720,00
IPEN	Operador de empilhadeira	1	4	M	2.490,00
Contratada	Guarda de Segurança	3	8	M	3.930,00

TABELA 6 - Cálculo de custos com veículos usados no descomissionamento da usina de UF_6

Marca	Especificação	Tempo de Uso	Custo /Depreciação (R$)
Mercedes	Caminhão Munck	6 horas/dia	2 890,00
Renault	Ambulância	8horas/dia	6166,00
Hayster	Empilhadeira	8horas/dia	2 500,00

Como descrito anteriormente não foi possível encontrar no mercado empresa com especialização na área nuclear. Assim sendo o IPEN houve por bem realizar treinamento para que as pessoas envolvidas pudessem trabalhar com maior segurança. Isto acarretou um custo, apresentado na TAB.6.

TABELA 7 - Cálculo do custos com treinamentos realizados pelo IPEN, para (6) seis funcionários da Eletrotal

Empresa	**Tipo**	**Quantidade (fase/pessoas)**	**Duração (horas)**	**Custo (R$)**
Eletrotal	Radioproteção	1ª Etapa- 5	4	108.00
Eletrotal	Radioproteção	2ª Etapa- 5	4	108,00
Eletrotal	Uso Epi's	5	2	144,00
Eletrotal	Manuseio HF	5	1	144,00

Quando um trabalhador irá ter contato com material radioativo/nuclear, para evitar problemas futuros tornam-se necessários exames médicos antes e após a operação. Exames de urina são de fundamental importância, pois podem detectar a presença de urânio incorporado ao organismo.. A quantidade de exames realizados e seus custos são apresentados na TAB. 7.

TABELA 8 Cálculo do custo com exames realizados pelo IPEN em funcionários da Eletrotal

Empresa	Tipo de Exame	Quantidade/Pessoas	Custo (R$)
Eletrotal	Urina(det.Urânio)	6(1ª fase)	240,00
Eletrotal	Urina(det.Urânio)	5(2ªfase)	200,00
Eletrotal	Avaliação Médica	6(1ª fase)	144,00
Eletrotal	Avaliação Médica	5(2{ fase)	144,00

Fez-se a somatória dos valores apresentados nas tabelas de 4 a 7 e acrescentaram-se mais alguns custos da operação. Estes valores e o valor total gasto no descomissionamento da usina de UF_6 são mostrados na TAB. 8

TABELA 9 Cálculo do custo total com descomissionamento da usina de UF_6

Atividades	**Valores em R$**
Custo com o com contratação de Empresa	87. 200,00
Custo com Treinamento	504,00
Custo com pessoas do IPEN	48.859,00
Avaliações e acompanhamento médico	728,00
Aquisição de EPI'S pelo IPEN	13.600,00
Custo com veículos do IPEN	11. 556,00
Gasto total com o Descomissionamento	**162 447,00**
Gasto total em dólares	**US$ 101,529.37**

US$ 1.00 = R$ 1,60

Pelos valores financeiros aqui apresentados, notou-se que o custo total do trabalho de descomissionamento e desmantelamento ficou significativamente abaixo de valores citados para trabalhos semelhantes.

5.9 - Avaliação do Impacto Ambiental

Em vista do já exposto, tornou-se evidente a necessidade da avaliação do impacto radiológico ambiental ocasionado pela operação e descomissionamento da usina de UF_6. Estes cálculos foram realizados considerando-se as concentrações de atividade dos radionuclídeos de interesse para a estimativa da dose efetiva, devido à irradiação interna e externa. A avaliação do impacto radiológico ambiental foi executada, considerando-se os efluentes radioativos liberados ou termo-fonte e pelos resultados do Programa de Monitoração Radiológica Ambiental (PMRA) executado no IPEN.

As doses de radiação foram estimadas considerando-se as possíveis vias críticas de exposição à radiação proveniente da usina de UF_6: contaminação potencial das águas superficiais na área sob influência, potencial contaminação das águas subterrâneas e exposição externa.

5.9.1 - *Monitoração dos Efluentes Radioativos Líquidos na Fase Operacional do PROCON e Avaliação do Impacto Ambiental Decorrente.*

Todos os efluentes radioativos líquidos gerados nas instalações do IPEN, são estocados e controlados nos seus respectivos tanques de retenção ou em bombonas de polietileno. Estes efluentes estocados são amostrados representativamente e analisados para a identificação e quantificação dos radionuclídeos presentes.

Este processo também era realizado nos rejeitos líquidos das operações do ciclo do combustível nuclear. A partir da atividade radioativa determinada definia-se a condição de liberação ou o envio para o setor de rejeito (CNEN, 1985). Após a autorização da descarga, os efluentes eram eliminados no sistema de esgoto, que compreendia a rede de esgoto da Cidade Universitária, Córrego do Jaguaré a céu aberto e o Rio Pinheiros (CNEN, 1985; CNEN, 1988;

IPEN, 1995). No ANEXO IX mostra-se o sistema aquático do Rio Pinheiros sob influência do IPEN (IPEN, 1995).

Já na década de 1980, havia a completa ausência de vida aquática no Rio Pinheiros, em virtude da urbanização desordenada e das atividades humanas na área. Suas águas não eram empregadas para quaisquer fins de irrigação ou captação para tratamento e posterior abastecimento público. Algumas Indústrias, localizadas ao longo das margens do rio Pinheiros captavam suas águas para fins de refrigeração dos maquinários ou para uso em combate aos incêndios.

Na época, a via de contaminação que foi considerada, a partir da liberação dos efluentes líquidos pelo IPEN foi a dispersão e a sedimentação dos radionuclídeos no rio Pinheiros. A via de transferência principal foi a irradiação externa gama de indivíduos do público.

O grupo crítico estabelecido foi formado pelos indivíduos que trabalhavam nas áreas que continham os sedimentos dragados do rio Pinheiros, potencialmente contaminados. Estes indivíduos eram funcionários da Companhia de Eletricidade de São Paulo (Eletropaulo) ou SABESP e permaneciam próximos aos pontos de descarga dos efluentes, no rio Pinheiros (IPEN, 1995).

Na TAB. 9 é apresentada a atividade liberada nos efluentes radioativos líquidos, parte do termo-fonte anual, relativa aos efluentes gerados pelas instalações do IPEN no período compreendido entre 1984 e 1993, que inclui a fase operacional da Usina de UF_6.. Neste programa de monitoração de efluentes implantado, os efluentes líquidos radioativos gerados pelas unidades do ciclo do combustível também foram incluídos, monitorados e gerenciados sob o ponto de vista radiológico, segundo as exigências de proteção radiológica vigentes na época.

A estimativa da dose equivalente efetiva (H_e) no grupo crítico, por ano, decorrente da liberação dos efluentes radioativos líquidos pelo IPEN é também apresentada na TAB. 10

TABELA 10 - Atividade dos efluentes líquidos liberados por todas as instalações do IPEN-CNEN/SP e estimativa da dose equivalente efetiva (H_e) no grupo crítico, no período operacional do PROCON (IPEN, 1995)

Ano	Atividade Total Liberada ($Bq \times ano^{-1}$)	Dose Equivalente Efetiva ($mSv \times ano^{-1}$)
1984	$1,1 \times 10^{9}$	$1,3 \times 10^{-5}$
1985	$2,6 \times 10^{9}$	$5,1 \times 10^{-5}$
1986	$1,4 \times 10^{9}$	$2,8 \times 10^{-5}$
1987	$7,3 \times 10^{8}$	$5,1 \times 10^{-5}$
1988	$2,0 \times 10^{9}$	$2,7 \times 10^{-5}$
1989	$3,9 \times 10^{9}$	$5,6 \times 10^{-5}$
1990	$7,6 \times 10^{8}$	$6,8 \times 10^{-5}$
1991	$7,8 \times 10^{8}$	$5,6 \times 10^{-5}$
1992	$8,5 \times 10^{8}$	$8,0 \times 10^{-5}$
1993	$2,6 \times 10^{8}$	$3,3 \times 10^{-5}$

Adotando os dados do termo-fonte foi feita a avaliação do impacto causado no meio ambiente, empregando um modelo que descrevia a transferência dos radionuclídeos para o meio ambiente sob influência do IPEN (TILL & MEYER, 1983; USRC, 1977). Os fatores dosimétricos foram retirados da literatura pertinente (CORLEY e col., 1981; USRC, 1977). A dose equivalente efetiva, (H_e), também foi estimada, para o grupo crítico, decorrente da liberação dos efluentes radioativos líquidos, pelas Instalações do IPEN (IPEN, 1995).

Os radionuclídeos que mais contribuiram para a dose estimada no período foram o ^{60}Co e o ^{137}Cs, com 85% e 14%, respectivamente. O ^{238}U, radionuclídeo crítico nas operações do PROCON não teve contribuição significativa no período de 1984 a 1993, aqui discutido.

Os valores estabelecidos para a dose equivalente efetiva, apresentados na TAB. 10 foram considerados como insignificantes, sob o ponto de vista de proteção radiológica, pois estavam abaixo do nível de registro, que é igual a 1/10 do limite de dose anual máximo, admissível para indivíduos do público, que é 1 $mSv \times ano^{-1}$ (IPEN, 1995).

A estimativa para a dose equivalente efetiva, devido à exposição externa gama, decorrente da liberação dos efluentes radioativos líquidos na planta de UF_6, são considerados desprezíveis no período de 1985 a 1993, frente aos dados e discussões expostas acima, uma vez que esta integrou as instalações geradoras do termo-fonte.

5.9.2 - *Monitoração do Rio Pinheiros na Fase Operacional do PROCON e Avaliação do Impacto Ambiental Decorrente*

No período de 1988 a 1992, a quantidade cumulativa de radionuclídeos descarregada no rio Pinheiros, não excedeu a $8{,}3\times10^9$ Bq. Os radioisótopos contribuintes mais significativos para esta atividade foram: U natural ($2{,}7\times10^9$ Bq), ^{60}Co ($1{,}9\times10^9$ Bq) e ^{137}Cs ($4{,}8\times10^8$Bq) (Della Rocca e col. 1991).

Em 1992, o sedimento do rio Pinheiros foi coletado, num programa cooperativo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas. O rio foi dividido em 47 áreas de amostragem, estendida desde a junção com o rio Tietê até o Reservatório Billings (DELLA ROCCA, 1995).

Foram elaboradas, sob influência do IPEN, a caracterização do sistema aquático, a avaliação da dose nos indivíduos do público, decorrente da liberação de efluente líquido radioativo pelo IPEN e a reavaliação das vias de exposição possíveis para a situação enfocada.

O estudo empregou um modelo matemático que simulou o transporte e a transferência dos radionuclídeos, nos compartimentos ambientais de interesse. Empregou os dados do termo-fonte do IPEN (1988 a 1992) e a quantificação de radioisótopos nas amostras de sedimento da área de estudo (DELLA ROCCA, 1995).

Os resultados obtidos permitiram identificar os radionuclídeos críticos para cada via de exposição considerada. Não foi identificado um grupo crítico único, sendo que todos os grupos populacionais considerados receberam doses da

mesma ordem de grandeza. As vias críticas de exposição e os radionuclídeos críticos identificados são apresentados na TAB. 11

Pelo estudo observou-se que o ^{238}U é crítico para as vias de exposição relacionadas à ingestão. Para a inalação de sedimento ressuspenso, o ^{238}U é o isótopo mais representativo para a dose final, contribuindo com $2{,}50\times10^{-9}$ $mSv\times ano^{-1}$, conforme apresentado na TAB. 11 (DELLA ROCCA, 1995). No trabalho executado não foi possível definir um único grupo populacional crítico, que fosse representativo dos indivíduos que receberam os maiores níveis de dose, em decorrência da descarga rotineira de efluente radioativo líquido pelo IPEN.

O ^{238}U integrou a variedade dos radionuclídeos considerados com propriedades ambientais e dosimétricas particulares, na diversidade de usos que o sistema aquático sob influência do IPEN comportava na época.

Observou-se a distribuição praticamente homogênea da dose estimada entre os vários grupos populacionais, valores apresentados na TAB. 10 e a conseqüente possibilidade de se definir um único grupo crítico para a fonte em questão.

TABELA 11 - Radionuclídeos críticos por via de exposição, no sistema aquático sob influência do IPEN, decorrente da liberação de efluentes radioativos líquido, na época da operação das usinas.

Via de Exposição	**Radionuclídeo Crítico**	**Total - Dose Equivalente Efetiva (H_e) (mSv×ano^{-1})**	**^{238}U - Dose Equivalente Efetiva (H_e) (mSv×ano^{-1})**
Exposição externa ao sedimento no descarte	^{60}Co, ^{137}Cs, ^{228}Ra	$4,27\times10^{-7}$	$5,31\times10^{-11}$
Inalação de sedimento ressuspenso no descarte	^{232}Th, ^{234}Th, ^{228}Ra, ^{238}U,	$4,99\times10^{-9}$	$2,50\times10^{-9}$
Exposição externa ao sedimento na margem do rio Pinheiros	^{60}Co, ^{137}Cs, ^{228}Ra, ^{234}Th	$4,21\times10^{-8}$	$5,02\times10^{-11}$
Natação na Represa Billings	^{60}Co, ^{137}Cs	$5,82\times10^{-9}$	$5,67\times10^{-13}$
Ingestão de peixes	^{232}Th, ^{238}U, ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{228}Ra	$7,62\times10^{-9}$	$4,30\times10^{-10}$
Ingestão de produtos irrigados	^{232}Th, ^{228}Ra, ^{238}U, ^{60}Co, ^{137}Cs,	$7,04\times10^{-10}$	$3,12\times10^{-10}$

O estudo concluiu que a atividade radioativa descartada pelo IPEN, ao meio aquático, representou uma fração muito pequena da capacidade de recepção deste sistema. Resultou em doses no indivíduo do público bastante inferiores ao limite primário estabelecido em norma de radioproteção, incluindo o ^{238}U, radioisótopo mais significativo na operação da Usina de Produção de UF_6.

5.9.3 - *Monitoração dos Efluentes Radioativos Líquidos na Fase do Descomissionamento da Usina de UF_6*

No Programa de Monitoração de Efluentes Radioativos Líquidos, executado no IPEN, a amostragem representativa e a análise dos efluentes foram executadas em base rotineira, antes do descarte na rede de esgoto receptora (CNEN, 1985; CNEN, 2005a; CNEN, 2005b; CNEN, 2005c; NISTI & SANTOS, 2008).

O descomissionamento aqui apresentado foi inserido no Programa de Monitoração de Efluentes, já implantado, operacional e registrado com eficácia no Instituto. O cooordenador geral do descomissionamento recebeu relatórios periódicos, da supervisão de radioproteção sobre os efluentes gerados e analisados. Portanto, os efluentes radioativos líquidos gerados no descomissionamento da planta piloto de UF_6, integraram o programa de monitoração de efluentes do IPEN, executado em base rotineira.

A amostragem representativa do efluente no local onde é gerado, encaminhamento para análise, liberação ao sistema sanitário e acompanhamento é atribuição da Supervisão de Radioproteção no local. Tal atribuição foi prevista, negociada e reforçada no planejamento inicial dos trabalhos. Os resultados referentes ao período de 2004 a 2006 são apresentados na TAB 12

Os efluentes radioativos liberados foram avaliados segundo a regulamentação vigente (CNEN, 1985; CNEN, 2005a; CNEN, 2005b; CNEN, 2005c). Observou-se que a atividade total liberada foi de $8,5 \times 10^8$ Bq, $5,7 \times 10^8$ Bq e $2,7 \times 10^8$ Bq, respectivamente nos anos de 2004, 2005 e 2006.

Os radioisótopos que mais contribuíram para o termo-fonte no período deste descomissonamento, foram o ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{65}Zn e ^{67}Ga (NISTI & SANTOS, 2008). Estes radiosótopos não são encontrados nos rejeitos das instalações da unidade de UF_6 sendo, portanto, provenientes de outras instalações do IPEN.

TABELA 12- Atividade dos efluentes líquidos liberados por todas as instalações do IPEN e contribuição percentual, no período do descomissionamento da planta de UF_6

	Termo-Fonte		
Ano	**Atividade Total Liberada (Bq×ano^{-1})**	**Volume Total Liberado (m^3×ano^{-1})**	**Contribuição da Planta de UF_6 no termo-fonte**
2004	$8,5\times10^8$	550	< 2%
2005	$5,7\times10^8$	293	< 2%
2006	$2,7\times10^8$	406	< 2%

A atividade total liberada por ano, no período de 2004 a 2006 foi da mesma ordem de grandeza que a atividade total liberada no período de 1984 a 1993 (fase operacional da usina). Embora o Instituto tenha aumentado a produção de radiofármacos e radioisótopos no reator IEA-R1, muitas rotinas e instalações foram otimizadas, de modo a garantir a menor liberação de componentes radioativos nos efluentes liberados.

Verificou-se que os atuais Centro de Radifarmácia (CR) e o Centro do Reator de Pesquisa (CRPq) contribuíram com os percentuais maiores da atividade total liberada, em torno de 98%(NISTI & SANTOS, 2008).. A unidade piloto descomissionada integra o percentual de 2% restantes da atividade total liberada nos efluentes.

Os valores estimados para a dose equivalente efetiva, a partir das liberações apresentadas podem ser considerados como sendo zero, sob o ponto de vista de proteção radiológica, pois estão abaixo do nível de registro, que é igual a 1/10 do limite de dose anual máximo, admissível para indivíduos do público, que é 1 mSv×ano^{-1}.

Como as atividades de descomissionamento e desmantelamento da usina de UF_6 integraram menos que 2% dos efluentes radioativos liberados, conclui-se

que sua contribuição é insignificante para o termo-fonte no período de 2004 a 2006, período dos trabalhos apresentados nesta tese.

5.9.4 - *Qualidade da Água Subterrânea do IPEN relativa à Fase Operacional do PROCON*

O IPEN também mantém um Programa de Monitoração Radiológica Ambiental (PMRA-IPEN) sob execução. Neste programa são executadas as seguintes monitorações: águas subterrâneas de poços de monitoração, exposição gama no ar e monitoração de ar atmosférico.

Os poços têm profundidade média de 10 m e as amostras foram coletadas a aproximadamente 5m da superfície. Foram analisadas para a quantificação de cálcio, magnésio, sódio, potássio e ferro. Quantificaram-se também os ânions: cloreto, fluoreto, nitrito, brometo, fosfato, sulfato, carbonato bicarbonato e nitrato,. Fizeram-se, ainda, medidas de pH, temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD). As concentrações foram expressas em $mg \times L^{-1}$. Uma composição química das águas coletadas nos seis poços de monitoração do PMRA ,em um total de 17 amostras,pode ser observada na TAB. 12.(Santos ,2002),. A localização dos poços de amostragem está descrita na TAB.13

TABELA 13- Composição química da água subterrânea do PMRA-IPEN. (Santos ,2002),.

PARÂMETRO	AP01	AP02	AP03	AP04	AP05	AP06
pH	6,0	5,5	5,5	5,0	5,5	5,5
T (°C)	21,2	20,9	22,0	21,7	20,8	21,2
	Concentração ($mg \times L^{-1}$)					
Ca^{2+}	49,5	1,09	12,58	7,97	1,59	5,11
Mg^{2+}	6,78	0,24	1,09	0,52	0,82	0,64
Na^{1+}	2,53	2,94	0,26	7,42	0,54	23,6
K^{1+}	2,45	0,687	1,23	1,19	0,59	0,83
Fe^{3}+	0,60	0,74	1,39	1,40	1,37	1,15
Cl^{1-}	6,11	5,78	1,50	8,70	8,40	2,95
F^{1-}	0,004	0,008	0,009	0,010	0,005	0,008
NO_2^{1-}	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Br^{1-}	0,67	0,02	0,02	0,03	0,41	0,04
PO_4^{3-}	0,06	0,07	0,06	0,27	0,04	0,06
SO_4^{2-}	1,25	0,36	5,20	15,54	4,54	1,02
CO_3	nd	nd	nd	nd	nd	nd
HCO_3	92	61	61	31	61	61
NO_3	0.07	6,09	0,12	13,12	0,09	5,51
STD	132	28	58	62	28	40

nd: nada determinado

Dentre os parâmetros analisados nas águas dos poços de monitoração do IPEN, vale destacar os valores determinados para o fluoreto, variando entre 4 a 10 ppb. O valor determinado para fluoreto demonstra que as águas subterrâneas do IPEN não foram contaminadas com fluoreto. Pelos dados da Companhia de Tecnologia CETESB são águas com qualidade satisfatória. (CETESB, 2007).

TABELA 14 - Pontos de coleta de água subterrânea do IPEN - PMRA-IPEN(IPEN,2001)

Pontos de amostragem de água subterrânea	
Código	Descrição
AP01	Portaria Geral (Setor Esportivo)
AP02	UTERRS (Unidade de Tratamento de Efluentes Radioativos e Rejeitos Sólidos)
AP03	Atrás do Reprocessamento (cerca)
AP04	Atrás do Reprocessamento
AP05	Perimetral
AP06	Atrás da UTERRS

No PMRA-IPEN são monitorados rotineiramente, ar atmosférico, águas de lençol freático e exposição gama no ar por dosimetria termoluminescente. A FIG.62 apresenta os pontos de monitoração deste programa PMRA, na área do IPEN.

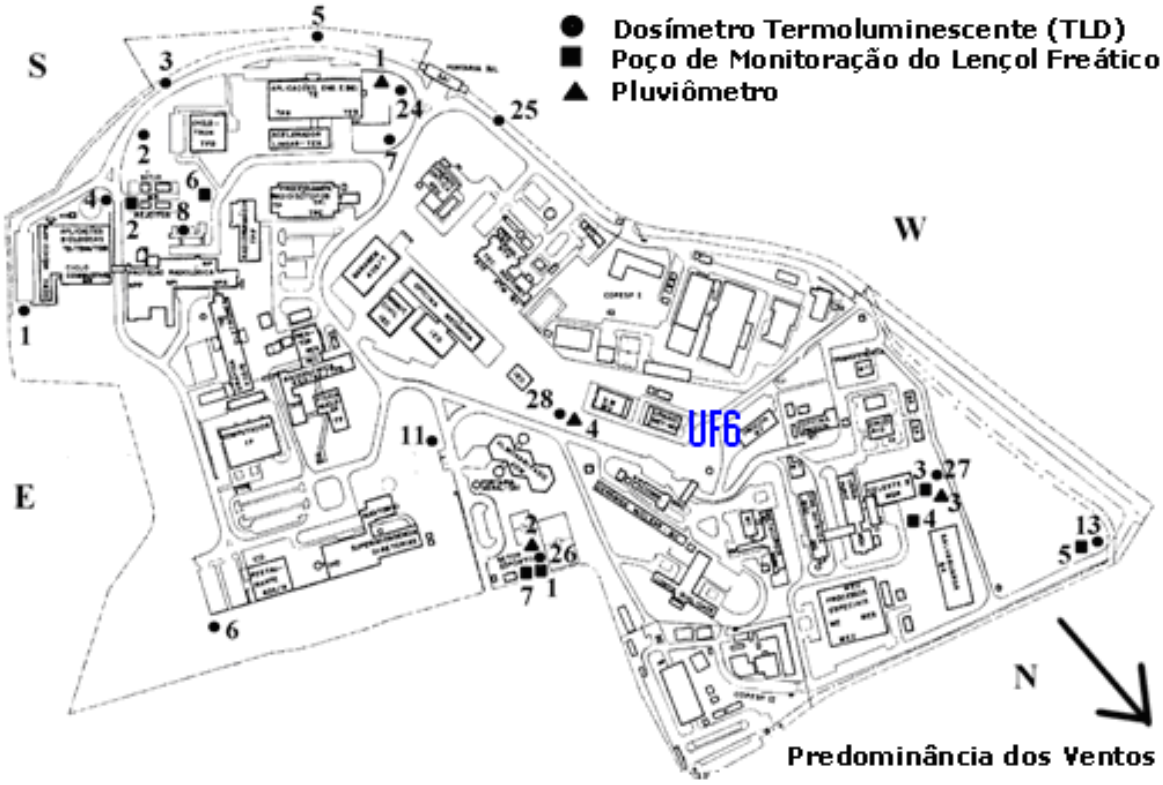


FIGURA 62 - Pontos de monitoração de ar atmosférico água de lençol freático e dosimetria termoluminescente no PMRA

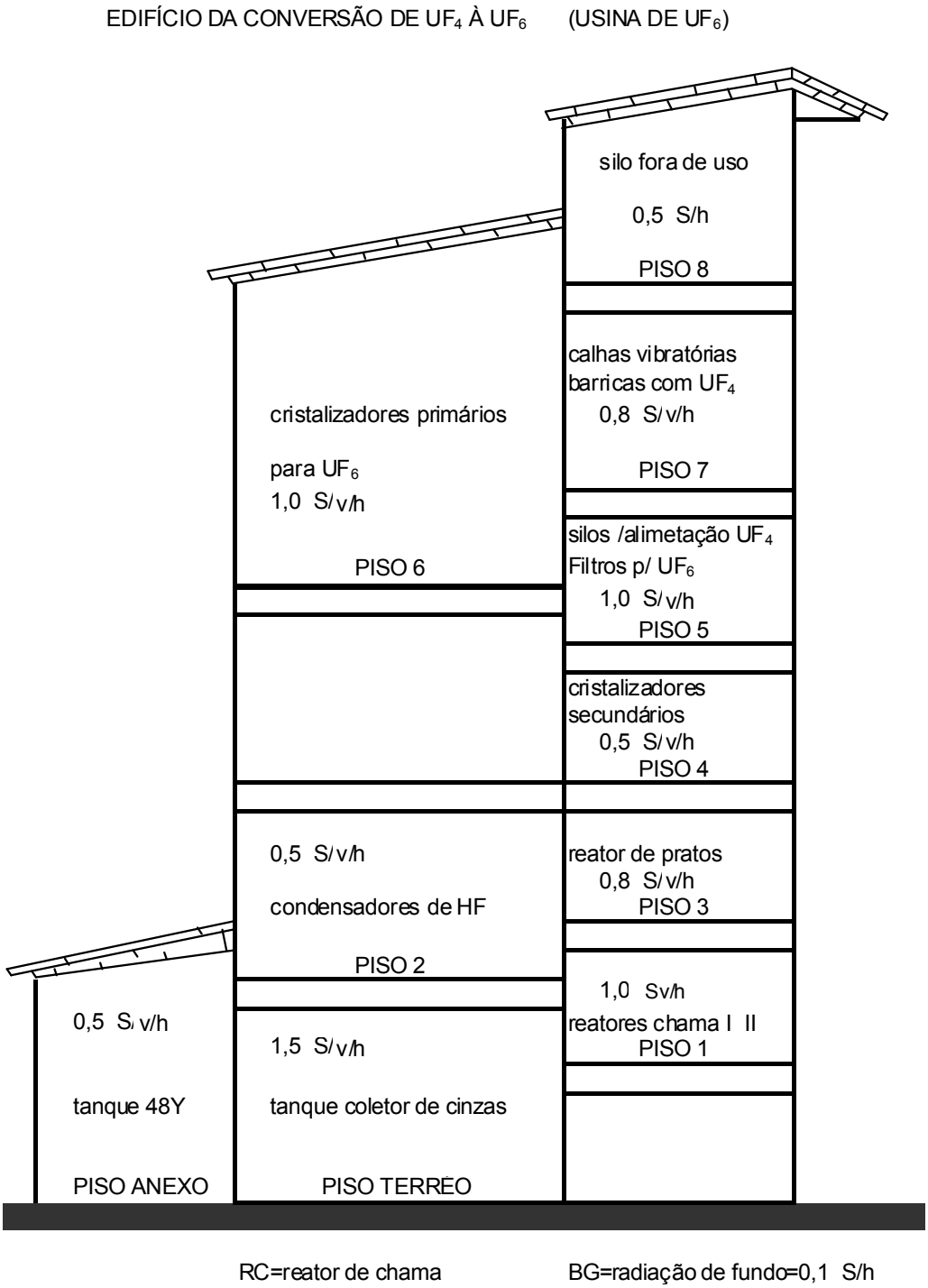
5.9.5-*Programa de Monitoração Ambiental nos Poços Durante o Descomissionamento.*

No PMRA-IPEN executado durante o período de descomissonamento (2004 a 2006) não houve alterações significativas nos parámetros monitorados, que são exposição gama no ar e radioatividade nas águas subterrâneas.

Na FIG 63 apresentam-se os valores de taxa de dose, em $\mu Sv \times h^{-1}$, na usina de UF_6, antes do descomissionamento, ou seja, a monitoração da taxa de exposição é apresentada para a Usina ainda montada.

Já na FIG.64 apresentam-se os valores na mesma taxa de dose no local descomissionado, após a total remoção de todos os itens desmantelados, com o transporte e armazenagem efetivos. A taxa de dose é apresentada após a desmontagem, antes e após a pavimentação do local, a 50 cm da superfície,

com pontos a cada m^2 de área. A radiação de fundo do local estudado foi de 0.09 $\mu Sv \times h^{-1}$.



Níveis de Radiação
Data: 15 de Dezembro de 2005
FIGURA 63 - Levantamento radiométrico na usina de UF_6 antes do descomissionamento

0,09	0,11	0,08	0,09	0,11	0,09	0,14	0,10	0,10	0,12	0,13	0,15
0,08	0,11	0,08	0,08	0,10	0,10	0,12	0,17	0,11	0,11	0,18	0,10
0,09	0,08	0,12	0,16	0,12	0,21	0,10	0,17	0,09	0,10	0,15	0,12
0,09	0,09	0,11	0,17	0,10	0,12	0,12	0,10	0,16	0,12	0,10	0,09
0,15	0,17	0,14	0,20	0,09	0,09	0,10	0,16	0,14	0,15	0,09	0,16
0,10	0,10	0,20	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10	0,16	0,16	0,12	0,16
0,14	0,13	0,14	0,09	0,13	0,15	0,15	0,09	0,13	0,09	0,12	0,16
0,10	0,12	0,15	0,09	0,22	0,10	0,23	0,10	0,20	0,17	0,14	0,09
0,10	0,10	0,12	0,09	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12	0,09
0,09	0,09	0,12	0,09	0,15	0,10	0,15	0,09	0,09	0,12	0,16	0,14
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,15	0,10	0,10	0,12
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,15	0,20	0,10	0,12
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,15	0,20	0,10	0,12
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,15	0,20	0,10	0,12

Antes da Pavimentação

0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10
0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,12	0,09	0,09	0,10	0,10
0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,12	0,09	0,10	0,10	0,10
0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09
0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09
0,10	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10
0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10
0,09	0,13	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09
0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09
0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,14	0,10
0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,13
0,09	0,09	0,14	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,12	0,12	0,10	0,09
0,09	0,12	0,12	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,14	0,10	0,11

Após a Pavimentação

Geiger Counter
Modelo 14 C
Fabricante: Ludlum Measurements

FIGURA 64 - Níveis de radioatividade, expressos em taxa de dose, no local da planta de hexafluoreto de urânio descomissionada. Medidas executadas antes da pavimentação e após a pavimentação do local

A monitoração do local foi executada empregando-se detector Geiger, modelo 14C, da marca Ludlum Measurements. A unidade de medida usada $\mu Svxh^{-1}$.

Observa-se que os valores monitorados para a taxa de dose estão muito próximos daquele observado para a radiação de fundo do local. Desta forma pode-se afirmar que não houve contaminação no local, decorrente do trabalho aqui apresentado.

5.10 - Segurança Ocupacional

Nas FIG. 65 e 66 apresenta-se a equipe de descomissionamento em atividade, na preparação de retirada dos cristalizadores primários e no uso dos EPI's, respectivamente.

FIGURA 65 - Uso de EPI's, trabalho nos cristalizadores

FIGURA 66 - Uso de EPI's especiais, escafandros com ar mandado

5.11 - Logística dos Produtos e Equipamentos

O transporte dos equipamentos foi planejado para que o IPEN realizasse esta operação, por motivos de segurança e critérios técnicos e ainda por risco de contaminação dos veículos utilizados. Nas FIG. 67 e 68 mostra-se o transporte e o armazenamento da coluna de lavagem e do cristalizador primário, respectivamente

FIGURA 67-Transporte da coluna de lavagem de UF_6

FIGURA 68 - Estocagem do cristalizador primário

5.12 - Tratamento dos Rejeitos Gerados

Durante o funcionamento da Usina de UF_6, alguns vazamentos aconteceram dentro da unidade, o que ocasionou contaminação em algumas estruturas e assoalhos metálicos, revestimentos e outras peças. Essas peças contaminadas, durante a desmontagem da usina de UF_6, sofreram tratamento específico, de acordo com o tipo de material, obedecendo à norma de tratamento de rejeito da CNEN.. Todo este material foi transferido para local Iapropriado , cercado e com vigilância .

5.13 - Planejamento, Procedimento e Liberação dos Rejeitos

Apresenta-se aqui o procedimento realizado para o tratamento dos rejeitos que foram gerados durante o descomissionamento da Usina de UF_6.

- Com o auxílio do grupo de Radioproteção foram selecionados os materiais que não apresentavam contaminação interna.

- Nos itens que apresentaram contaminação, fez-se um teste, utilizando um tanque já existente no local. Descontaminou-se algumas peças usando água corrente e a seguir analisou-se o nível de contaminação apresentado pela água. Como estava dentro das normas da CNEN, todo o material encontrado nestas condições foi descontaminado, sem perigo de contaminação ao meio ambiente. O destino das peças descontaminadas seguirá orientação da direção do IPEN,

5.14 - Armazenamento dos Equipamentos

A seleção de um local apropriado para colocação dos equipamentos retirados da Usina de Produção de UF_6 foi criteriosa. Seria necessário que o depósito estivesse próximo da usina a ser descomissionada e que tivesse uma altura suficiente para que as peças e equipamentos pudessem ser colocados na mesma posição em que se encontravam originalmente. Este procedimento foi realizado para evitar aceleração de corrosão.

Para atender requisitos de segurança deveria estar próximo a uma guarita. O depósito que atendeu todos estes requisitos foi a Instalação de Transferência de UF_6, que possui altura, largura e comprimento compatíveis com as necessidades. Como a mesma estava dentro do plano de descomissionamento, foi possível adaptar esta Unidade às exigências necessárias . Este depósito de armazenamento é mostrado na FIg. 69.

Na FIG.70, mostra-se o local onde se encontrava montada a usina de produção de UF_6, após o descomissionameto.

FIGURA 69 - Galpão de armazenamento de equipamentos da usina de UF_6

FIGURA 70 - Local onde foi descomissionada a usina de UF_6. Vista atual

6 - CONCLUSÕES

Em seis anos de produção, a usina de UF_6 forneceu 35 toneladas de hexafluoreto de urânio, material entregue à Marinha do Brasil, que desenvolve pesquisa na área de enriquecimento isotópico. Neste período o Departamento de Radioproteção Ambiental do IPEN calculou o impacto ambiental de algumas áreas do IPEN, sendo que a Usina Piloto de Produção de Hexafluoreto de Urânio fazia parte deste programa de monitoração.

Cabe salientar que o Programa de Monitoração Radiológica Ambiental (PMRA), mantido em escala rotineira no IPEN, contemplou todo o período operacional da usina, bem como o período de descomissionamento. Além do programa de monitoração ambiental rotineiro, mantido pelo Instituto, durante o descomissionamento executaram-se monitorações adicionais, descritas a seguir.

Após a desmontagem e remoção total, com limpeza da área, efetuou-se monitoração do terreno, antes e após a pavimentação, estimando-se a taxa de dose a 50 cm do solo. Empregou-se detector do tipo contador Geiger, marca Ludlum Measurement, modelo 14C, n° série 14821S. Empregou-se também detector Teletector, modelo Probe 6150 AD-5 n° série 107475, automess. Medidas foram efetuadas a cada $1m^2$, na área total. A radiação de fundo do local foi estabelecida como 0,09 $\mu Sv \times h^{-1}$.

Nesta conclusão devem-se ressaltar alguns itens.

- **Impacto Ambiental**

O impacto ambiental foi desprezível na fase operacional, decorrente da liberação dos efluentes líquidos radioativos, deveu-se à concepção, projeto e implantação da planta de UF_6 e demais unidades do PROCON. Previu-se e implantou-se o reuso e a reciclagem dos vários fluídos e gases manipulados e gerados nas suas várias unidades de transformações. Não houve liberação de urânio para o meio ambiente cumprindo os procedimentos de radioproteção rigorosamente.

Os dados do PMRA (Programa de Monitoração Radiológica Ambiental) do IPEN, do ano 2006, mostraram que não houve alteração dos valores registrados nos meses em que foi realizado o descomissionamento da Usina de UF_6.

Todos os rejeitos líquidos gerados nas colunas de lavagens foram recolhidos em bombonas plásticas e armazenadas no depósito de Salvaguardas.

O Freon que estava na Instalação de Geração de Freon foi recuperado e armazenado em tambores e encaminhado ao galpão de armazenamento de produtos químicos.

•Salvaguardas

Os procedimentos de Salvaguardas aplicados neste descomissionamento tiveram excelentes resultados. Foi possível controlar todo material nuclear que se encontrava na Unidade, sem perda ou desvio de material significativo. A contabilidade do material que se encontra nos cristalizadores será feita em uma outra etapa, porque novos procedimentos e técnicas deverão ser desenvolvidas para recuperação deste UF_6 cristalizado. Efluentes líquidos de urânio, recuperados das colunas de lavagem, estão controlados. Em outra etapa o urânio contido também será recuperado .Concluindo: todos os materiais citados estão controlados sob o ponto de vista de Salvaguardas e futuramente serão contabilizados.

•Proteção Radiológica

O planejamento em Radioproteção aplicado para área controlada envolveu, neste caso, monitoração de entrada e saída de pessoas, materiais, ferramentas, roupas, Epi's, veículos e todos os equipamentos e materiais desmontados da Usina de UF_6. Não houve pessoas contaminadas, apenas alguns EPI's, que foram prontamente descontaminados. Podemos afirmar que o resultado foi considerado bom.

- **Proteção Física**

Rígidos procedimentos aplicados em Proteção Física no descomissionamento desta unidade apresentaram resultados bons. Algumas ocorrências de pequena ordem surgiram, porem não comprometeram o resultado do trabalho. .

- **Logística**

A seleção de um local adequado bem localizado e próximo à Usina de UF_6, o transporte com utilização de veículos e motoristas do IPEN, um acompanhamento e contrôle constante de radioproteção durante o deslocamento dos veículos foram fatores importantes. Todos os equipamentos foram armazenados na mesma posição em que se encontravam originalmente para evitar aumento na aceleração da corrosão. A segurança oferecida, por estar dentro da área de vigilância da guarita, a reforma imposta ao local de armazenamento e a adequação realizada foram fatores que contribuíram para a finalização bem sucedida do trabalho.

- **Custo**

O custo financeiro com o descomissionamento é um dos fatores mais importantes. Neste caso específico o resultado foi muito satisfatório. Não foi possível levantar qual o montante de investimento usado para construção desta usina, uma vez que foram usados recursos de várias fontes na época, e que uma parte importante destes recursos estava em caráter ”sigiloso”. O custo financeiro para descomissionar esta unidade foi de aproximadamente R$ 162.447,00 (cento e sessenta e dois mil quatrocentos e quarenta e sete reais).que, acredita-se, seja menos que 5% do valor gasto na montagem da usina. Cabe salientar que, comparado à literatura, o custo econômico do descomissionamento neste estudo foi quase desprezível.

• Próximos Estudos

Propõem-se incluir, em estudos posteriores, um planejamento para recuperação do UF_6, que se encontra depositado dentro dos cristalizadores primários e nas tubulações de carga e descarga.

O descomissionamento da Usina de UF_6 foi importante para o País: por ser a primeira unidade com estas características, montada e desmontada totalmente com tecnologia brasileira. Pela experiência adquirida no manuseio com UF_6,HF (gás e solução) , pelos equipamentos testados e usados com um resultado considerado bom, pelo planejamento executado, por não registrar nenhum acidente grave com HF finalmente por não registrar nenhum vazamentos de UF_6 /HF para o meio ambiente, pode-se afirmar que o descomissionamento efetuado neste trabalho foi realizado com sucesso.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. **O Ciclo do Urânio no Brasil**. São Paulo, 1994 (IPEN-pub-398).

ABRÃO, A.; FRANÇA.JR., .M. **Usina Piloto de Purificação de Urânio por Troca Iônica em funcionamento no IEA.** (pub .IEA.Nº 219).

ABRÃO. A; IKUTA. A; WIRKNER. M. F; SILVA P.F. **Produção de Flúor Elementar no IPEN. Situação no Brasil e Perspectivas Futuras.** Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Química, Porto Alegre, 1980.

AEN-AGENCE POUR L' E'NERGRGIE-NEA,Disponível em **Regulating the Decommissioning of Nuclear Facilities** Disponível em < www nea.fr

BABA, S. **Operação de uma unidade semi-industrial de produção de UO_3** Dissertação (Mestrado) *IPEN 1982).*

Ministério das Minas e Energia, ***Balanço Energético Nacional (****ano base 2006)*

BOING,I.E.; NECHAEV,A.F., **Decommissioning of nuclear and radiation facility** Ribases, St. Petersburg Institute of Tecnology, St. Petersburg (2001) in Russian).

CARVALHO, JOSÉ MEIXA **Crespo de losítica. 3.ª ed. Lisboa**: Edições Silabo, 2004.

CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações mínero-industriais.** (CNEN-NN-4.01, 2005.).

CNEN-COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de proteção radiológica** ,(CNEN-NN-3.01, 2005.)

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas.**(.CNEN-NE -6.05-85).

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes básicas de radioproteção.** Norma experimental CNEN-NE-3.01, Brasília, (1988).

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Posição Regulatória 3.01 / 009. Norma CNEN-NN-3.01, Brasília, (2005).

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas**. Norma Experimental CNEN-NE-6.05, Brasília, 1985.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas**. Norma Experimental CNEN-NE-6.02, Rio de Janeiro, 1984. Diário Oficial da União, D.O.U., Brasília, 02/junho/1998.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Controle de Material Nuclear**. Norma Nuclear CNEN-NN-2.02. Diário Oficial da União, D.O.U., Brasília, 21/setembro/1999.

CORLEY, C. P.; DENHAM, D. M.; JAQUISH, R. E.; MICHELS, D. E. OLSEN, A. R.; WAITE, D. **A. A guide for environmental radiological surveillance** at U. S. Department of Energy Installations. Washington D. C., Department of Energy, 1981. (DOE/EP - 0023).

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição Regulatória 3.01 / 008. Norma CNEN-NN-3.01, Brasília (2005).**

Departamento do Ciclo do Combustível**. Relatório preliminar sobre efluentes e rejeitos radioativos gerados pelo IPEN-CNEN/SP-1988**

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Secretaria Especial do Meio Ambiente-SEMA. **Relatório de qualidade de águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** Cetesb, São Paulo, 2007.

Della Rocca, F.F. **Estimativa da dose nos indivíduos do publico decorrente da liberação de efluente líquido pelo IPEN**. (Dissertação Mestrado) IPEN, 1995.

DEPARTMENT OF ENERGY. **Deactivation and decommissioning focus area innovation technology summary report.** Disponível em http://apps.em.doe.gov/ost/itsrdda.html.

DIAS, J. C. Q. **Logística global e macrologística**. Lisboa, Edições Silabo, 2005. ISBN 972-618-369-3.

Experience of Decommissioning ng eias Disponível em<

EISENBUD, M. **Environmental radioactivity**. Academic Press, Orlando, 1987.

EUPOPEAN COMMISSION, **Environmental Impact Assessment for the Decommissioning of Nuclear Installations, Rep . EUR 20051, Rev.Feb 2002**

FERNANDES, H. R. S. M. **Subsídios ao descomissionamento da primeira indústria de mineração e beneficiamento de urânio no Brasil- Caso do Complexo Mínero Industrial de Poços de Caldas –** MG. Tese **(Doutorado)** - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1997.

FILHO. C. A. **Tecnologia para preparação de tetrafloureto de urânio fluoretação de UO_2 obtido a partir de diuranato de amônio.** Universidade de São Paulo, USP, Escola Politécnica, (dissertação de mestrado), 1974.

FILHO. D. B. **Obtenção de hexafluoreto de urânio por oxidação calalítica de tetrafluoreto de urânio** .(Dissertação Mestrado) IPEN-1983

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Decommissioning of underground structures, systems and components of nuclear Installations.** Technical Reports Series nº 439, Viena, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY .**Record keeping for the decommissioning of nuclear facilities: guidelines and experience,** Technical Reports Series Nº 411, 2002

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **safe decommissioning for nuclear activities proceedings of an international conference** Berlin, 14-18 October 2002

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Standard format and content for safety related decommissioning** documents.2005

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**, Decommissioning of nuclear facilities,**IAEA-Tecdoc-179,IAEA,Vienna(1975)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Status of the decommissioning of nuclear facilities around the World**, IAEA, Vienna, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Transition from operation to decommissioning of nuclear installation ,**Technical Reportes Series No.420 IAEA,Vienna, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Decommissioning of nuclear Facilities and the Safe Termination of Activities.** Proceedings of an International Conference Athens,11-15 december 2006

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Decommissioning of Underground Structures ,systems and Components of nuclear Installations, Technical Reports Series nº 439,** Viena, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY .**Record Keeping for the Decommissioning of Nuclear Facilities: Guidelines and Experience, Technical Reports Series Nº 411,** 2002.

-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safe Decommissioning for nuclear activities proceedings of an international conference Berlin, 14-18 October 2002**

-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Standard format and Content for Safety Related Decommissioning Documents.2005**

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY . Objectives and design of environmental monitoring programmes for radioactive contaminants. Internaional Atomic Energy Agency. **Safety Series, SS 41,** Vienna, 1975.

.INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Monitoring of airborne and liquid radioactive releases from nuclear facilities to the environment.** International Atomic Energy Agency. **Safety Series, SS 46,** Vienna, 1978.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Principles of limiting releases of radioactive effluents into the environment.** International Atomic Energy Agency. **Safety Series, SS 77,** Vienna, 1986.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGETICAS E NUCLEARES **Avaliação Radiossanitária do Meio Ambiente sob Influência do IPEN.** 1995 (ipen-Pub-401)

Klein, M.; et al., **"Management routes for materials arising from the decommissioning of a PWR reactor "Technologies for the Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Back End Nuclear Fuel**

Ministério de Minas e Energia (M.M.E.) Empresa de Pesquisas Energéticas (E.P.E.). **Balanço energético nacional-2006.** Brasília, 2007

MAGALHÃES, H. M.; XAVIER, A. M: . GUERRERO J.P.; MEZRAHI, A; **Storage facility in Brasil. brasilian nuclear energy commission,** Rio de Janeiro ,

NISTI, M. B.; SANTOS, A.J.G. Assessment of radioactive liquid effluents release at IPEN-CNEN/SP. **The Natural Radiation Environment**. American Institute of Physics - AIP p 505-508, 2008.

OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY , The Safety of Decommissioning of Nuclear Facilities ,NEA/RWM/WPDD Paris 2004.

Ribas, S .G .A**. Tecnologia de preparação de uo_2Apropriado para conversão a UF_4** (Dissertação mestradoIPEN 1973)

-SANTOS, C. M. **A influência do padrão de calibração e da composição do resíduo de mostras de agua na eficiência de um contador proporcional para contagem alfa e beta**. Aplicação no Controle Radiológico do IPEN-CNEN/SP. (Dissertação de Mestrado), Universidade de São Paulo, 2002.

SANTOS, I; ABRÃO, A.; CARVALHO, F. M. S. **Decommissioning of an Uranium Hexafluoride Pilot Plant**. **Proceedings of ENC, 2007 European Nuclear Conference. Brussels, Belgium, 16-20 September, 2007.**

TILL, J. E.; MEYER, H. E. **Radiological Assessment: a text book on environmental dose analysis**. Washington D. C., Nuclear Regulatory Commission, 1983.

UNITED STATES REGULATORY COMMISSION. **Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases Of Reactor for the Purpose of Evaluation of Compliance With** 10 CFR part 50, Appendix. In Regulatory Guide. Washington D. C, RG 1.109-77, rev 1, 1977.

Decommissioning strategies for Facilities Using Radioative *Material Disponível em<WWW.pub.iaea.org/mtcd/publications/pubdetails.asp?*