



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ARMAZENAGEM DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR “QUEIMADO”

LUIZ SERGIO ROMANATO

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

Orientadora:

Profa. Dra. BARBARA M. RZYSKI

São Paulo

2005



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ARMAZENAGEM DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR “QUEIMADO”

LUIZ SERGIO ROMANATO

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

Orientadora:

Profa. Dra. BARBARA M. RZYSKI

São Paulo

2005

DEDICATÓRIA

À minha esposa **Mônica**
e ao meu filho **Allan**,
por tudo o que representam para mim.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer

À **Profa. Dra. Barbara Maria Rzyski**, pela valiosa orientação, incentivo e amizade em todos os momentos necessários, sem o que não seria possível realizar este trabalho.

Ao **Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP)**, pela permissão e incentivo para cursar o mestrado.

À minha esposa **Mônica**, pela compreensão e apoio neste período.

Ao meu filho **Allan**, pelas horas que dispensou, para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, **Walter e Leonite**, que proporcionaram os primeiros passos rumo ao saber e ao estudo.

*“Se você nunca pensar sobre o seu futuro,
nunca o terá”.*

John Galsworthy (1867-1933)

ARMAZENAGEM DE COMBUSTÍVEL QUEIMADO

Luiz Sergio Romanato

RESUMO

Quando um país se torna auto-suficiente em uma parte do ciclo nuclear, quanto à produção de combustível que será usado em suas centrais nucleares para a geração de energia, precisa voltar sua atenção para a melhor forma de armazenar este combustível após a sua utilização. A armazenagem do combustível nuclear queimado é uma prática necessária e utilizada nos dias atuais em todo o mundo como temporária, tanto por países que não têm definido o plano de destinação final, isto é, o repositório definitivo, como também por aqueles que já o possuem. Existem dois aspectos principais que envolvem os combustíveis queimados: um referente à armazenagem do combustível nuclear queimado destinado ao reprocessamento e o outro ao que será enviado para deposição final quando o sítio de deposição definitiva estiver definido, corretamente localizado, adequadamente caracterizado quanto aos diversos aspectos técnicos, e licenciado. Este último aspecto pode envolver décadas de estudos por causa das definições técnicas e normativas em um dado país. No Brasil, o interesse está voltado para a armazenagem dos combustíveis queimados que não serão reprocessados. Este trabalho analisa os tipos possíveis de armazenagem, o panorama internacional e a possível proposta para a futura construção de um sítio de armazenagem temporária no país.

SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE

Luiz Sergio Romanato

ABSTRACT

When a country becomes self-sufficient in part of the nuclear cycle, as production of fuel that will be used in nuclear power plants for energy generation, it is necessary to pay attention for the best method of storing the spent fuel. Temporary storage of spent nuclear fuel is a necessary practice and is applied nowadays all over the world, so much in countries that have not been defined their plan for a definitive repository, as well for those that already put in practice such storage form. There are two main aspects that involve the spent fuels: one regarding the spent nuclear fuel storage intended to reprocessing and the other in which the spent fuel will be sent for final deposition when the definitive place is defined, correctly located, appropriately characterized as to several technical aspects, and licentiate. This last aspect can involve decades of studies because of the technical and normative definitions at a given country. In Brazil, the interest is linked with the storage of spent fuels that won't be reprocessed. This work analyses possible types of storage, the international panorama and a proposal for future construction of a spent nuclear fuel temporary storage place in the country.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
1.1	Objetivos	04
2	REVISÃO DA LITERATURA	05
3	ESTADO DA ARTE NA GERÊNCIA DO CNQ	27
3.1	Combustível nuclear nos reatores brasileiros	27
3.2	Outros tipos de combustíveis nucleares existentes no mundo	30
3.3	Armazenagem do combustível nuclear queimado	31
3.3.1	Armazenagem via úmida.	32
3.3.2	Opções para o aumento da capacidade das piscinas	38
3.3.2.1	Modificações nos <i>racks</i> , nas piscinas e piscinas centralizadas	39
3.3.2.2	Agrupamento de varetas	41
3.3.3	Armazenagem seca	42
3.3.3.1	Armazenagem em poços	43
3.3.3.2	Armazenagem em silos	45
3.3.3.3	Armazenagem em cascos	48
3.3.4	Armazenagem em navios	51
3.3.5	Outras opções de armazenagem	54
3.3.6	Vantagens e desvantagens dos sistemas de armazenagem de CNQ	54
3.4	Transporte do combustível queimado	56
3.5	Armazenagem de CNQ danificado	59
4	GESTÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR QUEIMADO	61
4.1	Panorama mundial de gestão de CNQ	61
4.2	Segurança	84
4.3	Custos	87
4.3.1	Identificação dos custos	88
4.3.2	Comparação dos custos	89
4.3.3	Custo das instalações	94
5	CENÁRIO NACIONAL	97
5.1	Experiência de transporte de cascos com CNQ no Brasil	98

5.2	Perspectivas futuras	101
5.2.1	Aumento populacional no Brasil	101
5.2.2	Aumento da demanda de energia elétrica e a construção de novas usinas nucleares	102
5.2.3	Quantidade de CNQ gerado no Brasil nos próximos 30 anos – planificação e demanda de energia	106
6	DISCUSSÃO - PROPOSTA DE UMA INSTALAÇÃO DE ARMAZENAGEM TEMPORÁRIA DE COMBUSTÍVEL QUEIMADO NO BRASIL	108
6.1	Introdução	108
6.2	Opção de instalação de armazenagem de CNQ para o Brasil	109
6.3	Licenciamento da instalação	115
6.3.1	Aprovação do local	115
6.3.2	Licença de construção	115
6.3.3	Autorização para utilização de material nuclear	116
6.3.4	Autorização para operação	116
6.3.5	Inspeções e testes	116
7	CONCLUSÕES	117
	ANEXOS	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1	Relação de países que possuem armazenagem úmida temporária	41
Tabela 3.2	Cascos multi-propósito usados em diversos países e certificados pelo NRC	52
Tabela 3.3	Vantagens e desvantagens das instalações de armazenagem do CNQ	56
Tabela 3.4	Fases do transporte do CNQ	57
Tabela 4.1	Discriminação dos custos provenientes das diversas opções de armazenagem de CNQ existentes no mundo	89
Tabela 4.2	Valores (corrigidos para o ano de 2004) de construção e operação em instalações com capacidade para 500ton. de CNQ sob armazenagem úmida e seca na Europa	90
Tabela 4.3	Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado para a construção e operação de uma instalação de armazenagem de 5.000ton de CNQ no Japão	91
Tabela 4.4	Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado para a construção de uma instalação de armazenagem para CNQ	91
Tabela 4.5	Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado de armazenagem para cada quilo de CNQ avaliado pelos institutos RWE e KfK, Alemanha	92
Tabela 4.6	Comparação entre os custos de armazenagem via seca de CNQ (corrigidos para o ano de 2004)	92
Tabela 4.7	Modelos, características e custos (corrigidos para o ano de 2004) de alguns tipos de cascos para armazenagem via seca de CNQ	93
Tabela 4.8	Comparativo de custos de instalações de armazenagem via seca na instalação do reator e em local afastado reator	95
Tabela 5.1	Consumo energético por habitante na América Latina	103
Tabela 5.2	Evolução da potência instalada no Brasil	104
Tabela 5.3	Demanda prevista para 2001 e 2004 de energia elétrica para o consumo brasileiro, extrapolada para os anos de 2010, 2020 e 2030	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa da localização das centrais nucleares de geração de energia elétrica em todo o mundo	01
Figura 1.2	Ciclo de vida do combustível nuclear	02
Figura 3.1	Corte do combustível PWR	28
Figura 3.2	Combustível TRIGA	28
Figura 3.3	Comparação entre combustíveis PWR, MTR e TRIGA	29
Figura 3.4	Combustível BWR	30
Figura 3.5	Combustível CANDU	30
Figura 3.6	Calor gerado por diferentes elementos radioativos contidos no CNQ retirado do reator em função do tempo	33
Figura 3.7	Radioatividade gerada pelos produtos de fissão contidos no CNQ retirados do reator em função do tempo	34
Figura 3.8	Radioatividade gerada por diferentes actínídeos contidos no CNQ retirado do reator em função do tempo	35
Figura 3.9	Piscina de CNQ no mesmo prédio do reator	36
Figura 3.10	Prédio de armazenagem de CNQ fora do prédio do reator	36
Figura 3.11	Esquema de uma piscina de CNQ e seus componentes	37
Figura 3.12	Comparação entre <i>racks</i> de alta densidade e <i>racks</i> mais antigos	39
Figura 3.13	Esquema de uma piscina de armazenagem de CNQ centralizada	40
Figura 3.14	Forma de agrupamento de varetas de CNQ, de uma disposição mais separada para uma mais compacta	42
Figura 3.15	Vista esquemática de uma instalação de armazenagem de CNQ em poços	44
Figura 3.16	Detalhe do cilindro de armazenagem de CNQ no poço	44
Figura 3.17	Instalação de silos verticais de concreto armado para armazenar CNQ em instalações externas	45
Figura 3.18	Silos de armazenagem de CNQ no sentido horizontal	46
Figura 3.19	Cilindro de armazenagem interno ao silo horizontal	46
Figura 3.20	Vista do corte do casco de transporte	47
Figura 3.21	Casco de aço com aletas para armazenagem de CNQ	49

Figura 3.22	Casco metálico para transporte, armazenagem e traslado de CNQ	50
Figura 3.23	Corte de um casco de concreto de armazenagem de CNQ	51
Figura 3.24	Navio russo de armazenagem de CNQ	53
Figura 3.25	Disposição do CNQ no navio de armazenagem na Rússia	53
Figura 3.26	Introdução de um casco com CNQ no navio transportador russo	54
Figura 3.27	Transporte rodoviário de casco metálico	58
Figura 3.28	Corte de um casco utilizado em transporte ferroviário.	58
Figura 3.29	Transporte marítimo de CNQ	59
Figura 4.1	Interior da instalação de Gorleben, Alemanha, onde se vê cascos com CNQ	63
Figura 4.2	Cascos metálicos para armazenar CNQ em Gorleben, Alemanha	63
Figura 4.3	Instalação de armazenagem de CNQ em silos de concreto a céu aberto na Argentina	64
Figura 4.4	Detalhe interno do recipiente com combustível nuclear queimado	64
Figura 4.5	Recipiente DSC para armazenagem seca do combustível CANDU no Canadá	67
Figura 4.6	Instalação modular horizontal NUHOMS para CNQ em Susqehanna, EUA	69
Figura 4.7	Cascos de concreto de CNQ com ventilação por dutos, EUA	70
Figura 4.8	Instalação de armazenagem de CNQ, Surry, EUA	70
Figura 4.9	Casco de armazenagem de CNQ, Prairie Island, EUA	71
Figura 4.10	Instalação de armazenagem úmida de Loviisa, Finlândia	72
Figura 4.11	Instalação centralizada de armazenagem de CNQ em via úmida, La Hague, França	73
Figura 4.12	Instalação de armazenagem seca de CNQ, Cascad, França	73
Figura 4.13	Instalação de armazenagem de CNQ, HABOG, Holanda	74
Figura 4.14	Esquema em corte da instalação HABOG, Holanda	74
Figura 4.15	Vista externa da instalação de armazenagem de CNQ, PAKS, Hungria	75
Figura 4.16	Piscina de armazenagem temporária de curto prazo em Sellafield, Reino Unido	78
Figura 4.17	Sistema modular de armazenagem seca MACSTOR	79
Figura 4.18	Instalação subterrânea CLAB, Suécia, para armazenagem de CNQ	

	via úmida	81
Figura 4.19	Instalação de ZWILAG, Suíça, para armazenar CNQ em via seca	82
Figura 4.20	Cascos de aço com CNQ dentro da instalação ZWILAG, Suíça	82
Figura 4.21	Casco de concreto para CNQ, armazenagem via seca, Zaporozhe, Ucrânia	83
Figura 4.22	Comparação entre as dimensões do Boeing 747 e de um edifício de armazenagem de CNQ	86
Figura 4.23	Simulação de queda (atentado) de um Boeing 707 sobre uma instalação de armazenagem seca em silos de concreto	86
Figura 5.1	Vista das centrais de Angra 1 e Angra 2, Angra dos Reis, RJ	97
Figura 5.2	Casco GNS para o transporte do CNQ utilizado pelo IPEN para os Estados Unidos	99
Figura 5.3	Dispositivo de transferência de CNQ sobre o casco de transporte do IPEN, São Paulo, para os Estados Unidos	100
Figura 5.4	Colocação da tampa no casco de transporte de CNQ	100
Figura 5.5	Crescimento da população brasileira entre 1960 e 2030	102
Figura 6.1	Localização das cidades brasileiras que possuem reatores nucleares	108
Figura 6.2	Ferrovias da região em que se encontram os reatores nucleares brasileiros (malha operada pela MRS Logística)	111
Figura 6.3	Ferrovias da região em que se encontram os reatores nucleares brasileiros (malha operada pela FCA Ferrovia Centro Atlântica)	112
Figura 6.4	Proposta de prédio para a armazenagem de CNQ em recinto fechado	113
Figura 6.5	Detalhe do local de armazenagem dos cascos metálicos de CNQ	114
Figura 6.6	Planta de uma instalação de armazenagem para cascos de concreto em área aberta	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABWR	<i>Advanced Boiling Water Reactor</i>
AFR	<i>Away from reactor</i>
AGR	<i>Advanced Gas Reactor</i>
ALARA	<i>As Low As Reasonable Achieved</i> - Tão baixo quanto razoavelmente aceitável
ARGONAUT	<i>Argonne Nuclear Assembly for University Training</i>
Bq	Becquerel
BNFL	<i>British Nuclear Fuels Ltd</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i> - Reator de água fervente
CASTOR	<i>Cask of Storage for Radioactive Materials</i>
CANDU	<i>Canadian Deuterium Uranium</i> - Combustível do Reator de Água Pesada Pressurizada
CDTN	Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
Ci	Curie
CLAB	Instalação Central de Armazenagem Temporária
CNEN	Comissão Nuclear de Energia Nuclear
CNQ	Combustível Nuclear Queimado
CONSTOR	<i>Concrete Storage Cask</i>
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
DOE	<i>Department of Energy</i> – Departamento de energia
FBR	<i>Fast Breeder Reactor</i>
GNB	<i>Gesellschaft für Nuklear Behälter</i>
GNS	<i>General Nuclear Systems</i>
GWe	Gigawatt <i>elétrico</i>
HABOG	Instalação de armazenagem de rejeitos radioativos
H TGR	<i>High Temperature Gas Reactor</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IEA - R1	Instituto de Energia Nuclear - Reator 1
IEN	Instituto de Energia Nuclear
IPEN	Instituto de Pesquisa em Energia Nuclear
ISFSI	<i>Independent Spent Fuel Storage Installation</i>

MACSTOR	<i>Modular Air Cooled Storage</i>
MB -1	Marinha Brasileira 1
MWe	Megawatt elétrico
MTR	<i>Material Test Reactor</i>
MVDS	<i>Modular vault dry storage</i>
NAC	<i>Nuclear Assurance Corporation</i>
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Comission</i>
NUHOMS	<i>Nuclear Horizontal Modular System</i>
PHWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RBMK	<i>Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalni</i> - Reator de Alta Potência Canalizado
SKB	<i>Svensk Kärnbränslehantering AB</i>
TBq	Terabecquerel = Becquerel X 10 ¹²
THTR	<i>Thorium High Temperature Reactor</i>
TN	<i>Trans Nucleaire</i>
TranStor	<i>Transport Storage</i>
TRIGA	<i>Training, Research, Isotope, General Atomics</i>
TVO/KPA	Instalação de armazenagem provisória na Finlândia
VSC	<i>Ventilate Storage Cask</i>
VVER	Reator de água pressurizada russo
ZWILAG	<i>Zwischenlager Würenlingen AG</i> - Instalação de armazenagem temporária de Würenlingen S.A.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica em centrais nucleares está bastante difundida pelo mundo. Um mapa das principais centrais nucleares no mundo pode ser visto na Figura 1.1 abaixo.

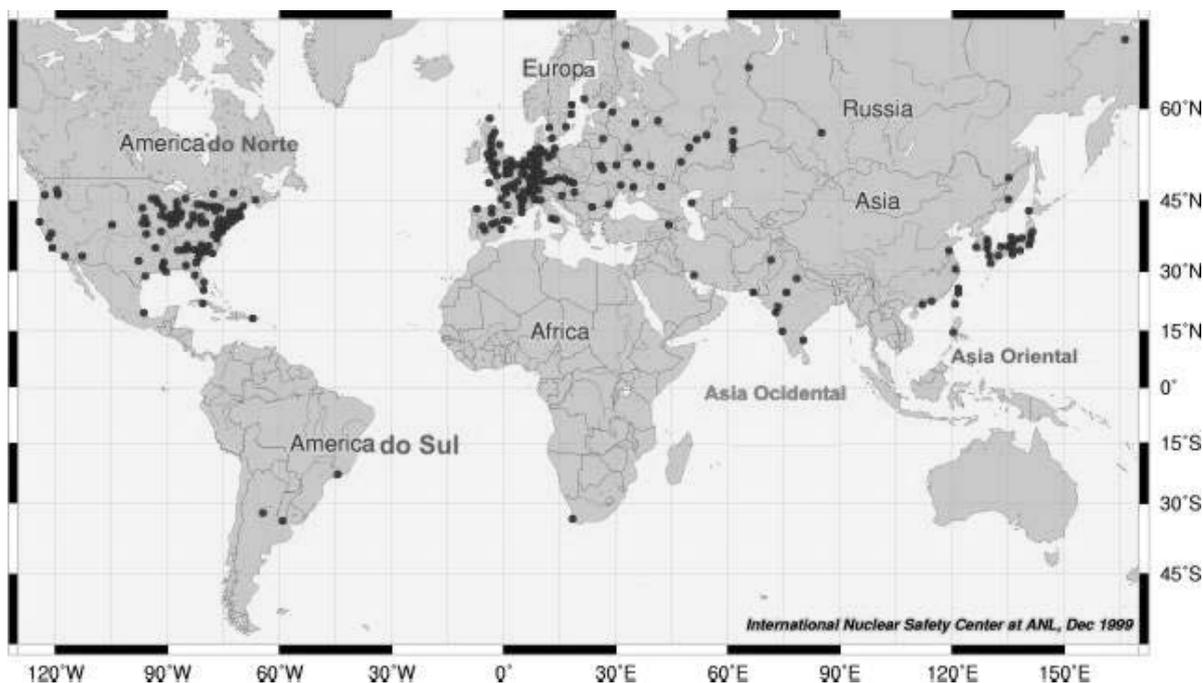


Figura 1.1 – Mapa da localização das centrais nucleares de geração de energia elétrica em todo o mundo.

Fonte: www.insc.anl.gov/pwrmaps/map/world_map.php

Quando o combustível nuclear é removido de um reator, por não conseguir mais sustentar uma reação nuclear em cadeia de forma eficiente, está intensamente radioativo e gera calor intenso – por isto, muitas vezes, é denominado ‘quente’. Após um determinado período a atividade diminui por causa das meias vidas dos elementos radioativos existentes (Tabelas A1 e A2 do Anexo 1), até um nível que o mesmo possa seguir a rota estabelecida pelo programa nuclear de cada país – reprocessamento ou deposição definitiva como rejeito radioativo.

Comumente, o decaimento radioativo é denominado *resfriamento*. A redução do calor gerado por este material nuclear ocorre quando ele é submetido à refrigeração em

meios como a água (imersão em piscinas).

Se o combustível nuclear queimado (CNQ), também conhecido como combustível irradiado, for considerado rejeito, o destino final em sua rota pelo ciclo do combustível (Figura 1.2) será a deposição definitiva de forma segura no meio ambiente (subterrânea).

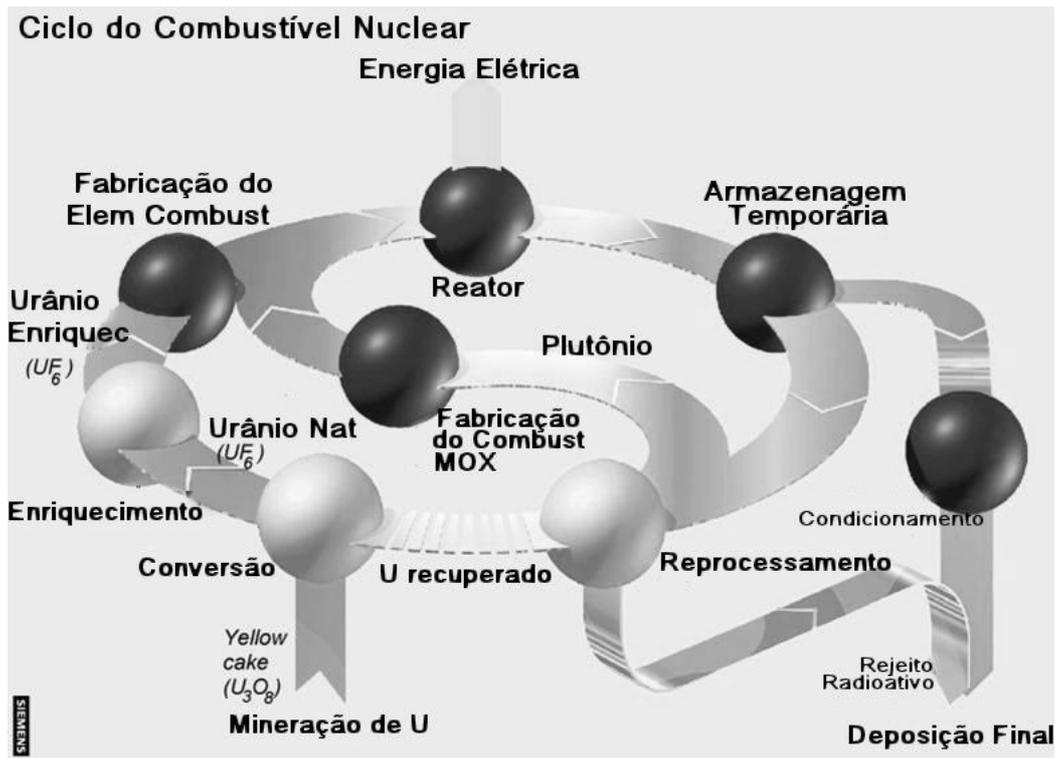


Figura 1.2 – Ciclo de vida do combustível nuclear

Fonte: Adaptado de www.de.framatome-anp.com

No entanto, em nenhum país do mundo existe um local em que seja possível depositar definitivamente o CNQ que deve permanecer em locais transitórios. A prática geral é a armazenagem submersa em piscinas com água, existentes nas instalações dos reatores comerciais. Após, no mínimo, um ano (USNRC, 2004), esse combustível pode ser removido com segurança das piscinas de armazenagem e transferido para instalações de armazenagem em via seca, que também é temporária, fora do edifício do reator.

Nos sistemas de armazenagem a seco, o combustível queimado, suficientemente resfriado, é transferido do sistema submerso para recipientes cilíndricos de metal. A água, que porventura tenha ficado dentro do recipiente, é drenada, o espaço é preenchido com um gás inerte e o recipiente é lacrado (USNRC, 2003). Os cilindros com paredes mais espessas podem ser colocados diretamente sobre um piso reforçado de

concreto, enquanto os de parede mais fina são colocados em cilindros de concreto maiores, ou em abrigos especiais, que proporcionem blindagem à radiação.

Muitas usinas nucleares, que estavam com a capacidade de armazenagem do CNQ em piscinas comprometida, optaram por construir, em espaços disponíveis na instituição, locais de armazenagem em via seca. A Comissão Nuclear de Regulamentação (NRC) (U.S.Nuclear Regulatory Commission, USA) determina que as instalações de armazenagem de combustível a seco sejam seguras, por pelo menos 100 anos, e considera geralmente este tipo de armazenagem uma forma mais adequada que aquela em piscinas (USNRC, 2004a).

Todo tipo de armazenagem, seja em via úmida ou seca, segue os princípios da filosofia de proteção radiológica ALARA (As Low As Reasonable Achievable), cuja prática objetiva que os níveis de dose sejam os mais baixos quanto praticáveis com relação aos limites estabelecidos pela Radioproteção.

Apesar da tecnologia de armazenagem seca, nas próprias instalações do reator, ser tecnicamente aprovada, as instituições, ao redor do mundo, preferem enviar o quanto antes, o CNQ para uma instalação federal de armazenagem provisória. Atualmente, os dirigentes das usinas de potência estão muito preocupados com a grande responsabilidade em manter uma quantidade cada vez maior de combustível armazenado em suas instalações. Esta situação se agrava, principalmente, a cada adiamento no cronograma de inauguração de repositórios subterrâneos definitivos para rejeitos radioativos de atividade alta.

Na literatura mundial não existe diferenciação quanto a palavra armazenagem do CNQ com propósito de seguir para o reprocessamento ou armazenagem de CNQ que aguarda a deposição definitiva, por isso, neste trabalho, é denominada *armazenagem temporária de curto prazo* do CNQ a manutenção do mesmo em local seguro, que está relacionada com o tempo entre a retirada do reator e o reprocessamento, e, *armazenagem temporária de longo prazo*, aquela cujo tempo se refere à contenção especial do CNQ desde a retirada do reator, ou das piscinas de decaimento, até a deposição final.

O CNQ sempre foi considerado uma fonte valiosa de urânio e plutônio. Visualizava-se que a extração do urânio e plutônio do combustível queimado fosse a única maneira de sustentar a indústria nuclear comercial, sem precisar exaurir os depósitos mundiais de urânio natural. Hoje, porém, com a contenção de alguns programas nucleares, como na Hungria, aqueles países que visavam reprocessar ou que reprocessavam o

combustível estão reanalisando seus programas e a tendência para armazenar o CNQ em longo prazo torna-se cada vez mais comum (Takáts & Buday, 2003).

Esperava-se que o combustível queimado pudesse ser resfriado nas piscinas dos reatores comerciais por poucos anos, até ser enviado para as instalações de reprocessamento, onde o urânio e plutônio seriam quimicamente separados dos outros radionuclídeos formados durante a queima. No reprocessamento, os produtos da fissão, juntamente com outros materiais radioativos como os produtos de ativação, não aproveitados, tornam-se rejeitos cujo destino final é a deposição definitiva.

O que ocorre atualmente é um acúmulo de combustíveis queimados nos locais de armazenagem temporária e é necessário dar outra solução a esta situação, até que seja possível definir o destino definitivo do CNQ.

O tempo regulamentar de funcionamento de muitos reatores nucleares, que é o prazo de operação para o qual o reator nuclear foi licenciado, também está chegando ao fim. Em muitos casos, está se aproximando do tempo projetado e estabelecido no licenciamento, e se a extensão da vida útil não for autorizada por meio de um novo licenciamento, muitos reatores terão que ser descomissionados e ser dado algum destino ao combustível queimado.

1.1 Objetivos

O ‘estado da arte’ da situação mundial sobre a armazenagem de combustível nuclear queimado foi extensamente pesquisado neste trabalho, assim como as perspectivas futuras nos outros países e seus projetos referentes às centrais nucleares e instituições de pesquisa.

Neste estudo é apresentada uma proposta para a construção de uma instalação para a armazenagem do combustível nuclear queimado, de acordo com a necessidade futura do parque nuclear brasileiro.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma coletânea sobre as informações a respeito das instalações de armazenagem usadas atualmente em todo o mundo; analisar as diferentes possibilidades de projeto para o Brasil, e propor um modelo de instalação para a armazenagem temporária no parque nuclear brasileiro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O U.S.National Research Council emitiu, em 1975, publicação sobre a armazenagem temporária de rejeitos radioativos sólidos de alto nível, englobando o combustível nuclear queimado - CNQ. Na época, não havia alternativa para armazenagem temporária do CNQ e as piscinas eram a única opção existente. A ocupação destas piscinas não era preocupante pois a opção sobre o destino do CNQ era o reprocessamento. Existiam apenas conceitos sobre a armazenagem via seca em poços de convecção e em cascos selados, vistos como uma alternativa vantajosa, pois os cuidados com o CNQ armazenado desta forma seriam menos preocupantes.

Em 1978, Held e Hintermeyer descreveram alguns aspectos necessários para estimar os custos de projeto e construção de instalações independentes de armazenagem de CNQ. Mostraram que o custo depende da capacidade e tipo de instalação (cascos ou prédios), do método de refrigeração do CNQ (água ou ar), dos diferentes projetos dos prédios, redundância de equipamentos e do programa de garantia da qualidade.

A International Atomic Energy Agency – IAEA (1982), em seu Relatório Técnico sobre armazenagem úmida do CNQ, apresenta um levantamento realizado pelos países membros da Agência sobre a experiência mundial de armazenagem do CNQ nas piscinas dos reatores. O conhecimento adquirido quanto a este tipo de armazenagem é considerado extremamente positivo, pois foi adquirido ao longo de 40 anos. Os dados obtidos podem ser utilizados para avaliar a extensão da vida útil dessas piscinas.

Outro relatório emitido pela IAEA (1983), versa sobre o manuseio e armazenagem de rejeitos de atividade alta, os mais importantes, imobilizados e acondicionados em cilindros, incluindo o combustível queimado. O relatório apresenta os princípios importantes para condicionar rejeitos, descreve equipamentos e instalações para manuseio e armazenagem. Discute, também aspectos de segurança e econômicos, considerados no projeto e operação dessas instalações. Se for necessário, a segurança da instalação deve ser demonstrada ao público de modo que toda a população seja esclarecida sobre os riscos de operação, que são mínimos. A segurança na armazenagem requer que a contenção proporcionada pela instalação previna a liberação de produtos de fissão no meio ambiente, não só em situação normal de operação, como também em condições anormais

como acidentes resultantes de falhas internas ou externas à instalação. Essas falhas, conforme o relatório, podem ser induzidas na planta, ou seja, serem internas, tais como: falhas no equipamento de ventilação, instrumentação e controle; perda na capacidade de resfriamento; perda no fornecimento de energia; falha estrutural na contenção; e, erro humano; ou externas tais como: condições climáticas extremas (temperatura, ventos, neve, gelo, enchentes); avalanches; terremotos; explosões; impacto de mísseis (incluindo quedas de aviões); e, sabotagem ou outros atos hostis provocados por estranhos.

As normas experimentais NE-5.01 (1988) e NE-5.02 (1986), da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), versam sobre os processos de transporte de materiais radioativos e manuseio de elementos combustíveis, nos quais é citado o combustível nuclear queimado. A norma NE-1.04 (1984), estabeleceu, passo a passo, o processo de licenciamento da instalação de armazenagem de combustível queimado, pois é considerada uma instalação nuclear. As normas NE-6.05 (1985a) e NE-6.06 (1985b) normatizam a gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas e a seleção e escolha para locais de depósitos de rejeitos radioativos visto que, para construção de qualquer tipo de instalação nuclear, são necessários: um processo de análise extenso, a aprovação e o licenciamento.

Baillif e Bonnet (1987) descreveram os métodos de armazenagem temporária de curto prazo em poços e em piscinas utilizados na França, fazendo uma breve comparação entre estes sistemas a seco e na forma úmida, concluindo que ambos permitem a armazenagem do CNQ em condições seguras e confiáveis.

Benistan et al. (1987) publicaram trabalho sobre o destino do combustível queimado na França que foi apresentado na forma de relatório pela IAEA. A França, simultaneamente com a implementação de seu programa nuclear, adotou o reprocessamento de CNQ. Após o descarregamento do reator, o CNQ é resfriado na piscina da central nuclear por um ano, e posteriormente, enviado para a piscina centralizada da central de La Hague e armazenado por mais dois anos antes do reprocessamento. Os rejeitos de atividade alta, resultantes desse processo de recuperação de ^{235}U e ^{239}Pu , são vitrificados e mantidos em instalações apropriadas aguardando a deposição final.

Hancox et al. (1987) analisam o ‘estado da arte’ do programa de gerência de rejeitos radioativos no Canadá, englobando, entre outros, o CNQ. O CNQ era armazenado em piscinas na instalação do reator e, na época, existiam estudos sobre os métodos de armazenagem seca. Foram também realizadas pesquisas sobre a deposição permanente em

cavernas profundas, avaliando-se as características geológicas e hidro-geológicas dos sítios em potencial. As conclusões foram que o CNQ pode ser armazenado de forma econômica e segura, submerso em água e em cascos de concreto por muitas décadas. Além disso, os autores afirmam que no Canadá existem vários locais candidatos potenciais para a deposição dos rejeitos radioativos em poços profundos, e que ainda estavam em andamento estudos hidro-geológicos, para conseguir um local mais adequado para a construção da instalação.

Em 1988, a IAEA publicou um relatório apresentando a experiência dos países que armazenavam CNQ via seca ou úmida. Neste relatório chegou-se à conclusão que a armazenagem via seca era confiável e que a armazenagem úmida continuava operando com uma tecnologia segura.

Mounfield (1991) aborda todas as etapas do ciclo do combustível nuclear, apresenta as características e tipos de reatores existentes no mundo e, quanto à armazenagem do CNQ, analisa a deposição em repositórios profundos em vez da superfície, seja no continente como no subsolo marinho. Quanto à armazenagem temporária do CNQ, o autor ressalta que a forma mais comum usada na maioria dos países, isto é em piscinas, é a mais econômica.

A IAEA (1991) editou um relatório baseado nos acidentes ocorridos nos reatores TMI (Three Mile Island, EUA) e Chernobyl (Ucrânia) nos quais ocorreram danos severos ao combustível nuclear. Este relatório abrange o que deve ser feito no caso da armazenagem do CNQ danificado, que em suma, são os mesmos passos da armazenagem no CNQ intacto, tomando-se os cuidados necessários para a estabilização do combustível e descontaminações posteriores.

No livro de Cochran e Tsoulfanidis (1992), os autores incluíram um capítulo sobre a gerência de rejeitos de atividade alta, fora dos EUA, abrangendo também a armazenagem do CNQ, radioatividade do combustível queimado, calor de decaimento gerado por esse combustível, o transporte e a gerência. Ressaltam a importância da radioatividade emitida pelo CNQ, composta por três grupos de radioisótopos: produtos de fissão, actínídeos e produtos de ativação. Os dados são úteis para o cálculo das dimensões dos cascos para armazenagem seca.

A Nuclear Energy Agency, NEA, (1993) relatou informações importantes ligadas ao ciclo do combustível nuclear, inclusive quanto à segurança. Acredita-se que tanto a tecnologia úmida como seca, são capazes de proporcionar segurança ao CNQ, no mínimo, por 30 anos após a retirada do reator. O relatório conclui que, na época de sua

publicação, a possibilidade de um acidente, de grandes proporções ou sabotagem, era extremamente remota. Explica também os possíveis acidentes que podem ocorrer numa piscina, como falhas no manuseio do CNQ, criticalidade ou perda da água que serve como refrigerante e blindagem.

Em relatório publicado pela IAEA (1994), é desenvolvida e proposta uma metodologia para a análise dos custos envolvidos com a armazenagem de CNQ. Esta metodologia envolve a melhoria da instalação de armazenagem existente, o aumento das instalações ou criação de uma nova instalação no sítio do reator, ou, a armazenagem em instalações fora deste sítio. A partir da análise dos dados pode-se optar por uma instalação úmida ou seca, ao caracterizar cada custo em categorias, analisar a economia dos valores envolvidos até chegar a um valor total ótimo. O relatório inclui um projeto de construção, licenciamento, manutenção e descomissionamento da instalação de armazenagem.

Raduan (1994), em sua dissertação de mestrado, aborda o tema da armazenagem de rejeitos radioativos no meio-ambiente, em diversas regiões candidatas, em função das normas e leis existentes no Brasil. A autora analisa os tipos de repositórios de superfície e suas características mais importantes quanto ao isolamento dos rejeitos.

Em seminário realizado na Áustria, a IAEA (1995) descreveu a gerência do CNQ na Rússia. Esse seminário permitiu obter uma primeira visão sobre a infra-estrutura da gerência de rejeitos radioativos da Rússia para o mundo e organizações que desejam firmar programas de cooperação nesta área. A Rússia possui CNQ proveniente da área militar resultante da operação e manutenção dos navios e submarinos nucleares, do descomissionamento dos mesmos e da área civil, de reatores comerciais, de pesquisa e da frota naval civil. Na época, a quantidade total de CNQ russo armazenado nas piscinas era de 8500ton das quais 6000ton de CNQ tipo RBMK, 1000ton de VVER, 1000ton de VVER-1000, 465ton de outros reatores civis, 30ton da marinha militar e 7,7ton de navios quebra-gelo.

Rocha (1996) relata as modificações efetuadas nos *racks* do CNQ (suportes que mantêm os elementos combustíveis) em Angra 1 por ter sido adotada uma distribuição mais densa de armazenagem. Segundo o autor, Angra 1 teve muitos problemas de paradas para manutenção, no início da operação da central, e essa modificação nos *racks* permitirá armazenar, com segurança, todo o CNQ gerado ao longo da vida útil da usina, estimada inicialmente em 40 anos.

A publicação do Nuclear Energy Institute (1997), uma organização norte-americana ligada à área nuclear, permite que se avalie a situação dos reatores nucleares

construídos pela ex-União Soviética nos países da cortina de ferro e o que está sendo feito com o CNQ. Após o acidente da unidade 4 de Chernobyl, em 1986, surgiu uma grande preocupação em torno dos reatores nucleares do tipo RBMK. Foi iniciado um estudo sobre as usinas nucleares construídas pelos russos, no qual são enfatizados os aspectos de segurança e indicados os pontos positivos e as deficiências principais de cada tipo de reator existente. Depois que os países que possuem esse tipo de reatores traçaram sua prioridade com relação à segurança, foi verificado que a gerência do CNQ era uma prioridade para todos. O CNQ russo proveniente dos reatores VVER-1000 era armazenado na instalação do próprio reator. Até o ano de 2005 ficará pronta uma instalação de reprocessamento desse combustível em Zheleznogorsk, Rússia. O CNQ dos reatores RBMK não é reprocessado por causa do alto custo. Este combustível é armazenado na própria instalação do reator, mas uma instalação centralizada para armazenagem seca está em fase de construção. Em algumas centrais nucleares, como as Kursk e Smolensk, o CNQ está sendo rearranjado nas piscinas de armazenagem. Na Ucrânia, a construção da instalação de armazenagem temporária via seca na central de Zaporozhye, e as futuras instalações secas de Rovno e Chernobyl, abrigarão, a partir de 2005, o CNQ gerado por essas centrais. A publicação cita ainda que, na Lituânia, a central de Ignalina, após um contrato com a empresa alemã GNB (Gesellschaft für Nuklear Behälter) recebeu 20 cascos do tipo CASTOR e, em 2001, começou a receber um lote de mais 40 cascos do tipo CONSTOR para armazenagem do CNQ. A Armênia, por sua vez, assinou um contrato com a França para a construção de uma instalação de armazenagem seca na central de Metsamor. Os outros países do leste europeu, como consta da publicação, adotaram posições semelhantes quanto a construção de instalações via seca em cascos ou em poços, para armazenagem do CNQ gerado.

Dionisi (1999) analisou a possibilidade da construção de instalações de armazenagem de CNQ em diversos tipos de terrenos geológicos. As tendências e atividades, com relação ao CNQ, nos países da União Européia, foram analisadas pelo autor que observou que uma grande maioria não pensa mais em reprocessamento de combustível nuclear. Ilustra também as salvaguardas, armazenagem temporária - úmida e seca, e faz uma análise dos repositórios de deposição direta que são locais de armazenagem profundos (centenas de metros), nos quais poderão ser armazenados tanto o CNQ, quanto os rejeitos de atividade alta. Até a presente data não existe nenhum repositório efetivamente construído e licenciado para receber esse tipo de material. Dionisi afirma que a Alemanha está estudando a possibilidade de usar uma mina de sal para construir um local

para deposição do CNQ e a Suécia pretende construir um repositório a 500m de profundidade sobre um leito rochoso em local que ainda não foi determinado.

A publicação da ARAO (Agência para a Gerência de Rejeitos Radioativos da Eslovênia) (1999) apresenta onde são gerados os rejeitos radioativos naquele país, e como são gerenciados. O CNQ vem de uma única central nuclear comercial e de um reator TRIGA, na cidade de Ljubljana. A central nuclear de Krsko estava com sua capacidade de armazenagem comprometida até que foram realizados estudos e modificações nos *racks* da piscina, aumentando a capacidade útil. O reator de pesquisas foi construído de acordo com plano específico de armazenagem com capacidade para acomodar todo o CNQ gerado ao longo da sua vida útil deste reator.

O Ministério de Industria y Energia, Espanha, (1999) publicou o plano sobre os rejeitos radioativos da indústria nuclear naquele país, no qual demonstra a situação da gerência do CNQ e dos rejeitos de atividade alta, e qual a estratégia adotada para o futuro com relação à armazenagem temporária dos CNQ. Neste relatório estão apresentados: a gestão de rejeitos radioativos de atividade média e baixa; armazenagem temporária de curto e longo prazo; reprocessamento e gestão final do CNQ, dos rejeitos de atividade alta; interrupção das atividades das usinas; comunicações sociais; planos de pesquisa e desenvolvimento; e, o panorama mundial da gestão de rejeitos radioativos. Quanto à armazenagem temporária do CNQ o plano sugere soluções em duas fases: até o ano 2010, solucionar o problema com relação ao CNQ da central nuclear de Trillo; a construção de uma instalação de armazenagem seca temporária de longo prazo em cascos metálicos multi-propósito no próprio sítio; e, a partir do ano 2010, possuir uma instalação de armazenagem centralizada modular que receba tanto o CNQ como todos os rejeitos de atividade alta.

Em 1999, a IAEA publicou um levantamento, feito em vários países, sobre a armazenagem seca e úmida de combustível queimado. Este levantamento mostrou o estado da arte de cada instalação, incluindo sistemas de transportes. A IAEA conclui que a melhor alternativa é que após o resfriamento nas piscinas dos reatores, a armazenagem do CNQ seja feita em cascos em via seca.

No documento técnico publicado em 2000, a IAEA aborda a tecnologia de armazenagem do CNQ em recipientes (contêineres) de propósitos múltiplos. Os cascos, quanto ao seu propósito, podem ser divididos em: simples, quando desempenham uma única função na gerência do CNQ, por exemplo, transporte ou armazenagem; múltiplos, ou multi-propósito, que desempenham mais que uma função, por exemplo, transporte,

armazenagem e deposição. Os cascos multi-propósito, ainda têm, como requisitos: mobilidade, capacidade de recuperação do CNQ, modularidade, reduções de transferência do CNQ, facilidade no descomissionamento, aceitação do público, e proporcionam uma economia maior.

Ryhänen (2000) discute os procedimentos para determinar um local para a construção de uma instalação para gerência de rejeitos radioativos. Um dos itens é que no planejamento inicial exista a avaliação da opinião pública e que ela seja favorável, e isto, afirma o autor, é difícil conseguir para uma instalação de armazenagem de CNQ, por exemplo.

Fairlie (2000), em seu relatório dirigido ao Greenpeace, estabelece uma comparação entre o reprocessamento do combustível nuclear queimado e a armazenagem seca do mesmo sem o reprocessamento, assegurando que para esta última alternativa o impacto ao meio ambiente é bem menor.

A empresa sueca Svensk Kärnbränslehantering – SKB (2000) divulgou informações sobre o CLAB (Centrallt Mellonlagerung för Använt Bränsle – Instalação Central de Armazenagem Temporária), que começou a ser construída em 1980, para abrigar, em piscinas subterrâneas, o CNQ gerado na Suécia. O problema com relação à segurança foi minimizado, pois as piscinas foram instaladas em cavernas escavadas em rocha e todo o CNQ gerado naquele país é contabilizado e fica sobre salvaguardas.

Andersson e Andrews (2001), em relatório técnico da SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB, Suécia), abordam tema sobre o desenvolvimento de técnicas avançadas de soldagem na fabricação e selamento dos cascos de armazenagem de rejeitos nucleares. Os cascos em questão são de cobre com espessura de 50mm com suportes internos de ferro nodular. Eles têm, como propósito, armazenar o CNQ em repositórios por milhares de anos, pois o cobre tem boa resistência à corrosão. Neste caso, estão sendo estudadas novas técnicas de soldagem pela fusão do material com feixes de elétrons ou por calor de fricção.

Bunn et al. (2001), em relatório sobre a armazenagem temporária de CNQ preparado para a Universidade de Harvard (EUA) e a Universidade de Tóquio (Japão), apresentam os tipos de armazenagem existentes nestes e alguns outros países. Abordam também sobre os custos de armazenagem e de construção de instalações temporárias. A armazenagem temporária de CNQ, como descrevem os autores, é crucial para o futuro da energia nuclear por causa do impacto gerado pela gerência do combustível queimado em controvérsias políticas, perigos ambientais, riscos com relação à proliferação e custos

econômicos. Os dois países em foco no relatório possuem visões antagônicas com relação ao CNQ: o Japão o considera uma fonte valiosa de urânio e plutônio para aplicar na fabricação combustível, ao passo que os Estados Unidos o considera como rejeito porque os custos do retratamento são muito elevados e o reprocessamento permite a extração do plutônio, criando riscos desnecessários quanto à proliferação de armas nucleares.

Hirsch e Neumann (2001) publicaram um relatório de grande impacto ao abordar as conseqüências provenientes de um ataque terrorista ou guerra com relação aos cascos de transporte e armazenagem temporária de CNQ. No relatório são citados ataques com munição perfurante, colisão de um veículo transportando combustível nuclear, queda de um avião comercial na instalação de armazenagem temporária e até mesmo bombardeio aéreo da instalação. As informações constantes deste relatório podem ser aproveitadas para traçar o plano de segurança para os locais de armazenagem propostos em qualquer país.

No Brasil, a Lei Federal 10.308, de 20 de novembro de 2001, estabelece normas para o destino final dos rejeitos radioativos produzidos em território nacional, incluídos a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos radioativos.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear, em 2001, apresentou o segundo relatório sobre a Convenção de Segurança Nuclear no Brasil. Neste relatório, foi feita a atualização dos dados apresentados no relatório anterior e, no Capítulo 1, são feitos a descrição da política nuclear brasileira e o programa das centrais nucleares. O relatório descreve as instalações de Angra 1 e 2 e cita Angra 3 cuja construção e operação continua nos planos do governo brasileiro. Conforme esta publicação, para o licenciamento de uma instalação nuclear são necessários desde a aprovação do local; licença de construção; autorizações para: utilização de material nuclear, operação inicial, operação permanente e descomissionamento (desativação da instalação nuclear); cita as leis federais e normas concernentes. Outra exigência do governo brasileiro, com relação à segurança, para todas instalações nucleares e para qualquer outra que possa gerar um impacto potencialmente significativo contra o meio ambiente é o licenciamento ambiental que inclui: o licenciamento preliminar, a licença de instalação e operação, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto no Meio-Ambiente (RIMA). Neste caso, também é abordada a legislação para atendimento de emergências. Todos esses passos são comuns a todas instalações nucleares e incluem as instalações de armazenagem temporária de CNQ.

Nos últimos anos, as atividades relacionadas ao ciclo do combustível nuclear se tornaram dispersas por todo o mundo e a complexidade do mercado tem aumentado o surgimento de novos fornecedores de serviços relacionados com o ciclo. Em 2001, a IAEA descreveu o perfil nuclear dos países relacionados com essas atividades, incluindo, todos as nações que possuem reatores nucleares e que gerenciam o CNQ. No caso do Brasil, a IAEA relata que o CNQ ficaria guardado no sítio do reator por um longo tempo e não apresenta nenhum outro detalhe adicional.

Alvarez (2002) publicou artigo sobre os problemas que podem ocorrer com o combustível queimado armazenado em piscinas. As piscinas com CNQ se encontram, em muitos casos, em edifícios muito mais vulneráveis que aqueles dos reatores e que se houver um vazamento da água da piscina, o CNQ, densamente armazenado, exposto ao ar e ao calor poderia ocasionar um incêndio do revestimento de zircônio que duraria vários dias e demoraria a ser extinto. Se isto acontecesse, o ^{137}Cs , contido no CNQ, seria liberado. Em média, uma piscina com CNQ contém de cinco a dez vezes mais radioatividade com elementos de meia vida longa que o núcleo de um reator, que para o ^{137}Cs está ente $60 \times 10^{16}\text{Bq}$ e $150 \times 10^{16}\text{Bq}$. O vazamento da piscina pode ser causado por perdas eventuais, evaporação, impactos de aeronaves, quedas acidentais ou intencionais de um casco de transporte de combustível na piscina ou uma explosão dentro ou fora do edifício das piscinas por causa de ataque terrorista.

A fundação finlandesa Bellona Foundation (2002) mostra que a Rússia está armazenando CNQ, retirado de submarinos nucleares, em navios especialmente modificados para esta finalidade. Os navios, portanto, são instalações flutuantes de armazenagem de CNQ que é outro tipo de modelo existente no mundo.

Lidskog e Andersson (2002), em relatório emitido para o SKB sobre a gerência de rejeitos radioativos, anexaram informações sobre o destino do CNQ. No relatório foram analisados dez países: Alemanha, Bélgica, Canadá, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Reino Unido, Suécia e Suíça. Os rejeitos radioativos são considerados problemas com dimensões internacionais. Neste trabalho os autores concluem que a armazenagem e deposição podem ser solucionadas com a participação popular. Os assuntos técnicos devem ser transmitidos de modo adequado para a população para que se possa conseguir a sua aceitação e confiança.

Pennington e Mcgough (2002), após os eventos ocorridos em 11 de setembro de 2001, quando dois aviões comerciais colidiram com os dois edifícios do World Trade Center em Nova Iorque, EUA, discutem a segurança dos cascos de concreto com CNQ se

sofressem o impacto com uma aeronave comercial de grande envergadura. Para o estudo foi considerada a armazenagem seca em cascos de concreto multi-propósito modelo NAC (Nuclear Assurance Corporation). Quanto a esta abordagem teórica, não foi considerada a liberação de radionuclídeos na atmosfera nem exposição dos elementos armazenados ao meio-ambiente.

A U.S.Nuclear Regulatory Commission – USNRC (2002), mantém informações sobre as piscinas de armazenagem do CNQ nos Estados Unidos. Elas servem como armazenagem temporária para resfriamento do CNQ após a sua retirada do reator. Uma informação de interesse é o número previsto de piscinas completamente preenchidas pelo CNQ com o passar dos anos, nos Estados Unidos, se não fosse utilizada a armazenagem seca. Em 2005, haveria 60 piscinas completamente cheias de CNQ, em 2010, 80 piscinas e em 2014, 100 piscinas.

Em relatório técnico sobre a pesquisa e recomendações para a armazenagem de CNQ por longo tempo, a IAEA (2002) analisou a armazenagem temporária em longo prazo. As observações foram emitidas pelos grupos de discussões dentro do contexto de quatro assuntos: armazenagem do CNQ em longo prazo; comportamento do sistema de armazenagem seca em longo prazo; instalações de armazenagem úmida e legislações pertinentes à armazenagem. Os tópicos mais especiais deste relatório são dedicados à discussão e previsão da integridade e recuperação do CNQ.

A instituição russa International Science & Technology Center (2003) expõe um resumo estendido de relatório realizado em parceria com o Cazaquistão que prediz a degradação que pode ocorrer no meio-ambiente por causa da armazenagem de CNQ russo em instalações secas por um período de 50 anos. Afirma-se que os nêutrons emitidos pelo CNQ atingem o material do revestimento e da contenção, zircaloy e aço inoxidável respectivamente, e mudam consideravelmente suas características químico-físicas. A presença de gás hélio pode agravar estes efeitos. Esta mudança pode ocasionar a liberação de produtos de fissão no ambiente por causa de mudanças na microestrutura, na densidade e propriedades mecânicas dos materiais irradiados e aumento da corrosão externa. O nível de degradação do casco, ao final de 50 anos, e o risco de contaminação do meio-ambiente resultante destes processos também são discutidos neste relatório. Os resultados podem ser utilizados na análise de novas tecnologias de manuseio e armazenagem do CNQ.

A USNRC (2003, 2004) disponibiliza informações sobre a armazenagem seca de CNQ. Em algumas instalações o CNQ é mantido em cascos especiais que são descritos ao longo deste trabalho. Antes de ser armazenado o CNQ é resfriado e após a sua

introdução no casco, antes de ser lacrado, é seco e o espaço livre é preenchido com gás inerte.

Em conferência realizada nos Estados Unidos, na cidade de Tucson, Thomaske, em 2003, os anais apresentam os conceitos da Alemanha sobre a armazenagem de CNQ, visto que por decisão do governo da Alemanha, o transporte para instalações de reprocessamento cessará em 2005. Conseqüentemente, todo o CNQ deverá ser armazenado em instalações temporárias de longo prazo. Entre os anos 2002 e 2003 foram verificados alguns aspectos como a segurança destas instalações planejadas, os pré-requisitos de licenciamento e examinados os efeitos do impacto de uma grande aeronave contra a instalação.

Vossnacke et al. (2003) apresentaram a experiência na gerência do combustível armazenado em cascos metálicos e de concreto, denominados, respectivamente, CASTOR e CONSTOR. Os cascos CASTOR foram desenvolvidos na década de 1970 e são utilizados em 19 instalações de armazenagem de CNQ, proporcionando um confinamento seguro e apropriado. Os cascos CONSTOR tiveram seu desenvolvimento iniciado em meados de 1990, construídos com materiais mais comuns de forma a baratear o custo final do produto, sem prejudicar os requisitos de transporte e segurança obtidos nos cascos metálicos. Até 2002, havia 30 cascos CONSTOR armazenados com sucesso.

A Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN (2003) fornece algumas informações a respeito da central de Angra. O reator Angra 3, caso seja construído, com 1350MWe de potência, será semelhante ao de Angra 2, ou seja, a quantidade de CNQ a ser gerada será equivalente.

Bunn et al. (2003), em relatório preparado para a John F. Kennedy College e, novamente, para a Universidade de Harvard (EUA), traçaram um comparativo de custos entre uma instalação de armazenagem temporária via seca em cascos, nos Estados Unidos e Japão. Este relatório compara o custo entre o reprocessamento e a deposição direta do combustível nuclear queimado em repositório final.

A revista Nuclear France (2003) publicou informações sobre a gerência do CNQ na França. Este país utiliza as piscinas de resfriamento dos reatores, piscinas centralizadas, piscinas de centros de pesquisa, piscinas de instalações militares e sistema de armazenagem seca em poços. A capacidade de armazenagem de CNQ em todas as piscinas na França é de 4000ton, mas é mantido, por segurança, espaço livre para mais 1000ton.

Em congresso realizado, em 2003, na Bulgária, na cidade de Plovdiv, podem ser encontradas nos Anais informações sobre os planos de deposição e atividades com

relação ao CNQ na Eslovênia. Uma solução final para o CNQ, naquele país, ainda não foi definida, mas entre o reprocessamento e deposição final, a primeira é a preferida, apesar do custo alto. Contudo, por causa da baixa quantidade de CNQ, a nação optou por um rearranjo na piscina do reator de Krsko, proporcionando maior espaço para armazenagem do CNQ, e ainda existe a previsão do aumento da quantidade de piscinas e da vida útil da central, calculada para 2023. A solução definitiva sobre o destino do CNQ só será dada por volta de 2020.

Roland et al. (2003) traçaram aspectos chaves para a escolha entre os diversos tipos de armazenagem via seca, cascos metálicos, poços e módulos de concreto blindados com aço a serem implantados por uma central nuclear. Essa escolha deve envolver uma combinação de parâmetros tecnológicos, políticos, de licenciamento e questões-chave como: “o que pode ser feito?”, “qual é o tempo envolvido entre a decisão e o comissionamento?”, entre outras, que permitem subsidiar a escolha de um entre os vários tipos de armazenagem do CNQ.

Vaclav (2003) apresentou a situação do CNQ na República Eslovaca. A Eslováquia utiliza energia nuclear desde 1972. Duas de suas centrais nucleares têm piscinas para armazenagem inicial do CNQ, e na central de Bohunice, a mais antiga daquele país, existe uma instalação de armazenagem via seca e na central de Mochovce existem planos de construção, até 2009, de uma instalação seca de armazenagem de CNQ.

A Bellona Foundation (2003) está voltada para o meio ambiente e um de seus trabalhos é a monitoração das emissões radioativas no mar do Norte. Nesse contexto, as contaminações ocorridas na Rússia têm uma atenção especial. O relatório desta Fundação apresenta a situação da frota nuclear russa, das instalações de apoio aos navios militares e submarinos russos, também apresenta a situação do combustível queimado retirado dessas naves e a sua gerência. Descreve, ainda, as centrais nucleares e toda a indústria nuclear russa. Com relação ao CNQ, informa quais são as instalações de reprocessamento e onde o CNQ fica armazenado antes de ser reprocessado.

A IAEA é responsável por várias conferências que serviram como material de apoio para a reunião de informações sobre a armazenagem de combustível queimado. Os Anais da Conferência Internacional sobre Armazenagem de Combustível Queimado, realizada em Viena, em 2003, trazem muitos relatórios interessantes.

Entre eles podem ser citados:

- Ahmed et al. (2003) apresentam a situação do combustível queimado gerado no Paquistão e o método de armazenagem considerado o mais adequado para aquele país.

A opção escolhida foi a da armazenagem seca em silos de concreto, mas ainda estão sendo avaliados dois modos diferentes de transferência do combustível da piscina para a instalação: a) individualmente, em tambores de aço para 11 ou 36 elementos, e que seriam carregados na piscina; b) reunidos e fechados em uma célula blindada especial soldada.

- Hanson e Chollet (2003) dissertam sobre a experiência obtida da armazenagem do combustível queimado em módulos de concreto horizontais. Esse sistema, conhecido por NUHOMS, foi instalado nos EUA, Armênia e encomendado pela Ucrânia. Os módulos acondicionam o CNQ de reatores tipo PWR (Pressurized Water Reactor), BWR (Boiling Water Reactor), RBMK (Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalni) e VVER (Reator de potência refrigerado à água e moderado à água).

- Biro e Rodna (2003) apresentam a estratégia adotada pela Romênia com relação ao combustível queimado. A central nuclear de Cernavoda iniciou suas operações, em 1996, e produziu 100ton de CNQ no reator 1, por enquanto o único existente pois o reator 2 está em construção. A Romênia selecionou a solução de armazenagem do CNQ em via seca em módulos de concreto produzidos por uma empresa canadense.

- Khan e King (2003) expõem um estudo de caso, no Canadá, sobre o processo de licenciamento de uma instalação de armazenagem seca de CNQ. O processo de licenciamento foi iniciado, em 1996, com uma carta de intenções e a aprovação foi decidida em 2000, e o primeiro edifício de armazenagem de CNQ da instalação se tornou operacional, em 2003. O trabalho dos autores dá uma noção do tempo necessário para que uma instalação de armazenagem temporária no Brasil se torne operacional, visto que o processo de licenciamento relatado é similar ao exigido pela CNEN.

- Kulkarni et al. (2003) realizaram um trabalho no qual informam como o CNQ é gerenciado nas instalações indianas. A armazenagem úmida é predominante na Índia, nos diversos reatores e nas plantas de reprocessamento. É necessário aumentar ou construir novas instalações de armazenagem, em razão da diferença de tempo existente entre a geração do CNQ pelos reatores e seu reprocessamento. Dentre as três instalações de armazenagem que estão sendo construídas fora dos sítios dos reatores, uma é seca e o CNQ permanece em cascos de concreto e as outras duas são piscinas fora da instalação da central.

- Coufal e Brzobohatý (2003) relatam a situação do CNQ na República Checa e os tipos de instalações de armazenagem temporárias em longo prazo construídas ou planejadas naquele país. Após a aprovação pelo governo checo, em 2002, sobre o conceito de armazenagem do CNQ, foram consagradas as instalações secas com cascos metálicos,

localizadas nos sítios das centrais nucleares, e uma instalação subterrânea de apoio por via seca. Esta última consta de um projeto para a armazenagem de cascos transportados que seriam levados por via férrea para túneis subterrâneos horizontais intercomunicados.

- Lietava et al. (2003), também da República Checa, apresentam, especificamente a situação da gerência do CNQ na instalação de Dukovany que foi comissionada em 1997. Esta instalação consta de um edifício com um saguão de armazenagem seca em cascos metálicos com capacidade de 600ton de CNQ. Com o passar do tempo foi necessário aumentar a capacidade de armazenagem da instalação com a construção de outro edifício que entrará em operação até o final de 2005. O relatório conclui, ainda, que a instalação existente é segura e nunca ocorreram eventos anormais.

- Takats e Buday (2003) apresentaram a situação do CNQ na Hungria, que possui na central de Paks, quatro reatores nucleares. Após um processo de seleção, contando com sete empresas que apresentaram tecnologias de armazenagem diferentes, foi escolhido o sistema de armazenagem seca em poços, cuja instalação foi comissionada em 1997.

- Verdier et al. (2003) apresentaram a experiência suíça da armazenagem temporária de curto prazo e transporte de cascos. A Suíça adotou duas formas diferentes de gerenciar o CNQ: enviá-lo para as instalações de reprocessamento em La Hague, França, e em Sellafield, Inglaterra, e ainda armazená-lo em uma instalação seca, central, chamada ZWILAG, na própria Suíça. Na França, o CNQ é armazenado pela própria instalação de reprocessamento e fica aguardando a época de ser reprocessado. Na Inglaterra, o CNQ é colocado em cascos metálicos especiais multi-propósito e enviado para a instalação úmida (piscina centralizada), permanecendo nestes cascos até o reprocessamento.

A International Atomic Energy Agency (2003a) editou uma publicação, também disponível na Internet, que contém o perfil dos países que possuem energia nuclear e engloba informações gerais sobre estes países, taxas de crescimento, indicadores do setor elétrico, situação da energia nuclear, indústrias nucleares e legislação e regulamentos, com todas as atividades desde a mineração até a gerência do combustível queimado. Nesta publicação, em relação ao Brasil, a IAEA informa que a CNEN é a responsável pela regulação e deposição final dos rejeitos radioativos, e não existem planos para gerência dos rejeitos de atividade alta e nem de CNQ, que temporariamente se encontra armazenado em piscinas.

Em outro documento, a International Atomic Energy Agency (2003b) publicou dados que contém estimativas sobre o crescimento populacional e energético mundial até o

ano 2030. Nele está incluído um panorama para a América Latina e para o Brasil. Os dados são importantes para que se possa fazer uma previsão do aumento de consumo de eletricidade para o Brasil até o ano 2030.

O relatório da CNEA (2003) (Comisión Nacional de Energia Atômica), Argentina, expõe sobre a segurança na gerência do combustível queimado. Naquele país foram adotadas medidas para assegurar que as pessoas e o ambiente sejam protegidos apropriadamente em todos os estágios do manuseio do CNQ. Entre elas: remoção do calor residual; controle da criticalidade; minimização da geração de rejeitos radioativos; proteção efetiva das pessoas, sociedade e ambiente, ao evitar riscos biológicos, químicos, e ações que possam gerar impactos para as gerações futuras.

Romanato e Rzyski (2003) realizaram um levantamento dos aspectos ambientais provenientes do transporte de combustível nuclear queimado fora dos limites do reator. Nesse levantamento, incluíram a sistemática de transporte, desde a retirada do CNQ do reator até a chegada do mesmo à instalação de armazenagem temporária. Estas informações fazem parte de um dos tópicos do programa de armazenagem de CNQ em locais além das fronteiras da instalação do reator de onde o CNQ é retirado.

Em 2003c, a IAEA publicou documento que aborda a verificação e pesquisa sobre o comportamento das instalações de armazenagem de CNQ, e relata a experiência de vários países que possuem reatores nucleares comerciais. Quanto à armazenagem úmida foram abordadas a corrosão dos revestimentos de liga de zircônio, de aço inoxidável e ligas de magnésio, com indicação da melhor forma de controle químico da água das piscinas, seu tratamento físico e controle da temperatura e a interação com os materiais utilizados no revestimento e nos *racks* de armazenagem. Quanto à armazenagem seca, o relatório cita processos de secagem do CNQ e a experiência de vários países que contam com esse tipo de armazenagem. Ainda são discutidos os problemas que podem ocorrer nas instalações de armazenagem de CNQ, as tecnologias e técnicas de monitoração.

O relatório técnico da SKB, emitido em 2003, sobre os custos da gerência de rejeitos radioativos gerados em reatores. Mostra que os proprietários das centrais nucleares na Suécia são os responsáveis pela gerência e deposição do CNQ de forma segura. Os custos calculados incluem: sistemas de transporte; a instalação de armazenagem temporária de longo prazo centralizada do CNQ - CLAB (Centrallt Mellonlagerung för Använt Bränsle); repositório final para rejeitos de atividade baixa; planos para a construção de uma fábrica de cascos e encapsulação; repositório final para rejeitos de atividade alta e média; e, repositório para rejeitos de descomissionamento.

No relatório emitido, em 2003, pelo General Accounting Office, Estados Unidos, foi apresentado um estudo realizado em razão da possibilidade de atentados terroristas ou de um acidente grave com o CNQ comercial gerado naquele país. A conclusão é que apesar de hoje ser baixa a probabilidade de acidentes, após o término da construção do repositório de Yucca (EUA), em 2010, ocorrerá um aumento no transporte do CNQ para esse repositório e a probabilidade de imprevistos também aumentará. A GAO propõe algumas recomendações que podem reduzir os riscos de transporte e sugere plano específico para os locais onde o CNQ está armazenado.

O programa suíço de gerência de rejeitos radioativos está descrito no Office of Civilian Radioactive Waste Management (2004). A Suíça construiu um depósito para armazenagem temporária de curto prazo que serve tanto para guardar o CNQ como para os rejeitos de atividade alta e média. Esta instalação de armazenagem seca, chamada ZWILAG, situada no norte do país, recebe o CNQ de todo o território suíço. A experiência no transporte do CNQ no país é muito grande, visto que, desde 1970, ele é realizado por meio de vários modelos de cascos de aço para as instalações de reprocessamento na França e no Reino Unido.

A International Atomic Energy Agency (2004) divulga informações sobre repositórios geológicos profundos na etapa de projeto ou construção, que podem ser um dos destinos finais do combustível queimado após a armazenagem temporária de longo prazo. A previsão para término da construção do primeiro repositório geológico é para meados de 2010. Este repositório, situado nos Estados Unidos (Yucca Mountain, Nevada), deverá armazenar grande parte do CNQ gerado naquele país. A IAEA cita que vários outros países também estão estudando locais para construção de um repositório profundo e enquanto isso, o CNQ deve permanecer armazenado interinamente em via seca ou úmida.

A IAEA (2004a) editou relatório técnico com informações práticas do descomissionamento de reatores nucleares que atingiram o final de sua vida útil, com o objetivo de evitar atrasos e custos desnecessários provenientes da falta de estratégia, de infra-estrutura e de equipamentos necessários. Neste documento, um capítulo é dedicado ao processo de remoção do combustível nuclear queimado que porventura esteja armazenado na piscina do reator. A decisão preferida pelos responsáveis pelo descomissionamento é a retirada do CNQ da instalação e o envio da carga para uma instalação de armazenagem, reprocessamento ou deposição. É enfatizada a troca do CNQ em ciclos menores, no período final da vida útil do reator, de modo que o mesmo permaneça menos tempo na piscina de resfriamento, e esta possa ser esvaziada em tempo

menor do que normalmente aplicado. O CNQ deve ser enviado para uma instalação de armazenagem úmida ou seca, fora das instalações do reator.

O documento publicado pelo Consejo de Seguridad Nuclear (2004), Espanha, informa a situação dos rejeitos radioativos de atividade alta. Os espanhóis classificam os rejeitos de atividade alta em: CNQ e líquidos provenientes do reprocessamento. Com exceção do CNQ gerado na central de Vandellós 1, enviados à França para reprocessamento, o restante se encontra nas piscinas dos reatores. Como as piscinas das centrais nucleares têm capacidade para armazenar até 2010, nada foi proposto ainda quanto à armazenagem temporária, a não ser para a central de Trillo que teve sua capacidade esgotada, em 2003. Nesta central optou-se por um sistema de armazenagem seca em cascos metálicos.

A empresa proprietária das instalações nucleares nos Estados Unidos, a Amergen Energy Company (2004), possui informações a respeito da armazenagem do CNQ gerado pelos reatores de suas propriedades de modo que suavize o impacto ambiental. Nesse estudo foram consideradas as opções de agrupamento de varetas, armazenagem em cascos no próprio sítio, armazenagem em poços, em silos horizontais, construção de novas piscinas, envio do CNQ para uma instalação federal, para uma instalação de reprocessamento, e a alternativa preferida é a expansão da capacidade da piscina existente.

A USNRC (2004a) licencia instalações de armazenagem de CNQ nos Estados Unidos e apresenta a primeira renovação de licença de uma instalação de armazenagem seca por mais 40 anos, além dos 20 anos estabelecidos na licença original.

A South Carolina Electric & Gas Co. (2004) estação de geração de energia elétrica com combustível nuclear, estudou uma alternativa melhor para a gerência do CNQ e entre o agrupamento de varetas, armazenagem em cascos no próprio sítio, também optou pela expansão da capacidade da piscina existente em suas instalações.

Várias centrais nucleares e outras empresas ao redor do mundo possuem endereços eletrônicos na Internet e divulgam anualmente o tipo de tratamento dado ao CNQ e informações sobre a sua remoção. Entre elas pode-se citar:

- Central de Barsebäck (2004), Suécia, informa sobre a remoção de CNQ de forma cronológica a partir de 2000, com a transferência do CNQ da piscina do reator número 1, que havia sido fechada e estava praticamente cheia, para a piscina do reator número 2, que ainda possuía muito espaço e o envio posterior ao CLAB, instalação de armazenagem temporária de longo prazo de CNQ. A alternativa de transferência de CNQ

de uma piscina quase cheia para outra de instalação mais nova ou de outro reator é corriqueira em países que possuem mais de um reator nuclear.

- O endereço da Zaporozhye Nuclear Power Plant (2004) apresenta dados sobre a armazenagem realizada nesta central nuclear situada na Ucrânia. A armazenagem do CNQ é feita em instalação seca em cascos de concreto. São apresentadas as dimensões dos cascos utilizados e um esquema da instalação de armazenagem existente.

- A empresa nuclear Argentina INVAP (2004) apresenta o sistema de armazenagem seca de combustíveis queimados utilizado na central atômica de Embalse. Esse sistema é composto por silos de concreto armado nos quais são introduzidos tambores de aço com o CNQ alojado. Cada tambor tem capacidade para 60 elementos combustíveis e em cada silo são armazenados 9 tambores empilhados verticalmente.

- No *site* francês La Radioactivité (2004) é explicada a forma de retirada do CNQ dos reatores. O CNQ gerado anualmente por um reator PWR de 1,3GW contém 33ton de urânio enriquecido a 0,9%, 360kg de plutônio, 1,2ton de produtos de fissão e 27kg de actínídeos e entre estes, geralmente estão 14kg de neptúnio, 12kg de amerício e 1kg de cúrio. Os principais cuidados com o CNQ são: blindagem, controle e segurança, meia-vida bastante longa de certos elementos, eventuais acidentes de vazamento por corrosão ou transporte e proliferação de armas nucleares. O CNQ é composto por 97% de urânio e plutônio que podem ser reaproveitados para a produção de novos combustíveis e apenas 3% são rejeitos.

- A SGN – Société Générale pour les Techniques Nouvelles (2004) aborda tema sobre a gerência do CNQ na França, país optante pelo reprocessamento de combustível queimado e mostra a experiência obtida em outros países. Na Holanda, a SGN colaborou com a constru o da instala o para armazenar CNQ e rejeitos de atividade alta chamada Covra. A SGN tem preparado vários estudos para a constru o de instala es de armazenagem do CNQ, como na Itália, Reino Unido (condicionamento do CNQ do reator de Dounreay), na Rússia participa de estudos de instala o de armazenagem para abrigar o CNQ no navio Lepse e nos Estados Unidos, estuda um método para abrigar o CNQ na piscina de Hanford

- A SKB (2004) apresentou sua instala o central de armazenagem temporária de longo prazo CLAB. O CLAB foi construído para armazenar CNQ de todas as instala es nucleares suecas por 30 anos, e também armazena uma pequena quantidade de rejeitos como barras de controle.

- A gerência do combustível da central de Koeberg, África do Sul, foi ratificada pelo South African Quality Institute (2004). Em 1995, o governo da África do Sul havia optado pela armazenagem seca do CNQ, mas, em 1996, decidiu pelo aumento da capacidade das piscinas pela modificação dos *racks*. Essa operação terminou em 2002, e foram utilizados princípios de gestão da qualidade para não ultrapassar o orçamento inicial e não comprometer a segurança.

- A Eskom, empresa que distribui eletricidade na África do Sul (2004), apresenta a experiência da central de Koeberg, na gerência dos rejeitos de atividade alta, média e baixa. Após a decisão de aumentar a capacidade das piscinas, foram adquiridos cascos metálicos para ficarem como reserva caso houvesse atrasos. Os quatro cascos foram utilizados de modo que não prejudicassem a armazenagem que foi re-arranjada com a instalação de novos racks.

- O Nuclear Threat Initiative – NTI, sediado em Washington, D.C., Estados Unidos, (2004) é um organismo internacional que relata a situação do CNQ em vários países. Entre eles, a Ucrânia, que além dos problemas de armazenagem do CNQ passou por apuros durante o acidente no reator da central de Chernobyl.

- O mesmo NTI (2004a) relata como é a gerência do CNQ na Armênia e assim como de todo o CNQ do leste europeu. Quando a Rússia parou de receber o CNQ dos provenientes dos países da cortina de ferro agregados a União Soviética, ocorreu um dilema em todos eles quanto ao que fazer com o CNQ. A Armênia neste caso também não foi exceção, só que sua situação foi agravada, pois as piscinas de resfriamento da central de Metsamor estavam completas e não podiam receber mais combustível queimado. O governo francês, neste caso, ofereceu ajuda para a Armênia para a construção de uma instalação de armazenagem temporária de longo prazo seca.

- Quanto à Ucrânia, o NTI (2004b) mantém informações sobre a gerência do CNQ que também era armazenado nas piscinas de resfriamento antes de ser enviado para Rússia para reprocessamento. Após 1992, a Rússia parou de receber o CNQ para armazenagem e por este motivo várias instalações ucranianas começaram a desenvolver sistemas de armazenagem temporária de longo prazo de CNQ, como exemplo, a central de Zaporozhye desenvolveu um sistema de armazenagem em cascos de concreto.

- A empresa Nuclearelectrica (2004), responsável pela central nuclear de Cernavoda na Romênia, cita informações sobre o sistema de armazenagem intermediária de CNQ. O combustível permanece por oito anos em piscina de resfriamento e posteriormente deverá ser enviado para uma instalação de armazenagem modular seca.

- A companhia Slovenske Elektrarne (2004) divulgou como pretende realizar o descomissionamento de instalações nucleares na Eslováquia. O CNQ é reprocessado, mas do reator A1 de Bohunice, parte é enviada para a Rússia para reprocessamento e o restante deve ser temporariamente armazenado em instalações úmidas (piscinas) até o reprocessamento.

- A central nuclear de Paks (2004), na Hungria, oferece informações sobre a armazenagem temporária de longo prazo do CNQ no país. Ela consiste de um prédio de armazenagem seca com poços de convecção. O ar entra naturalmente no prédio, circulando pelos tubos onde está armazenado o CNQ, realizando a troca de calor e o conseqüente resfriamento. Este ar é monitorado e posteriormente liberado na atmosfera. Este sistema, independente de energia elétrica para acionar ventiladores ou insufladores de ar, é mais seguro e é conhecido como resfriamento passivo. Este sistema foi projetado por um consórcio franco-britânico GEC-Altshon com capacidade para armazenar combustível gerado por 50 anos.

- Posiva Oy (2004), Finlândia, descreveu a solução adotada por aquele país com relação à armazenagem de CNQ. Após o resfriamento inicial na piscina, o CNQ segue para as instalações de armazenagem temporária de longo prazo em cascos a serem mantidos novamente em piscinas por vários anos, até a possibilidade de deposição final sobre a qual o país ainda não decidiu como deverá ser.

- A World Nuclear Association (2004) informa a respeito da quantidade de centrais nucleares no mundo e o consumo de energia elétrica global. Cita que além dos reatores comerciais, existem mais de 280 reatores de pesquisa além dos reatores em navios e submarinos. A quantidade de CNQ gerado por esses reatores não chega a equivaler a quantidade dos reatores comerciais. O destino do CNQ está sendo planejado principalmente porque a Rússia e os Estados Unidos estão descomissionando seus navios nucleares.

- A World Nuclear Association (2004a) informa que a China iniciou seu programa nuclear em 1970 e, em 1987, formulou o programa de gerência do CNQ com destino ao reprocessamento. O país possui sistema de armazenagem temporária de curto prazo no reator e em instalações distantes do reator. As quantidades de CNQ estão aumentando e calcula-se que, em 2020, atingirá 12.300ton de CNQ acumulado em todo o período. O complexo de LanZhou abrange uma instalação de armazenagem temporária de CNQ do tipo úmida e uma instalação de reprocessamento.

- O Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System (INFCIS, 2004), disponibilizado pela IAEA, apresenta informações sobre instalações secas e úmidas de armazenagem de CNQ em todo o mundo.

Foram observadas, ainda, algumas informações sobre energia elétrica no Brasil:

O antigo Ministério da Infra-estrutura do Brasil (1990), publicou informações referentes ao setor elétrico que serviram de base para traçar as perspectivas de consumo para os próximos anos. A previsão da demanda e consumo no período de 1991 a 1993 estabeleceu parâmetros para visualizar os valores nos anos seguintes e a análise da quantidade de energia que seria necessário produzir. Neste plano os problemas sócio-ambientais enfrentados pelos países que utilizam a energia nuclear, também foram estudados tais como: armazenagem dos rejeitos radioativos; controle de segurança; e, eventual evacuação da população em caso de acidente e mitigação dos impactos radiológicos e,convencionais ocasionados ao meio ambiente. O aumento na oferta de energia elétrica, resultante da geração nuclear com conseqüente aumento da quantidade de reatores nucleares, proporciona um aumento no consumo de combustível nuclear e conseqüente aumento do CNQ. A previsão quanto ao aumento de consumo de energia elétrica gerada em centrais nucleares indica, portanto, mais CNQ a ser armazenado.

O Ministério de Minas e Energia do Brasil (2002) apresentou um plano de expansão do Plano Decenal para o período de 2003 a 2012. O documento traz a análise e os resultados obtidos nos estudos realizados até 2002, para sinalizar e buscar a compatibilidade entre as previsões de aumento na demanda e a programação da expansão da oferta de energia elétrica para os cenários futuros considerados no setor nuclear.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2004) publicou dados sobre a situação da demanda de energia elétrica no Brasil e informações sobre importações de energia como complemento do consumo atual. Com esses dados, pode-se verificar qual a demanda de crescimento de energia elétrica do país para os anos vindouros e que as importações de energia da Argentina, Venezuela e Bolívia deverão ser ampliadas. Se fossem construídas mais usinas nucleares no Brasil isto seria desnecessário. Outro dado é a utilização, sobretudo na região norte do país, de energia provinda de termelétricas de óleo diesel, o que colabora para o aumento da poluição e do efeito estufa. O investimento brasileiro previsto é para a construção de centrais termelétricas de gás natural, cujo investimento é menor do que para construção de hidrelétricas, mas ainda assim causa o aumento mundial do efeito estufa.

- No *site* da Energia Brasil (2004), apresentado pela Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (GCE) do Governo Brasileiro, pode-se obter respostas para as dúvidas mais frequentes da população, dicas para economizar eletricidade e notícias que informam sobre a capacidade nuclear na geração de energia elétrica no Brasil e no mundo. Conforme esta mesma página, em outro local do *site* (2004a), a oferta de energia elétrica no Brasil está aquém da demanda, e necessita ser importada.

3 ESTADO DA ARTE NA GERÊNCIA DO CNQ

Para a armazenagem do CNQ é necessário conhecer as dimensões dos diversos elementos combustíveis. A seguir são dadas as dimensões típicas de alguns tipos de combustível nuclear.

3.1 Combustível nuclear nos reatores brasileiros

Os combustíveis nucleares são formados por elementos sob diversas formas de compostos e materiais estruturais, revestimento e estrutura física. Os elementos combustíveis podem ser de Urânio, Tório ou Plutônio. O mais comum é o Urânio, que é utilizado na forma de ligas metálicas, cerâmica ou dispersões. Para os reatores de água leve e água pesada o utilizado é o UO_2 . No Brasil, os reatores Angra 1 e 2 são do tipo água leve e o combustível de Urânio.

O reator PWR (*Pressurized Water Reactor*) de Angra 1 possui 121 elementos combustíveis montados na disposição 16X16 varetas, cada vareta de *zircaloy 4* tem comprimento de 3,65m, 10mm de diâmetro e abriga várias pastilhas de UO_2 enriquecidas com ^{235}U a 2,6%. Angra 2 possui 193 elementos montados na configuração 17X17 e cada vareta, também de *zircaloy 4* com comprimento de 3,9m e 10,75mm de diâmetro, abriga pastilhas de UO_2 enriquecidas a 2,5%. Na figura 3.1 é apresentado um esquema do combustível tipo PWR.

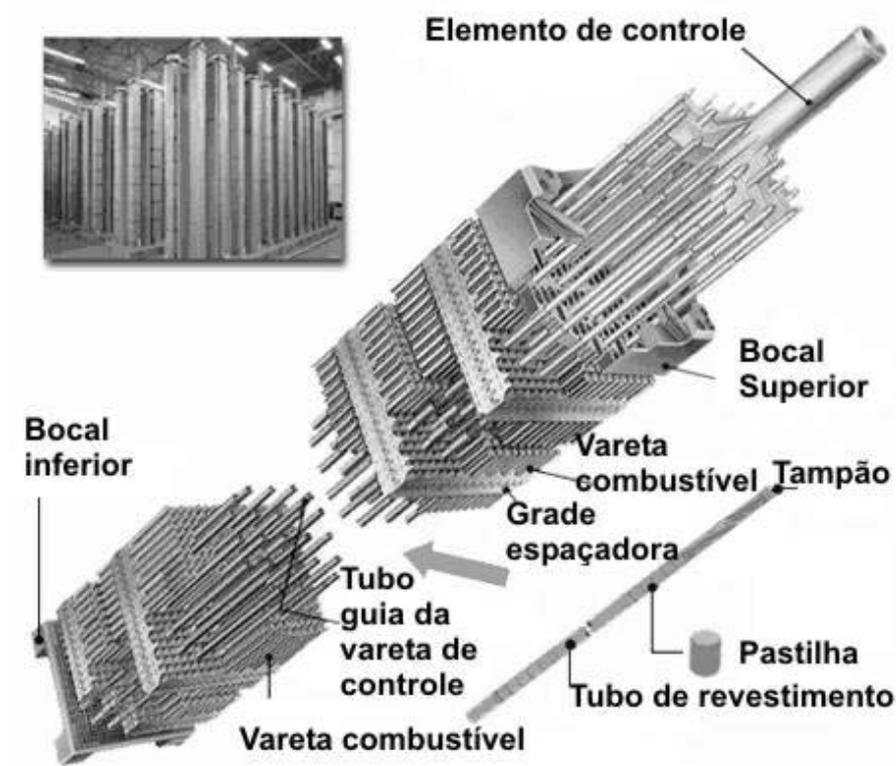


Figura 3.1 - Corte do combustível PWR

Fonte: www.mnf.co.jp/pages2/pwr2.htm

O reator TRIGA (*Training, Research, Isotope, General Atomics*), Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear - CDTN (Minas Gerais), possui 59 elementos combustíveis feitos com hidreto de urânio e zircônio, enriquecido com ^{235}U a 20% e possui revestimento de alumínio. Cada elemento tem o formato cilíndrico e possui 3,73cm de diâmetro por 73cm de comprimento (Figura 3.2).

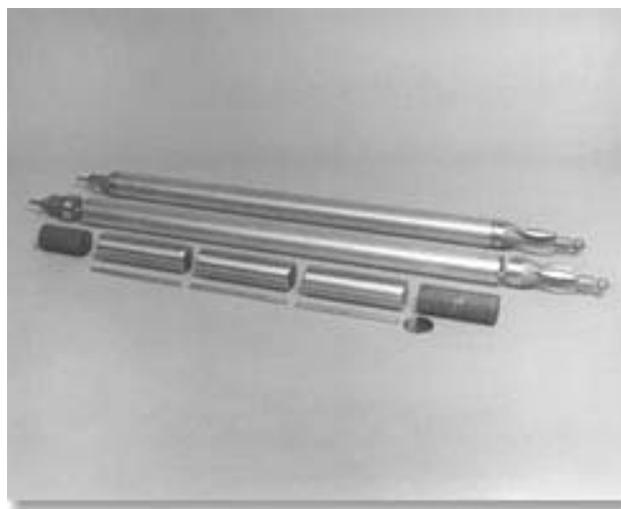


Figura 3.2 - Combustível TRIGA

Fonte: <http://triga.ga.com/>

O reator ARGONAUTA (*Argonne Nuclear Assembly for University Training*), do Instituto de Energia Nuclear – IEN (Rio de Janeiro), possui elementos formados por placas, a quantidade de elementos é variável por placa. Cada placa tem 7,25cm de largura por 61cm de comprimento e espessura entre 0,243cm e 0,182cm, o combustível utilizado é o U_3O_8 enriquecido com ^{235}U a 19,91%.

O reator de potência zero, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha, São Paulo), é do tipo tanque, possui 680 varetas combustíveis de 1,19m de comprimento e 9,8mm de diâmetro externo. Cada vareta possui 52 pastilhas de UO_2 enriquecidas com ^{235}U a 4,3% e seu revestimento é de aço inoxidável.

O reator do IPEN, IEA-R1, é do tipo piscina aberta e possui 24 elementos combustíveis MTR (*Materials Testing Reactor*) com comprimento de 88cm e largura de 8cm e espessura de 7,6cm, cada qual contendo 18 placas combustíveis planas feitas de U_3O_8 disperso em matriz de alumínio, ou U_3Si_2 disperso em matriz de alumínio, ambos enriquecidos com ^{235}U a 19,75%.

Todos esses combustíveis, como pode ser visto acima, têm formatos diferentes, materiais combustíveis diferentes e enriquecimentos diferentes, razão pela qual não podem ficar em uma mesma piscina de armazenagem. A figura 3.3 mostra uma comparação entre os tamanhos dos combustíveis citados.

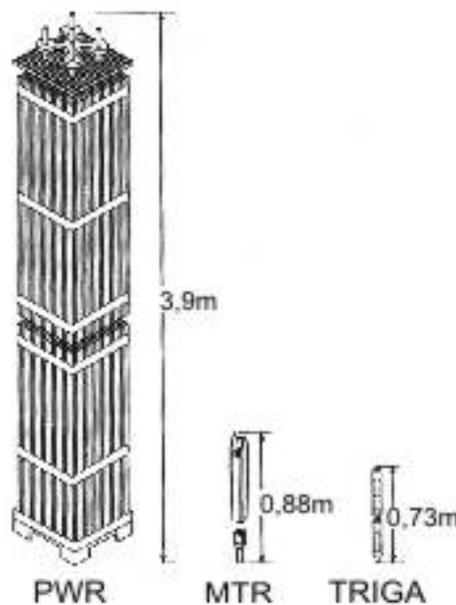


Figura 3.3 - Comparação entre combustíveis PWR, MTR e TRIGA

Fonte: <http://web.em.doe.gov/eis/s27.html>

3.2 Outros tipos de combustíveis nucleares existentes no mundo

Existem ainda, vários tipos de combustíveis nucleares, para cada tipo de reator. Abaixo são apresentados dois tipos de combustíveis utilizados em muitos países e que são citados ao longo deste trabalho.

O reator tipo BWR (*Boiling Water Reactor*) utiliza um combustível muito parecido com os do PWR, ou seja, varetas agrupadas em um elemento em formação quadrada (Figura 3.4), com UO_2 e enriquecimento variando de 1,7 a 3,1%.

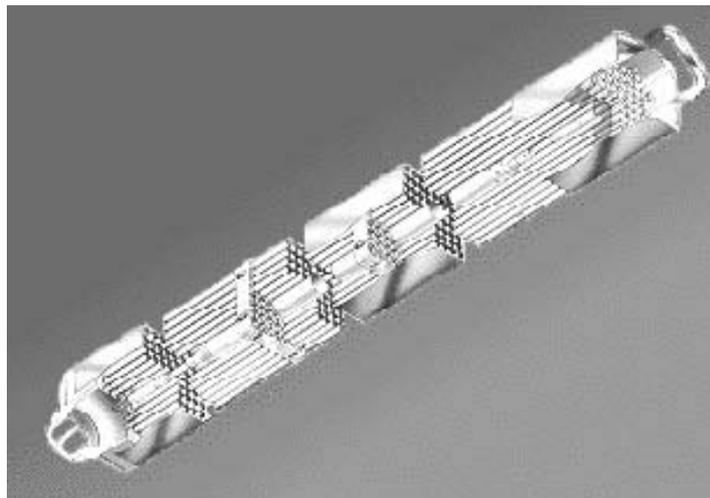


Figura 3.4 - Combustível BWR

Fonte: <http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/division/fuel/base1.html>

Os reatores de água pesada PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) ou CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*) utilizam como combustível, pastilhas de UO_2 sem enriquecimento. A quantidade de varetas varia de 7 a 37, em feixes cilíndricos de 0,5m de comprimento (Figura 3.5).

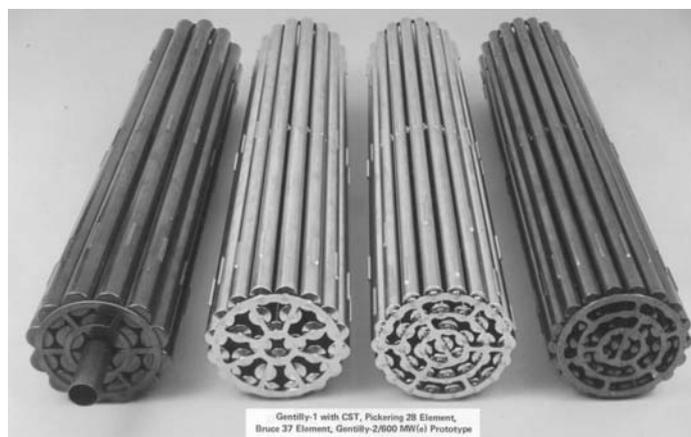


Figura 3.5 - Combustível CANDU

Fonte: <http://canteach.candu.org/imagelib/37000-fuel.htm>

3.3 Armazenagem do combustível nuclear queimado

Toda usina nuclear “queima” combustível para poder funcionar. Um reator com potência de 1GWe, gera de 20ton a 30ton por ano de combustível queimado (Bunn et al., 2001).

A gerência desse combustível queimado torna-se crucial nos dias de hoje, porque conseguir espaço suficiente nas instalações está se tornando uma tarefa árdua e as alternativas escolhidas têm gerado controvérsias tanto políticas, como relativas aos riscos de proliferação de armas, danos ao meio ambiente e aumentos no custo do combustível.

A política sobre o destino do combustível queimado, quanto ao reprocessamento ou à deposição final, está indefinida, portanto o material deve aguardar em local provisório seguro, mas sem nenhum tipo de tratamento.

Até 2003, aproximadamente 25×10^4 ton de combustível queimado foram geradas no mundo em reatores nucleares civis, e algo em torno de $17,1 \times 10^4$ ton permanecem armazenadas, conforme informação da IAEA - *International Atomic Energy Agency* (2004). O restante está sendo, ou já foi, reprocessado.

Atualmente, existem dois métodos de armazenagem de combustível: por via úmida utilizando água como meio de refrigeração e por via seca na qual a refrigeração é feita com circulação de ar.

Qualquer que seja o método de armazenagem escolhido, este deverá atender aos princípios ALARA e o projeto deverá levar em conta requisitos de segurança nuclear, operação, salvaguardas, qualidade, confiabilidade, manutenção, reparos e custos.

Para atender essas premissas, toda instalação de armazenagem temporária é construída de modo que sejam minimizados o perigo de criticalidade, contaminações e exposição dos operadores à radiação; o controle para que não ocorra a criticalidade deve ser mantido durante todas as fases de manuseio, armazenagem e transporte (se for o caso); o CNQ deve ser contido corretamente e o casco deve proporcionar blindagem adequada; o CNQ deve estar protegido estruturalmente, sem elevação da temperatura acima de limites que possam ocasionar fusão no material do revestimento. Os materiais e sistemas utilizados devem ter alta confiabilidade e se necessário, devem ser utilizados sistemas redundantes. O sistema da qualidade deverá ser aplicado a todas as fases desde o projeto até o descomissionamento da instalação, de modo que assegure a conformidade dos itens e processos utilizados, gerando evidências de que tudo foi feito de acordo com o estabelecido em projeto e licenciado pelos órgãos competentes.

3.3.1 Armazenagem via úmida

Quando o combustível nuclear é removido de um reator por causa da perda de eficiência desejada, [perto de 1/3 do combustível do reator é queimado e substituído a cada 12 a 18 meses, conforme informação do NRC - *Nuclear Regulatory Commission* (2002)], está intensamente radioativo ou usualmente chamado ‘quente’. Para decair durante um determinado período, o combustível queimado deve ser acondicionado em piscinas com água, existentes nas instalações de cada reator comercial.

Após a interrupção do funcionamento do reator para substituição de combustível queimado por um novo, a tampa do núcleo do reator é retirada e o CNQ é retirado do núcleo com auxílio de um equipamento adequado (máquina de transferência) e transferido para a piscina de resfriamento. Toda a operação de substituição, desde a abertura do reator, transferência do CNQ e colocação de combustível novo no núcleo é realizada sob a água. A água é uma blindagem eficiente e proporciona uma boa refrigeração, sendo ela mesma constantemente purificada. A tabela A1 do Anexo 1 apresenta os principais radionuclídeos existentes no CNQ após 5 meses de armazenagem em piscina.

Na piscina de armazenagem, o calor de decaimento, expresso como potência dos produtos de fissão, diminui com o passar do tempo (Figura 3.6).

Uma tonelada de combustível queimado de um reator LWR (*Light Water Reactor*) de 600MWe de potência, gera aproximadamente 2000kW de calor de decaimento ao ser retirado. Este calor diminui para apenas 10kW após um ano e para 1kW após 10 anos de armazenagem (Mounfield, 1991).

A tecnologia de armazenar o combustível queimado em água foi desenvolvida para o primeiro reator nuclear de pesquisa em *Oak Ridge* (EUA), em 1943, (IAEA, 1982). Após a diminuição do nível de radiação inicial, período que pode perdurar de seis meses a dez anos, o combustível pode continuar armazenado na piscina por um período maior, ou pode ser colocado em uma das diversas formas de armazenagem seca, ou ainda, pode ser enviado para uma instalação de reprocessamento. Após seis meses a maioria dos elementos de meia vida curta praticamente decaem para o estado fundamental; p. ex. a atividade inicial de um elemento de meia vida igual a 10 dias é reduzida $2,6 \times 10^5$ vezes no final de seis meses (*La Radioactivité*, 2004).

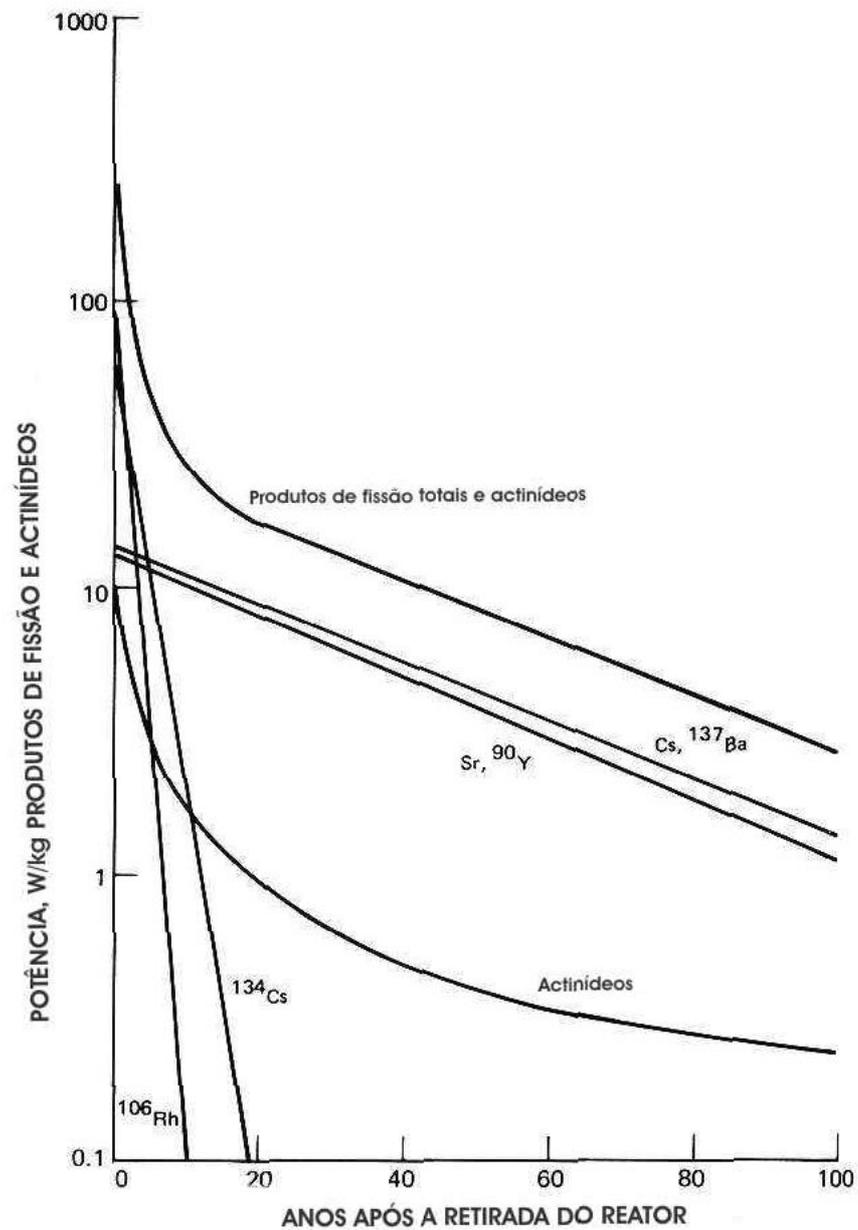


Figura 3.6 - Calor gerado por diferentes elementos radioativos contidos no combustível nuclear queimado retirado do reator em função do tempo.

Fonte: National Academy of Science (1975)

Na Figura 3.7 são mostrados os níveis de radioatividade de certos produtos de fissão em função do tempo e na Figura 3.8, os níveis de radioatividade dos actínidos.

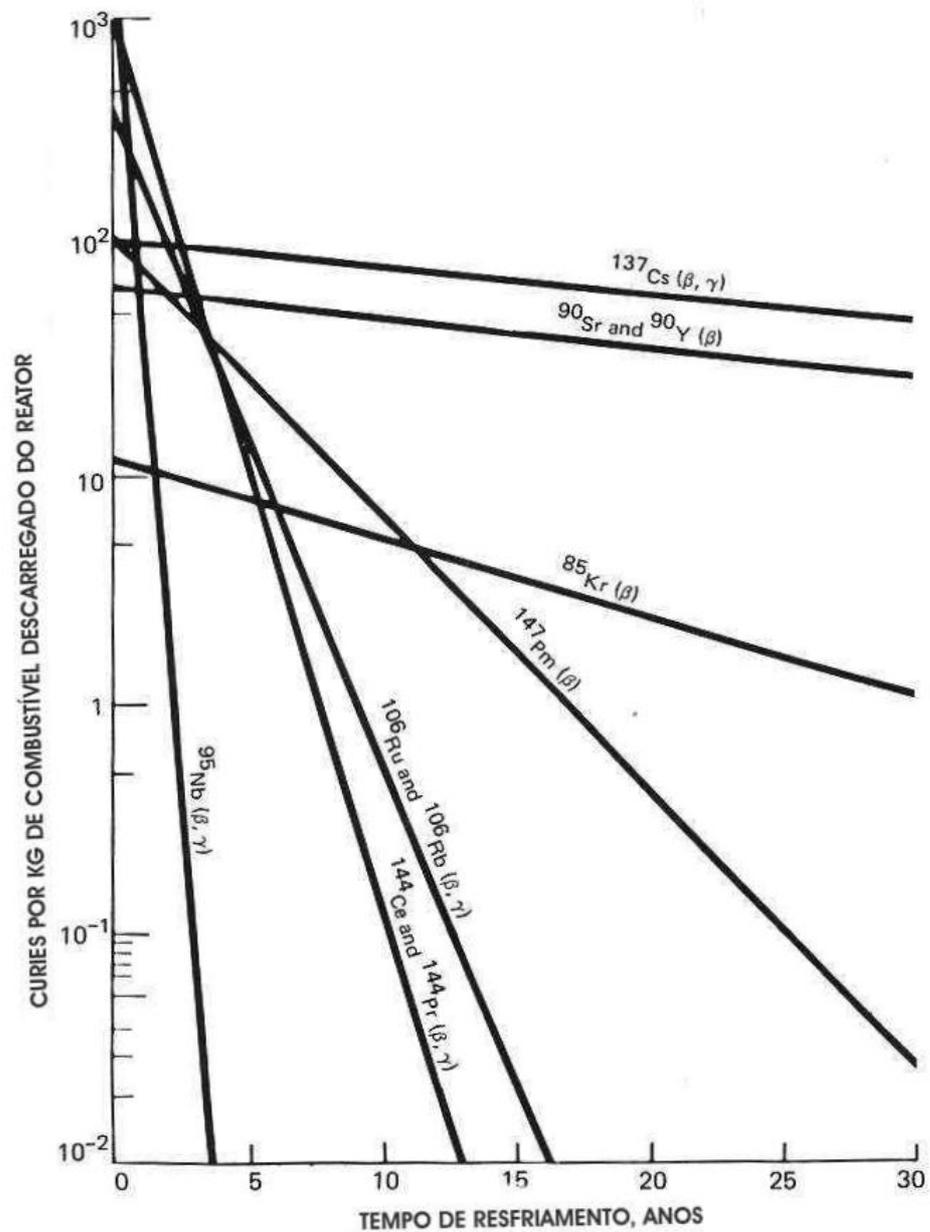


Figura 3.7 - Radioatividade gerada pelos produtos de fissão contidos no combustível nuclear queimado retirados do reator em função do tempo.
Fonte: National Academy of Science (1975)

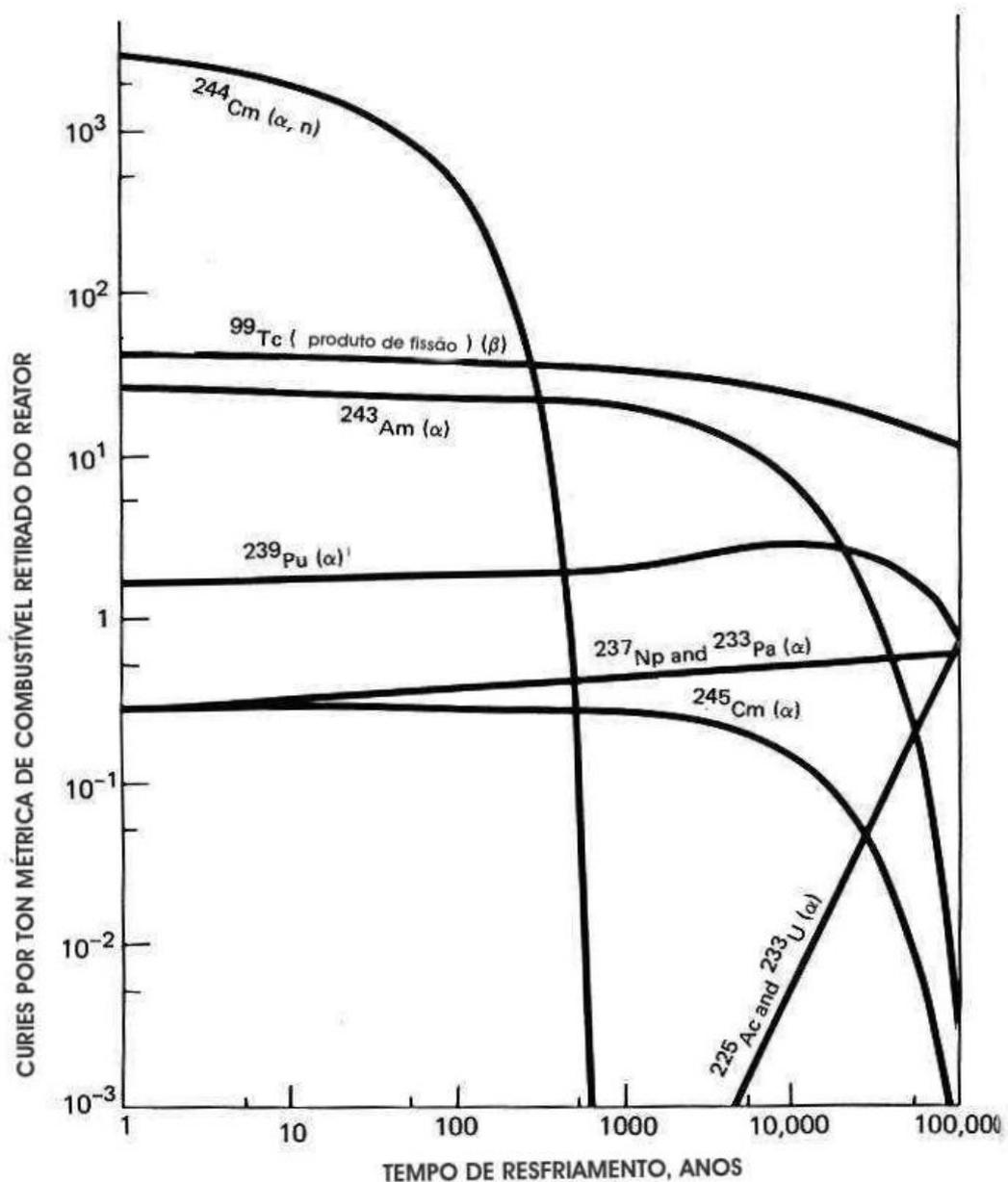


Figura 3.8 - Radioatividade gerada por diferentes actínidos contidos no combustível nuclear queimado retirado do reator em função do tempo
Fonte: National Academy of Science (1975)

A armazenagem por via úmida (em piscinas com água) é bem conhecida e a mais praticada no mundo todo. A experiência com relação à segurança desse tipo de instalação é muito grande. Nas Figuras 3.9 e 3.10 são mostradas as posições das piscinas de armazenagem de combustível queimado em relação ao núcleo do reator.

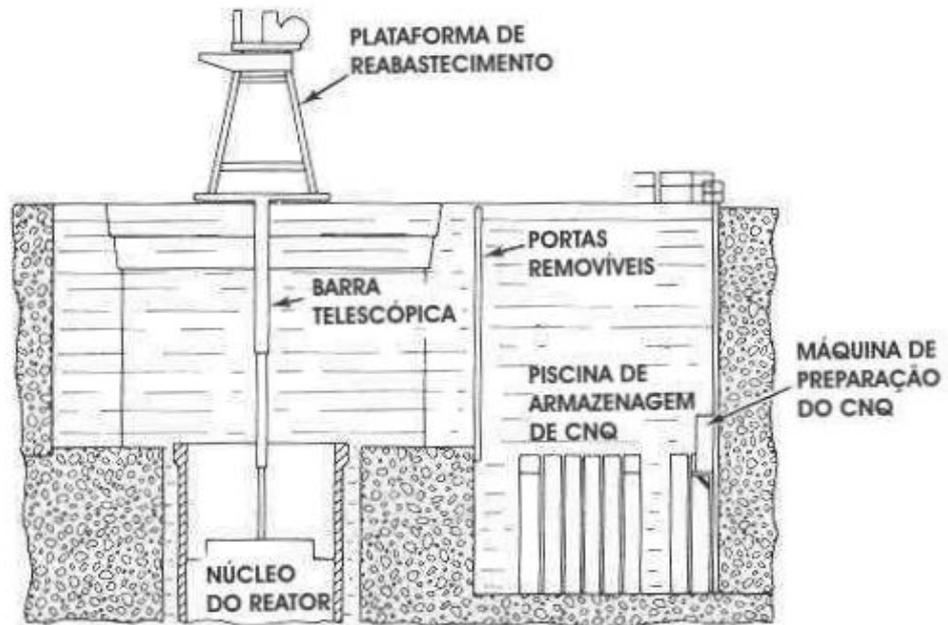


Figura 3.9 - Piscina com CNQ no mesmo prédio do reator.
Fonte: IAEA (1982)

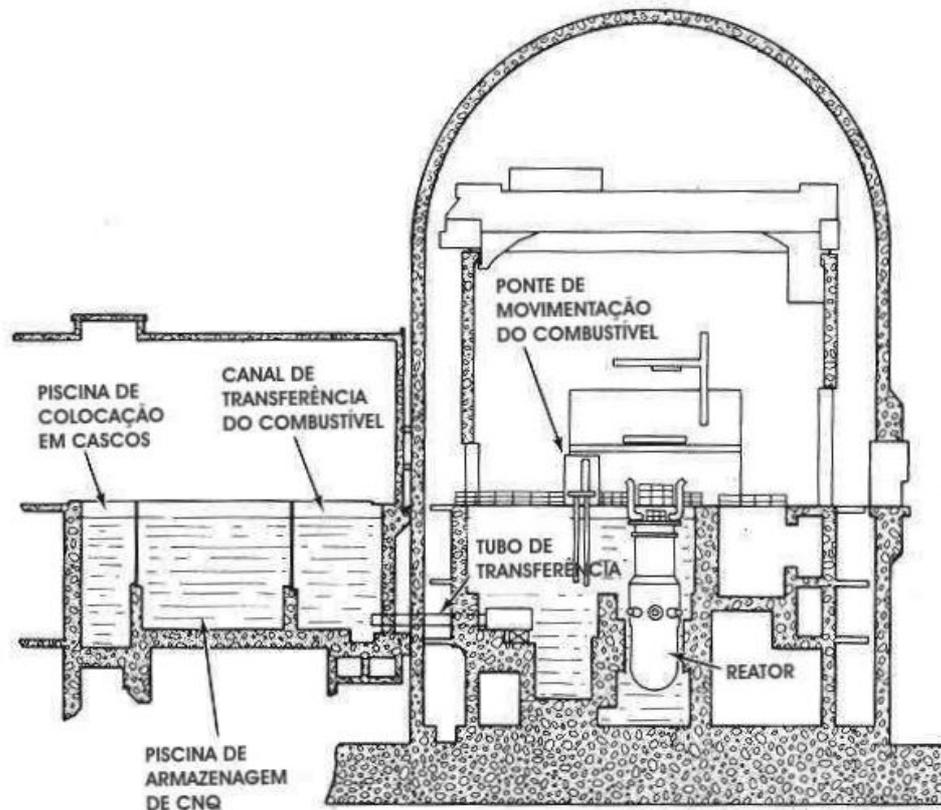


Figura 3.10 - Prédio de armazenamento de CNQ fora do prédio do reator.
Fonte: IAEA (1982)

Os conjuntos de elementos combustíveis queimados são colocados em suportes especiais denominados *racks*, espécie de engradados, dentro de piscinas com estrutura de concreto revestidas de aço inoxidável (Figura 3.11). A piscina é construída dentro de um prédio com contenção especial e com todos os pré-requisitos de segurança física, entre outros, os abalos sísmicos.

A água utilizada para encher a piscina é deionizada e a sua composição é sempre controlada. A monitoração de eventuais vazamentos e dos níveis de radiação é constante. Esses últimos mantidos em níveis cuja dose recebida pelos trabalhadores seja a mais baixa possível, conforme o princípio ALARA. O menor limite aceitável anual estabelecido na norma NE-3.1, emitida pela CNEN (1988), para o trabalhador é de 50mSv. A temperatura da água da piscina, normalmente é mantida a 40°C ou menos (IAEA, 1982).

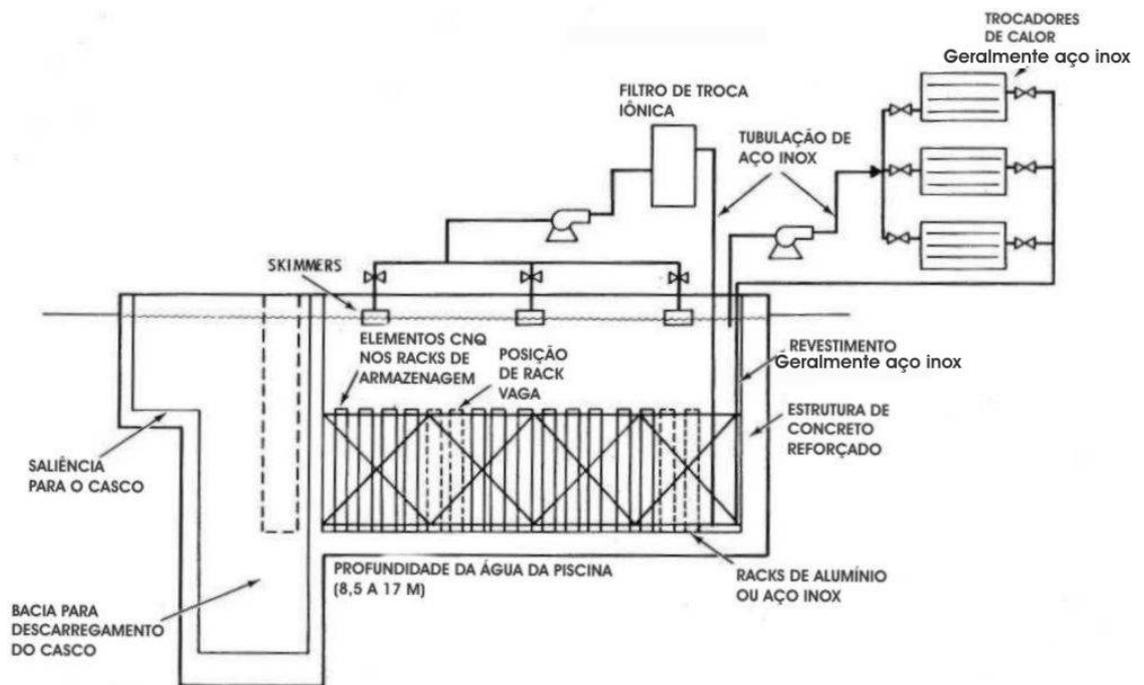


Figura 3.11 - Esquema de uma piscina de CNQ e seus componentes
Fonte: IAEA (1982)

Os pontos chave quanto à segurança da instalação são:

- a) assegurar que a água não vaze e continue a cobrir o combustível. Conforme Baillif e Bonnet (1987), as piscinas de armazenagem em *La Hague*, França, possuem 9m de profundidade, e os elementos combustíveis ficam a 4m do nível da água; e,
- b) assegurar que o meio refrigerante permita a absorção adequada de nêutrons e previna qualquer reação acidental em cadeia.

A observação de liberação de hidrogênio pode indicar uma taxa de corrosão substancial do revestimento das varetas, as mudanças na aparência das varetas são um sinal de corrosão severa e liberação de hélio e gases de fissão, que podem ocasionar o aumento nos níveis de radioatividade da água da piscina, são indicativos de uma perfuração do revestimento do combustível.

O custo de uma instalação de armazenagem de CNQ em comparação com o custo da construção de um reator é relativamente reduzido. No capítulo 4 são abordados os custos relativos à construção e operação das instalações de armazenagem.

Originalmente, os países que planejaram um parque nuclear para a geração de energia tinham em seus projetos o reprocessamento. Contudo, nem todos puderam seguir esses projetos com fidelidade e os locais de armazenagem por via úmida do combustível queimado mantiveram sua capacidade de recebimento reduzida. Por causa do alto custo do reprocessamento, o combustível continuou sendo estocado nas piscinas. O custo total do reprocessamento chegou a variar de US\$1.760/kg_{CNQ} até US\$4.100/kg_{CNQ}, mas hoje por causa da concorrência entre BNFL (Reino Unido) e COGEMA (França) nos novos contratos de reprocessamento caíram para a faixa de US\$600/kg_{CNQ} a US\$900/kg_{CNQ}, conforme Bunn et al. (2003). Os países que não planejavam reprocessar também construíram piscinas com capacidade inferior à necessária para a armazenagem do CNQ durante a vida útil do reator.

Hoje em dia essa situação está se tornando mais preocupante porque os reatores, com as piscinas quase cheias de combustível queimado podem ser forçados a parar a geração de energia, ainda mais com a possibilidade de aumento da vida útil do reator.

Estão sendo realizados estudos, em todo o mundo, para que os reatores, cuja vida útil era de 40 anos, tenha um prolongamento de mais 20 anos. Com isso, mesmo as piscinas que tenham sido projetadas, anteriormente, para armazenar o CNQ gerado em toda a vida útil do reator, ou que tenham suas capacidades aumentadas, deverão dispor de novos métodos de armazenagem até a adoção uma solução de deposição final. Na Tabela A3 do Anexo 1 é apresentada uma relação das instalações de armazenagem via úmida, distantes do reator.

3.3.2 Opções para o aumento da capacidade das piscinas

As opções mais utilizadas para o aumento da capacidade de armazenagem úmida são apresentadas a seguir.

3.3.2.1 Modificação dos *racks* , nas piscinas e piscinas centralizadas

Para dar continuidade à gerência desse combustível, uma opção foi a troca dos *racks* das piscinas por outros mais compactos, de modo que exista mais espaço para novos depósitos de combustível queimado (FIG 3.12). A diminuição do espaçamento entre os combustíveis permite aumentar o volume útil mínimo em 30% (South Carolina Electric & Gas Co., 2002).

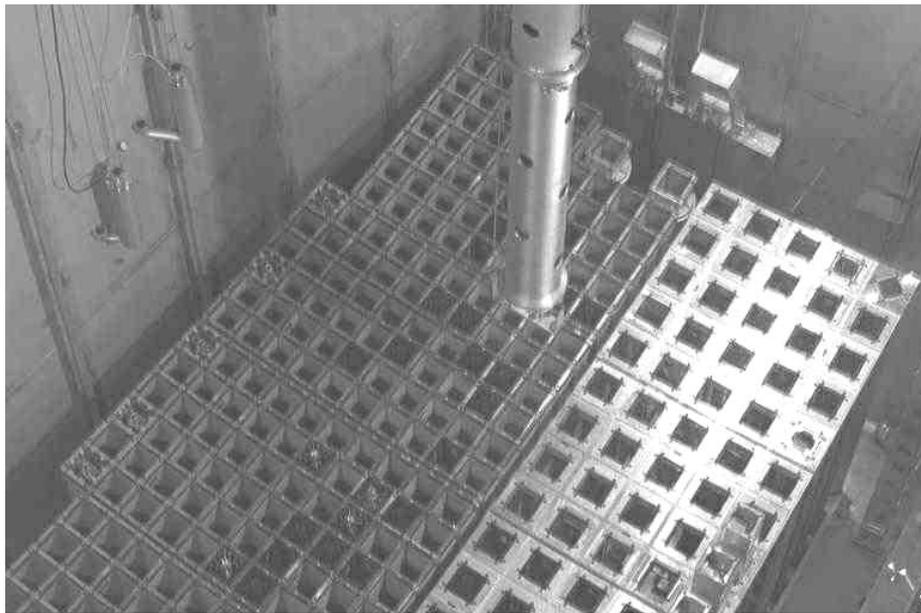


Figura 3.12 - Comparação entre *racks* de alta densidade (esquerda) e *racks* mais antigos (direita).

Fonte: Borssele NPP (<http://www.kerncentrale.nl>)

Visto que, no arranjo novo, a distância entre os elementos combustíveis é menor, o material usado para a construção do *rack* deve ser um absorvedor de nêutrons, normalmente com boro em sua composição a fim de que seja evitada a criticalidade. Essa alternativa foi realizada em muitos reatores ao redor do mundo, conforme descreve Cochran e Tsoulfanidis (1992).

Uma outra possibilidade é a construção de piscinas adicionais ou aumento das existentes. Quando um reator está em construção esses ajustes são possíveis, mas quando o reator já está em operação eles são mais complexos e dependem do espaço disponível.

Em vários países, conforme a Tabela 3.1, existem instalações centralizadas com piscinas para a armazenagem de combustível queimado que permitem receber esses materiais de diversos reatores de potência (Figura 3.13) (IAEA, 1999).

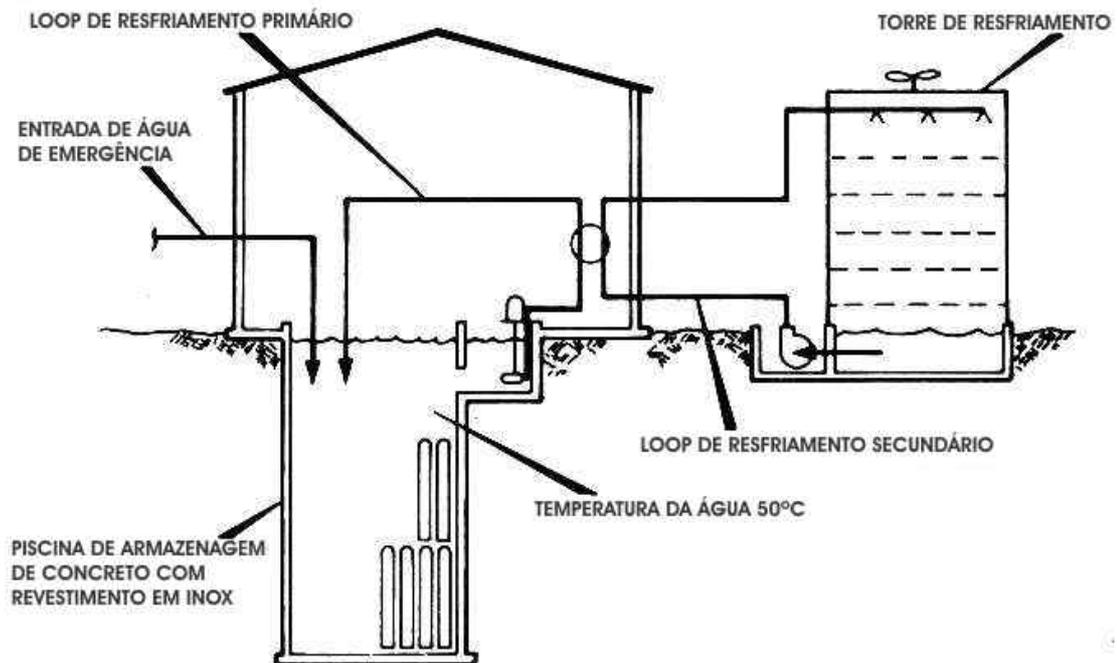


Figura 3.13 - Esquema de uma piscina de armazenamento de CNQ centralizada
Fonte: National Academy of Science (1975)

Uma outra prática, em alguns países (Holanda e Suécia), é a transferência do combustível queimado de um local para outro que esteja mais vazio, ou seja, a transferência do combustível de uma piscina que esteja mais cheia (reator mais antigo) para outra mais vazia (reator que iniciou suas operações há pouco tempo). A forma de transporte está descrita mais à frente.

Nas piscinas centralizadas o combustível queimado pode ser armazenado montado (como sai do reator), desmontado (com as varetas retiradas), ou ainda em cascos.

Na Tabela 3.1 são apresentados os países que possuem instalação via úmida centralizada, em 1997, bem como sua capacidade e quantidade de CNQ armazenado naquela época (IAEA, 1999).

Tabela 3.1 - Relação de países que possuem armazenagem úmida temporária
Fonte: IAEA (1999)

País membro da IAEA	Número de instalações	Capacidade (ton)	Quantidade de CNQ (ton)
Alemanha	1	560	526
Argentina	1	1.100	766
Bélgica	1	1.000	55
Bulgária	1	600	356
Eslováquia	1	660	523
Estados Unidos	1	780	700
Finlândia	3	1.450	700
França	4	14.500	9.159
Índia	1	27	27
Japão	3	4.300	3.500
Reino Unido	4	10.350	7.031
Rússia	6	12.960	6.046
Suécia	1	5.000	2.703
Ucrânia	1	2.000	1.695
TOTAL	28	55.227	33.767

3.3.2.2 Agrupamento de varetas

Outra possibilidade para o aumento da capacidade de armazenagem de CNQ nas piscinas é o agrupamento das varetas de combustível queimado. Neste método, as varetas são retiradas dos *racks*, ou seja, o elemento combustível (varetas e suportes) é desmontado. Os elementos estruturais tais como bocais superiores e inferiores, grades espaçadoras são tratados como rejeitos de nível alto por causa da ativação dos elementos componentes.

As varetas com combustível são inspecionadas, reunidas e colocadas na piscina, cuja capacidade aumenta muito, podendo atingir o dobro da capacidade anterior

(item 3.3.1.1) (razão de compactação 2:1, dois elementos combustíveis originais ocupando um único espaço) (Amergen Energy Company, 2000). Para esse caso, também é necessário introduzir elementos absorvedores de nêutrons que estão dissolvidos na água para evitar a criticalidade. Deve-se tomar muito cuidado após a retirada das varetas, porque o elemento combustível é uma estrutura na qual a grade e os bocais exercem funções de resistência. As varetas isoladas são mais delicadas e necessitam de cuidado maior de manuseio. Após a desmontagem, são introduzidas em revestimento de aço inoxidável com dimensões externas adequadas ao elemento combustível original e, posteriormente introduzidas nos *racks* de armazenagem.

Manter e operar as piscinas de armazenagem envolve custos operacionais significantes.

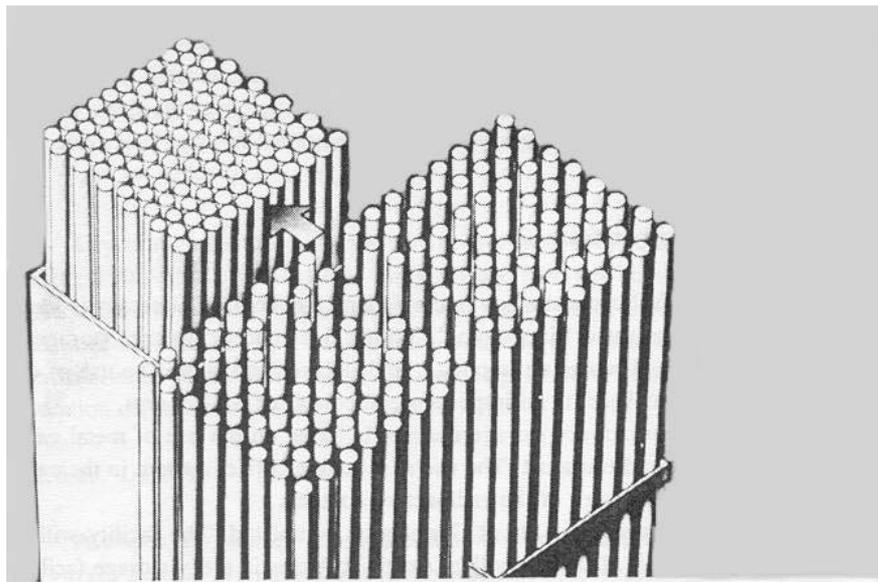


Figura 3.14 – Forma de agrupamento das varetas de CNQ, de uma disposição mais separada para uma mais compacta.

Fonte: IAEA (1988)

3.3.3 Armazenagem seca

Conforme a denominação, a armazenagem em via seca difere da úmida pelo uso de gás ou ar ao invés de água como refrigerante (freqüentemente um gás inerte como o hélio ou levemente reativo como o nitrogênio, para evitar a oxidação do combustível armazenado) e metal ou concreto como barreira de radiação ao invés da própria água.

Uma característica distinta dos sistemas de armazenagem seca é o sistema passivo de resfriamento, pela convecção do ar. Diferente da armazenagem úmida, não exige sistemas de água, elétricos, manutenções periódicas e monitorações constantes do combustível, aumentando a confiabilidade da armazenagem por longos períodos.

Outra característica importante é que a blindagem contra radiação é feita por grossas paredes de concreto, ferro fundido, aço ou combinações aço e chumbo.

A armazenagem seca vem sendo utilizada desde 1970, quando foi construído um depósito no reator de Wylfa (Reino Unido), que armazenava o CNQ por menos de 100 dias antes de enviar para a instalação de reprocessamento em Sellafield.

Em 1971, nos Estados Unidos, foi iniciada a armazenagem em poços secos no Laboratório de Engenharia de Idaho, e este exemplo está sendo seguido por vários países até hoje. (Fairlie, 2000).

Para que essa opção possa ser usada, o combustível deve ser armazenado antes em piscinas com água por muitos anos para o decaimento da atividade.

Existem vários tipos de instalações e estão descritas, a seguir, as formas mais utilizadas atualmente: poços, silos e cascos. Na Tabela A4 do Anexo 1 estão relacionadas as instalações de armazenagem via seca.

3.3.3.1 Armazenagem em poços

Nesse tipo de armazenagem, o combustível queimado é guardado em um edifício de concreto cuja estrutura exterior serve de barreira radiológica e no seu interior existe um grande número de cavidades, no piso, prontas para receber as unidades ou elementos de combustíveis (Figura 3.15). O calor é removido pelo ar por convecção com o ar por circulação natural e forçada.

Em alguns poços, o combustível é removido do tambor e colocado sem qualquer recipiente protetor, ao passo que em outros, o combustível fica no recipiente de transporte e é colocado em um tambor de transferência movido por guindaste até o cilindro de armazenagem (Figura 3.16).

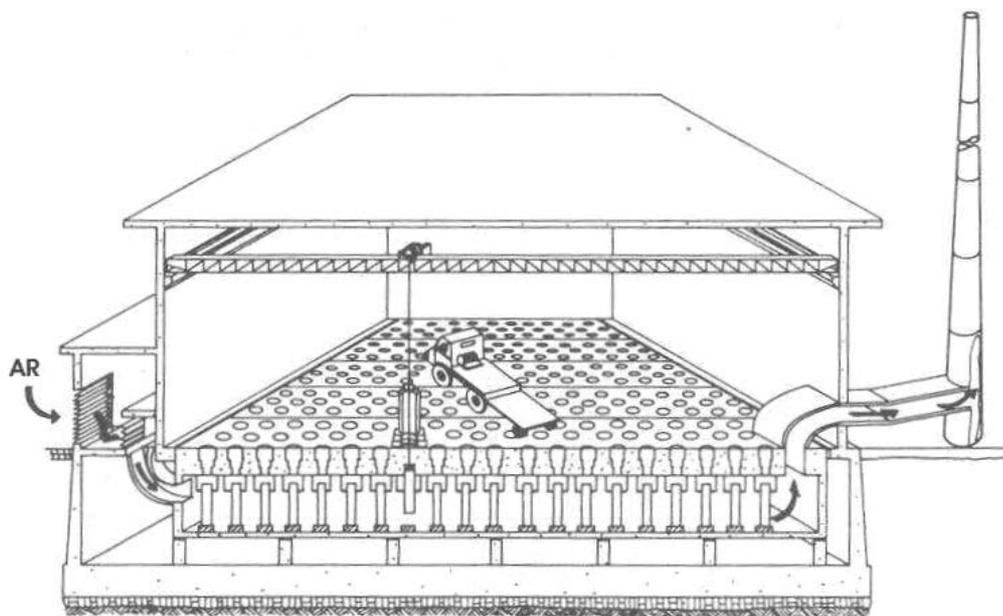


Figura 3.15 - Vista esquemática de uma instalação de armazenagem de CNQ em poços.
Fonte: IAEA (1983)

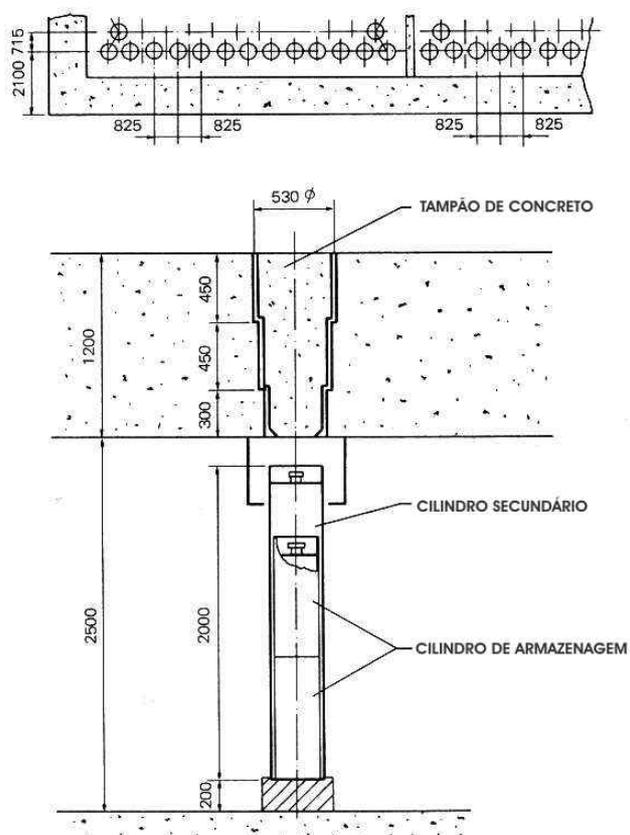


Figura 3.16 - Detalhe do cilindro de armazenagem de CNQ no poço.
Fonte: IAEA (1983)

A temperatura atingida na superfície externa do cilindro de armazenagem pode chegar a 160°C, conforme a IAEA (1983).

Esse tipo de armazenagem é utilizado no Reino Unido, Canadá, França e já foi utilizado também nos EUA.

3.3.3.2 Armazenagem em Silos

Nesse sistema, o combustível é guardado em tambores metálicos dentro de um cilindro de concreto. A posição de estoque pode ser tanto na vertical como na horizontal. O concreto, além de funcionar como material estrutural, serve como blindagem à radiação (como o edifício, na armazenagem em poços), ao passo que os tambores proporcionam a contenção. O calor é removido por convecção com o ar.

Geralmente são utilizados tambores de transferências durante o carregamento do combustível para os silos.

Na Figura 3.17 é mostrada a construção de um sistema de silos de concreto verticais. Pode ser observada, na figura, a tampa colocada nos silos prontos, esses ainda contém, como revestimento interno, um cilindro de aço. Cada silo vertical permite que sejam colocados vários tambores de CNQ sobrepostos. Esse sistema permite posteriores ampliações após a colocação do CNQ nos silos.

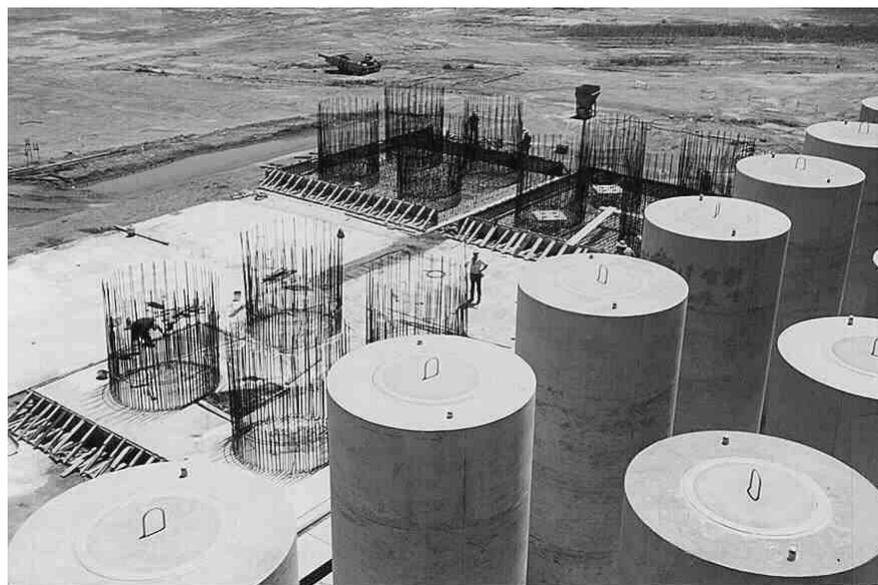


Figura 3.17 - Instalação de silos verticais de concreto armado para armazenar CNQ em instalações externas.

Fonte: www.invap.net

O sistema de silos de armazenagem horizontal consiste de cilindros de aço inox, colocados horizontalmente em silos de concreto (Figuras 3.18 e 3.19). Esses silos são modulares, ou seja, podem ser transportados até o local de armazenagem e colocados em diversas configurações.

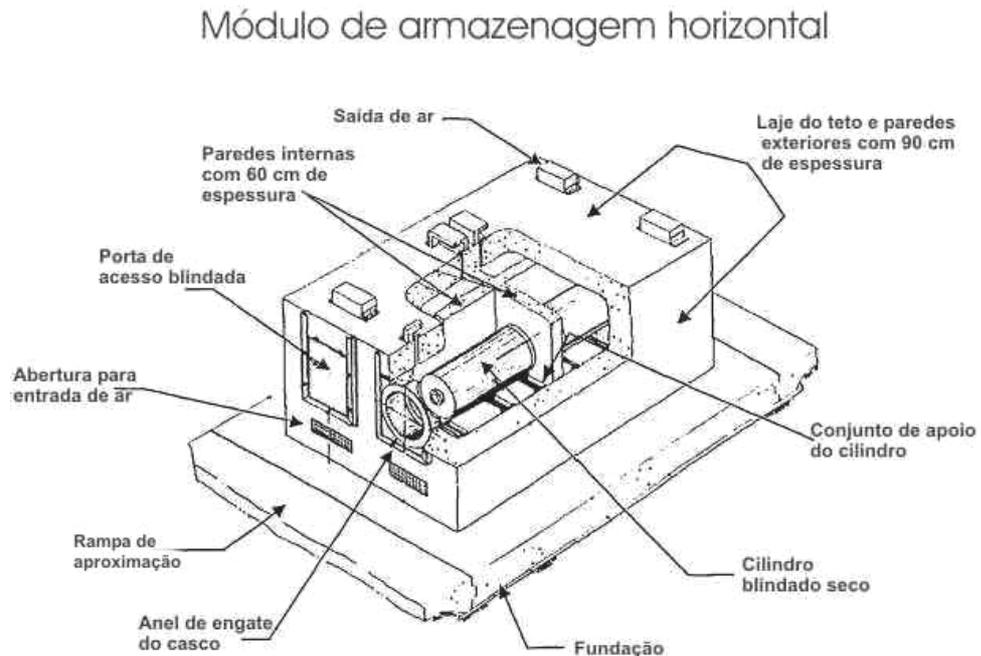


Figura 3.18 - Silos de armazenagem de CNQ no sentido horizontal.

Fonte: <http://www.transnuclear.com>



Figura 3.19 - Cilindro de armazenagem interno ao silo horizontal

Fonte: <http://www.ymp.gov>

O CNQ é colocado em cestos dentro de um cilindro que por sua vez é fechado, drenado, preenchido com gás inerte, e inserido dentro de um casco de transporte (Figura 3.20). O mesmo é instalado horizontalmente em um veículo reboque equipado com um pistão hidráulico e levado até a instalação de armazenagem. O veículo com o reboque, pela rampa de aproximação, se aproxima do módulo e posiciona o casco de transporte no anel de engate, empurrando o casco blindado seco para dentro do módulo através do pistão. Após a introdução do casco, a porta de acesso se fecha e o combustível já está armazenado (Roland et al., 2003).

A armazenagem em silos é usada nos EUA, Canadá, Coréia e Argentina.

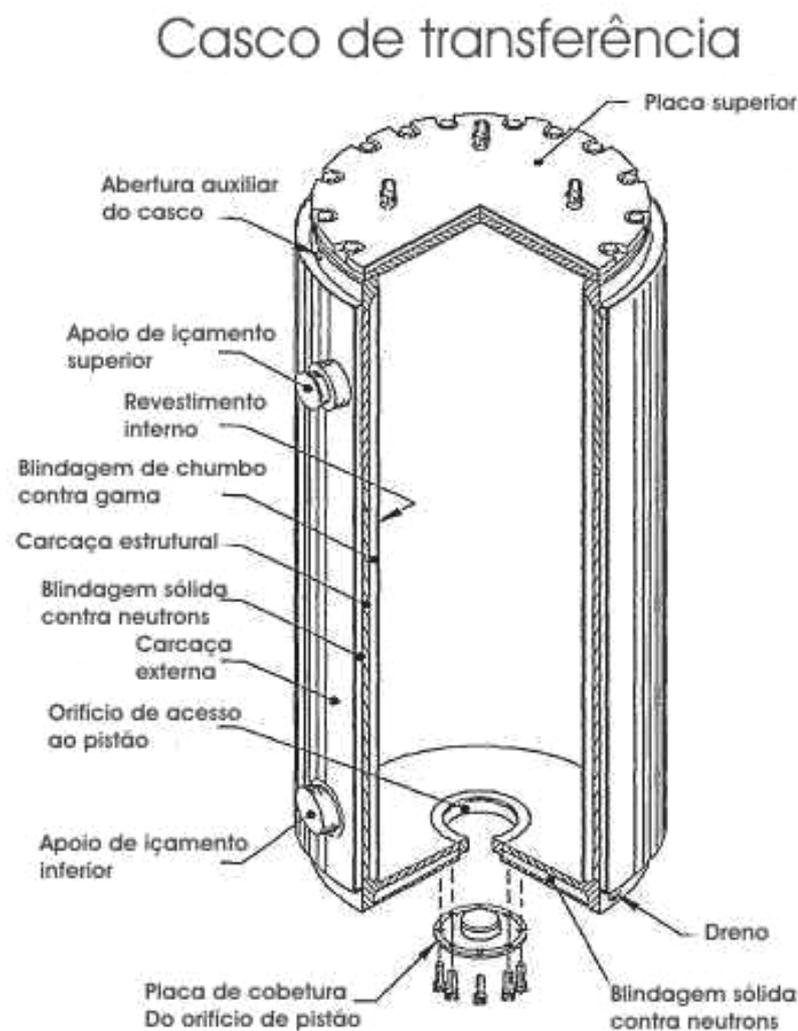


Figura 3.20 - Vista do corte do casco de transporte

Fonte: Hanson e Chollet (2003)

3.3.3.3 Armazenagem em cascos

Os cascos normalmente são cilindros grossos podendo ser de dois tipos, metálicos ou de concreto. Tanto os cascos metálicos como os de concreto, são introduzidos na piscina de combustível queimado de um reator PWR, BWR ou CANDU (caso exista piscina de armazenagem com espaço para submersão do casco, senão o elemento é retirado, colocado no casco e deixado fora da piscina) e então é inserida uma quantidade de elementos combustíveis; após fechamento, os cascos são içados e têm a água drenada de seu interior. Após a secagem e inserção de um gás inerte, os cascos são vedados e transportados até a instalação de armazenagem.

Os cascos proporcionam a contenção do CNQ e a blindagem contra a radiação gama e nêutrons.

Os cascos metálicos, geralmente são de aço forjado com o fundo soldado ao corpo do cilindro com uma ou duas tampas presas ao cilindro por meio de parafusos. A espessura do aço proporciona a blindagem contra a radiação gama. Ao redor do cilindro uma resina, normalmente o polietileno, serve de blindagem contra os nêutrons. Podem existir aletas na superfície externa para uma melhor troca de calor com o ambiente. O CNQ é acomodado em cestos de alumínio com boro ou aço inox, dispostos em diversos arranjos (Figura 3.21 e 3.22) de modo que seja garantida a sub-criticalidade do combustível. São instalados apoios na superfície externa para içar, de modo a permitir o deslocamento do casco e no caso de transporte existem ainda absorvedores de choque instalados no fundo e na tampa (nos dois topos) deste recipiente. A instalação de armazenagem (fechada ou aberta) que recebe esses cascos tem piso de concreto reforçado e todo o sistema de segurança física exigido em instalações dessa espécie.

Os cascos de concreto armado têm a mesma disposição interna dos cascos metálicos, e, internamente, o CNQ fica distribuído em cestos de alumínio ou de aço inoxidável. Os cilindros externos, de concreto, servem como blindagem contra nêutrons e radiação gama. A troca de calor é feita através de dutos especialmente planejados e localizados na parte inferior e superior dos topos dos cilindros. O ar entra pelas aberturas inferiores e sai pelas superiores. Geralmente estes cascos são mais pesados que os metálicos, por causa da espessura das paredes, porém, são mais baratos (Figura 3.23).

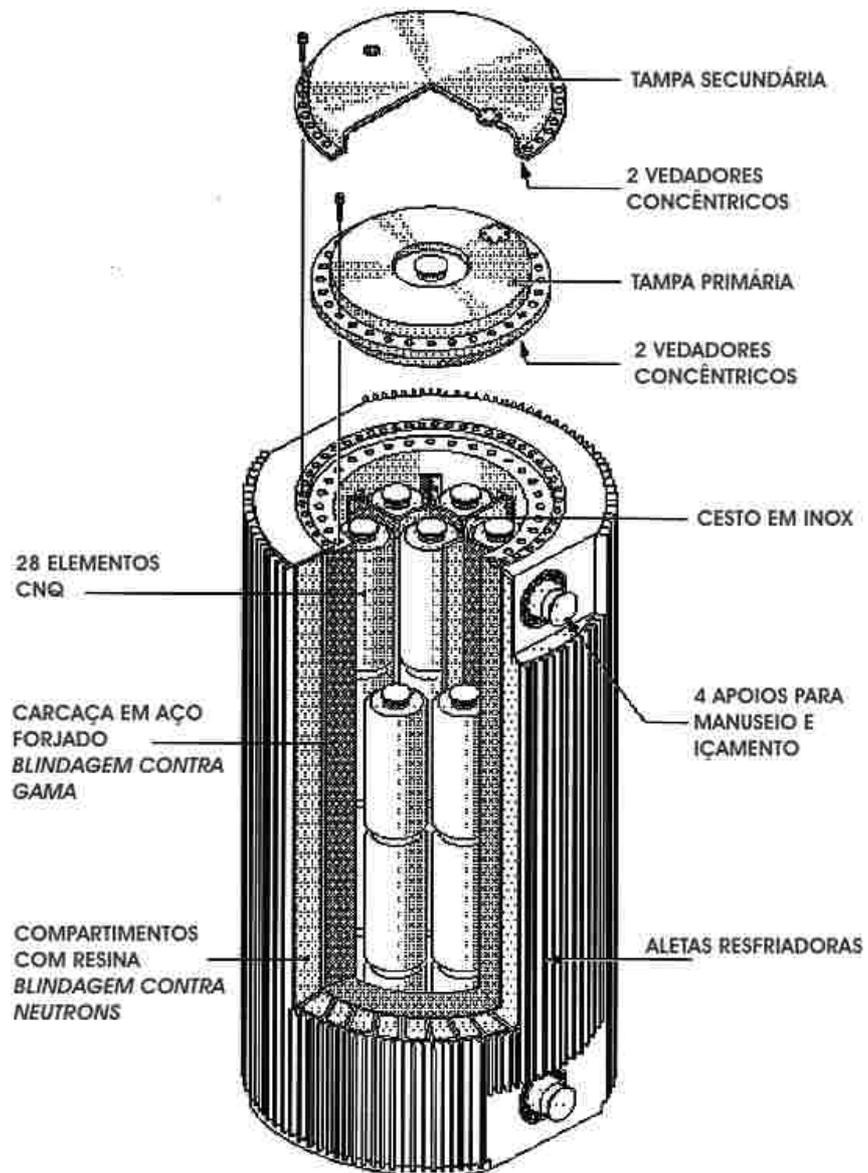


Figura 3.21 - Casco de aço com aletas para armazenagem de CNQ
Fonte: <http://www.fepc.or.jp>

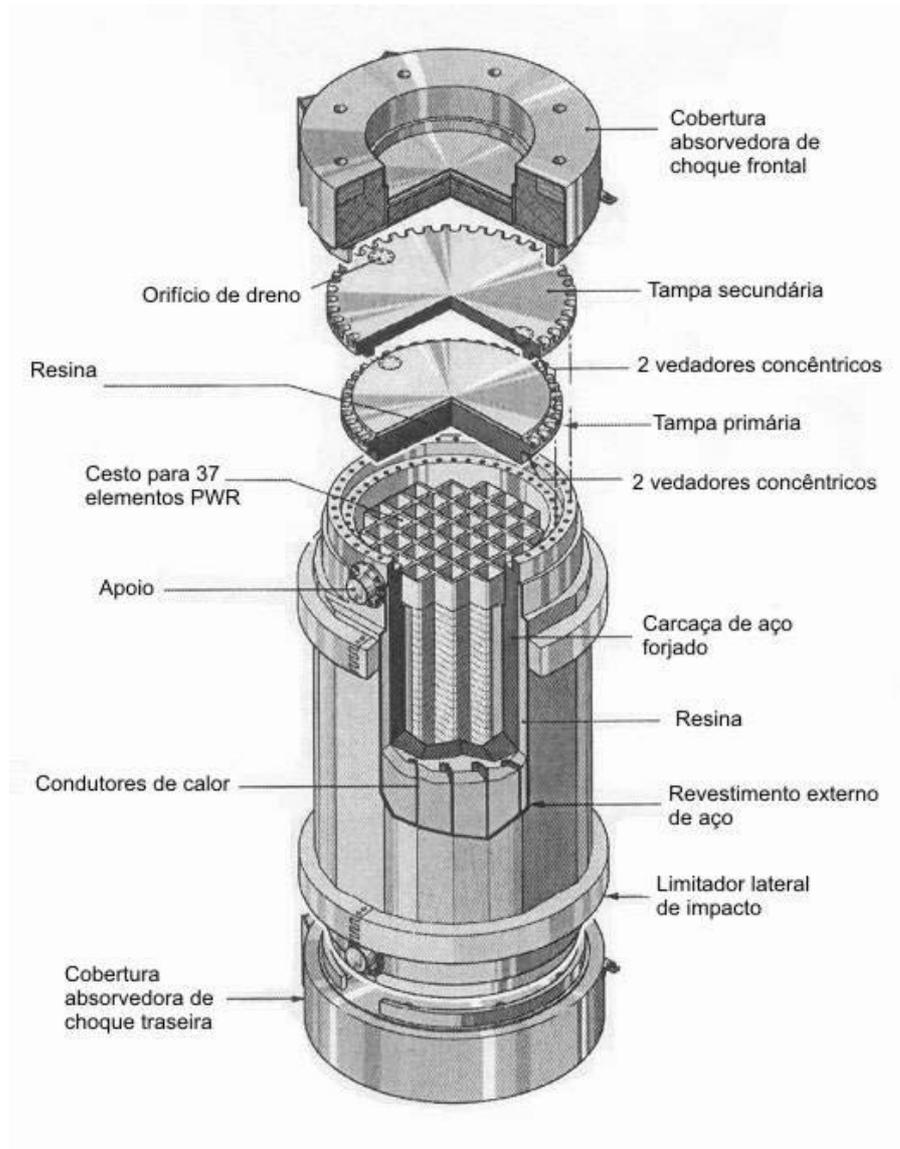


Figura 3.22 - Casco metálico para transporte, armazenagem e traslado de CNQ
Fonte: Verdier et al. (2003)

Comercialmente existe uma grande variedade de cascos, que já foram testados e aprovados, e outros ainda em fase de testes. Os cascos leves, de 25ton a 40ton, projetados para confinar de um a sete elementos combustíveis podem ser transportados por veículos rodoviários. Os cascos mais pesados, perto de 120ton, permitem carregar acima de 36 elementos de combustível por via férrea e podem ser usados para transporte e armazenagem ao mesmo tempo (NRC, 2003).

Esse tipo de armazenagem é flexível, porque os cascos, não sendo fixos, podem ser usados para transporte, armazenagem e trasladados para diversos lugares até para o local de deposição final.

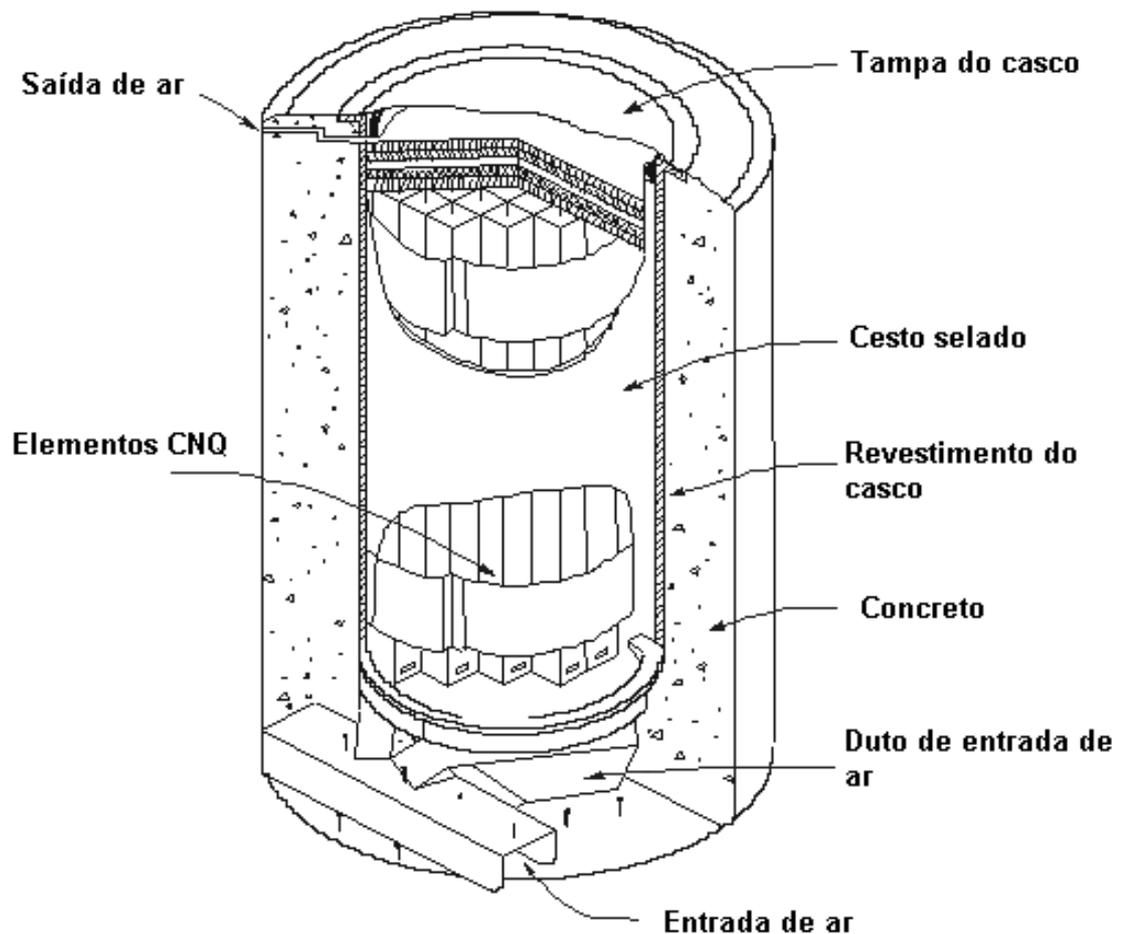


Figura 3.23 - Corte de um casco de concreto de armazenagem de CNQ.
Fonte: Oak Ridge National Laboratory (2003)

A armazenagem em cascos é utilizada pelos EUA, Alemanha, Japão e vários outros países.

Os cascos, também podem ser do tipo multi-propósito, ou seja, servem tanto para a armazenagem do combustível como para o transporte da central para a instalação de armazenagem temporária em longo prazo.

Todos os cascos, nos EUA, antes de terem seus projetos aprovados, devem passar por uma certificação do NRC. Essa certificação somente é dada para os cascos cujos projetos sejam aprovados em testes que obedecem a normas específicas.

Os testes aplicados nos cascos de transporte são os seguintes:

a) Queda livre, na qual o casco é solto de uma altura de 9m sobre um piso plano;

b) Queda sobre ponta perfurante. O mesmo casco que passou pelo teste de queda sobre o piso plano é solto de uma altura de 1m sobre uma barra de aço vertical de 0,15m de diâmetro e 0,2m de comprimento;

c) Resistência ao fogo, no qual o mesmo casco, após os testes anteriores, é totalmente envolto por chamas à 800°C durante 30 minutos;

d) Imersão em água, no qual o casco fica imerso por 8 horas a uma profundidade de 1m e mais 8 horas a uma profundidade de 15m.

Na Tabela 3.2 são apresentados os tipos de cascos certificados pelo NRC até o final de 2000, conforme publicação da IAEA (2000):

Tabela 3.2 –Cascos multi-propósito usados em diversos países e certificados pelo NRC.

Fonte: IAEA (2000)

Denominação do casco	País	Fabricante	Tipo
Castor	Alemanha	GNS	Metal
HiStar	EUA	Holtec	Metal
HiStorm	EUA	Holtec	Concreto
STC	EUA	NAC	Metal
UMS	EUA	NAC	Metal
NUHOMS	EUA	Transnuclear	Metal
TN 24	França	Transnucleaire	Metal
TN 62	EUA	Transnuclear	Metal
TranStor	EUA	BNFL	Concreto
Wesflex	EUA	BNFL	Concreto

3.3.4. Armazenagem em navios

A armazenagem em navios é um tipo de armazenagem alternativa que vem sendo utilizado pela Rússia, conforme mostrado na Figura 3.24 (Bellona Foundation,

2002). Para esta finalidade foram adaptados navios comerciais para abrigar o combustível queimado proveniente dos submarinos nucleares russos.



Figura 3.24 - Navio russo de armazenagem de CNQ
Fonte: Bellona Foundation (2002)

Existiam, na época, aproximadamente 5.040 elementos combustíveis queimados armazenados em cascos de transporte em navios, ou seja, aproximadamente 8,8ton de CNQ em sete navios de armazenagem. Um esboço da disposição do CNQ no navio de armazenagem pode ser visto na Figura 3.25. (Bellona Foundation, 2003)

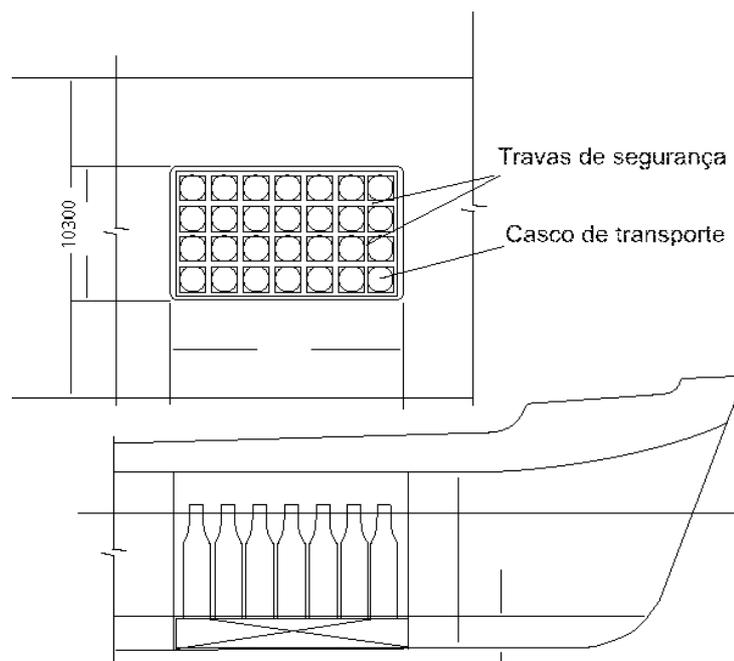


Figura 3.25 - Disposição do CNQ no navio de armazenagem na Rússia.
Fonte: Bellona Foundation (2003)

A colocação do combustível no navio é considerada uma operação de grande risco (Figura 3.26) por causa do grande perigo de criticalidade, pois o combustível russo é altamente enriquecido, até 45% de ^{235}U .



Figura 3.26 - Introdução de um casco com CNQ no navio transportador russo.

Fonte: Bellona Foundation (2004)

3.3.5 Outras opções de armazenagem

Outras opções foram aventadas no passado, mas nos dias de hoje, foram descartadas, são elas a ‘dupla fila’, na qual uma segunda fila de combustível seria colocada sobre a já existente dentro da piscina, nesse caso a profundidade da piscina deveria ser maior do que é atualmente; a outra opção é a utilização de ‘túmulos’, ou seja, o CNQ seria enterrado diretamente no solo dentro de um recipiente, e o calor dissipado na terra.

3.3.6 Vantagens e desvantagens dos sistemas de armazenagem de CNQ

A opção mais moderna de armazenagem do combustível queimado é por via seca e várias centrais nucleares estão optando por esse método. Isso não significa, contudo, que se deva adotar apenas essa opção. Ambas tecnologias, úmida e seca, têm nichos de mercado e cabe à central adotar a mais adequada.

As instalações úmidas possuem um alto grau de aceitação porque são métodos padronizados utilizados em grande parte do mundo tanto após a retirada do CNQ do reator como na armazenagem de CNQ que aguarda a vez de reprocessamento nas instalações. Durante 10 a 20 anos de armazenagem úmida constatou-se, conforme a Nuclear Energy Agency (1993), que a corrosão no revestimento dos elementos combustíveis foi bem reduzida, mas com o passar do tempo, a corrosão tende a aumentar, pois o combustível está imerso em água a 40°C, que favorece a corrosão. O controle de impurezas da água é importante, pois quanto mais impurezas, maior a tendência à corrosão.

Os problemas que podem ocorrer na armazenagem úmida, normalmente podem ser causados pela falha no manuseio ou eventos externos que podem causar uma falha estrutural, são previstos no projeto.

Uma desvantagem do sistema de armazenagem úmida é a redundância que deve ser dada aos equipamentos elétricos e de resfriamento e que o nível de água seja mantido a fim de evitar o aumento da temperatura do ambiente em que o CNQ está imerso.

Os sistemas de armazenagem a seco, implementados na atualidade, incluem silos, poços e cascos de aço ou concreto. Todos eles garantem a blindagem da radiação proveniente dos radionuclídeos e um resfriamento passivo, ou seja, sem intervenção de equipamento de resfriamento. Estes tipos de cascos têm a vantagem da mobilidade e possibilidade de mudança rápida para outros locais, caso seja necessário. Uma desvantagem é quanto a verificação da integridade dos elementos combustíveis armazenados no sistema seco. Normalmente, o CNQ é introduzido no invólucro, o mesmo é preenchido com gás inerte e depois vedado. Não se pode garantir a integridade do revestimento dos elementos após o fechamento do casco com inspeções visuais.

Na Tabela 3.3 são mostradas algumas vantagens e desvantagens de acordo com o tipo de armazenagem.

Entre os cascos metálicos e de concreto, uma vantagem dos de concreto, além de serem menos custosos, têm um processo de fabricação mais simples que os metálicos (Vossnake et al., 2003).

Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens das instalações de armazenagem do CNQ

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Armazenagem úmida		
Piscinas	1. Inspeção 2. Remanejamento do combustível	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível H ₂ O 2. Corrosão
Modificação dos <i>racks</i>	1. Inspeção 2. Remanejamento do combustível 3. Mais espaço que nas piscinas	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível H ₂ O 2. Corrosão
Agrupamento de varetas	1. Mais espaço que nas piscinas.	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível H ₂ O 2. Corrosão
Piscinas centralizadas	1. Mobilidade dos cascos	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível H ₂ O 2. Transporte
Armazenagem seca		
Poços	1. Não ocorrência de corrosão	1. Falta de inspeção 2. Resfriamento forçado
Silos	1. Não ocorrência de corrosão 2. Resfriamento passivo	1. Falta de inspeção
Cascos metálicos	1. Não ocorrência de corrosão 2. Resfriamento passivo 3. Casco de transporte é o mesmo da armazenagem 4. Mobilidade dos cascos	1. Falta de inspeção
Cascos de concreto	1. Não ocorrência de corrosão 2. Resfriamento passivo 3. Casco de transporte é o mesmo da armazenagem 4. Mobilidade dos cascos	1. Falta de inspeção

3.4 Transporte do combustível queimado

O transporte do combustível nuclear queimado do reator até o local de armazenagem temporária é um processo que envolve várias fases e é necessário muito cuidado para que não haja liberação de material radioativo ao meio ambiente. Esse processo pode ser dividido nas fases que podem ser vistas na Tabela 3.4.

O transporte é regido por normas estipuladas em cada país e na falta dessas por aquelas recomendadas pela IAEA. No Brasil, existe legislação para o transporte de

produtos perigosos e materiais nucleares controlados pela CNEN encontradas nas normas de transporte (NE- 5.01 e NE-5.02).

Um acidente no transporte do combustível nuclear queimado da central nuclear para a instalação de armazenagem temporária pode ocasionar graves danos ao meio ambiente se ocorre vazamento de material radioativo, por isso é necessário conter o combustível em cilindros de transporte muito resistentes denominados de cascos de transporte e que podem servir para armazenagem, também. (Romanato; Rzyski, 2003)

Tabela 3.4 - Fases do transporte de CNQ

Método trivial	Método alternativo
1. Colocação do casco dentro da piscina de armazenagem;	1. Retirada do combustível da piscina do reator;
2. Colocação do combustível queimado no casco;	2. Secagem do elemento combustível;
3. Colocação da tampa no casco	3. Introdução dos elementos queimados dentro do casco;
4. Retirada do casco da piscina, drenagem da água no interior e secagem;	4. Colocação da tampa;
5. Fechamento do casco;	
6. Transferência do casco até o meio de transporte;	
7. Transporte, propriamente citado; e,	
8. Desembarque do casco no local de destino.	

Os cascos podem ser específicos apenas para o transporte do CNQ entre as piscinas dos reatores e o local de armazenagem, no qual são novamente transferidos para a instalação que pode ser seca ou úmida. O casco de transporte, na verdade, serve para a transferência de um cilindro blindado que contém CNQ, da piscina do reator para um silo horizontal ou vertical.

O transporte do CNQ pode ser feito por via rodoviária, ferroviária ou marítima. Todos os veículos de transporte são especiais como mostram as Figuras 3.27, 3.28 e 3.29 para as três modalidades (rodoviária, ferroviária e fluvial). São cascos adotados por alguns países e podem ser adotados também no Brasil.



Figura 3.27 - Transporte rodoviário de casco metálico

Fonte: <http://www.zwilag.ch>

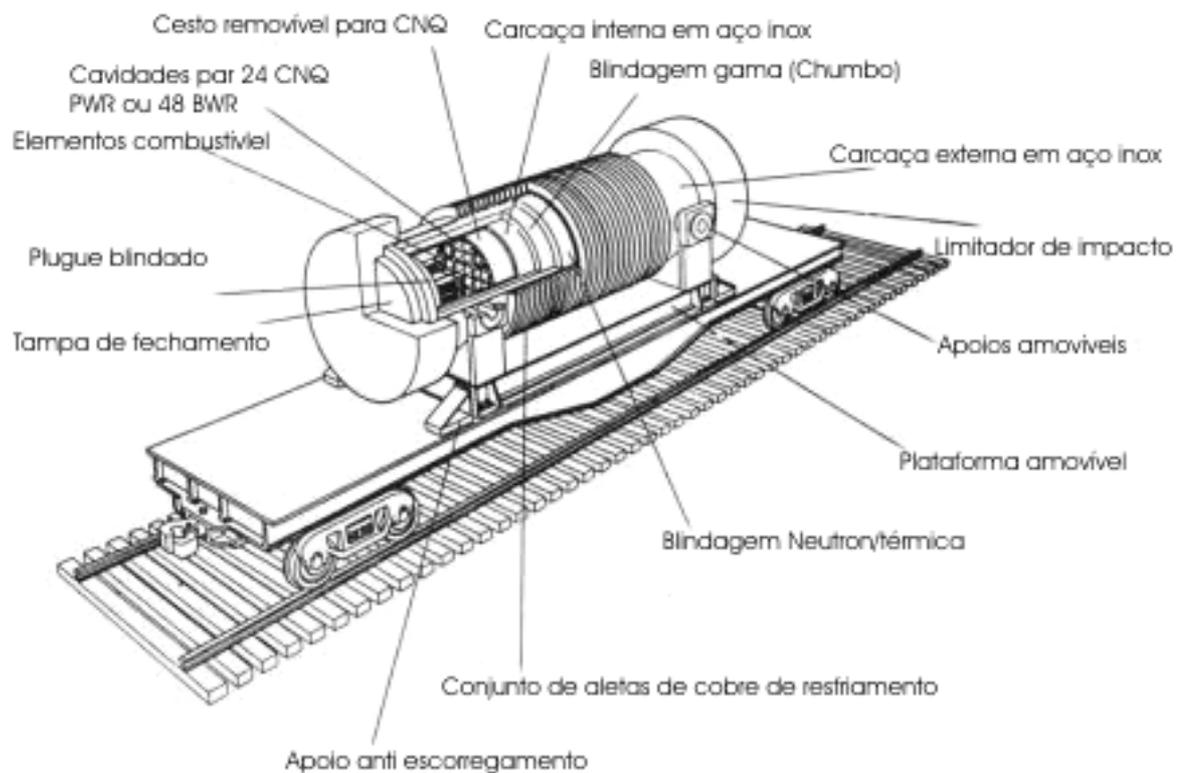
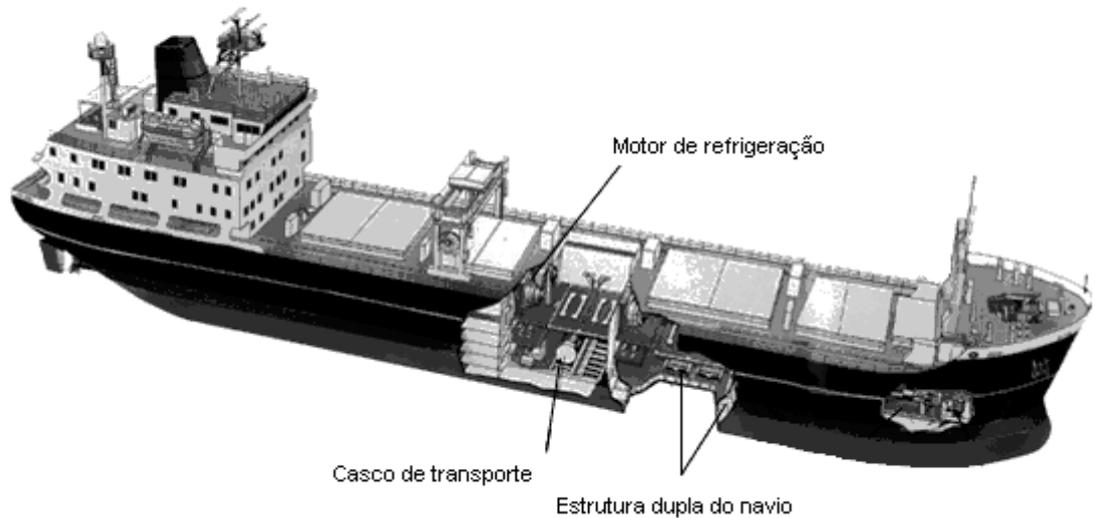


Figura 3.28 - Corte de um casco utilizado em transporte ferroviário

Fonte: Cochran e Tsoufanidis (1992)

Navio cargueiro de transporte de combustível nuclear

**Figura 3.29** - Transporte marítimo de CNQ.

Fonte: <http://www.uic.com.au>

3.5 Armazenagem de CNQ danificado

As falhas no combustível do reator podem ocorrer de duas maneiras: falha da integridade do revestimento na operação normal do reator e uma falha por causa de um dano severo no revestimento provocado por quedas e/ou superaquecimento que pode permitir a liberação de grande quantidade de produtos de fissão.

Qualquer que seja o tipo de dano, o importante é que o CNQ seja estabilizado de modo que a criticalidade não seja atingida, seja possível remover o calor de decaimento e evitado o espalhamento de material radioativo no meio ambiente em que ele é armazenado.

De acordo com IAEA (1991), o CNQ danificado deve ser enviado para resfriamento em uma piscina de armazenagem separada dos outros elementos CNQ, pois a água poderá ser contaminada. O local deve ter um sistema especial de filtros para impurezas como partículas e filtros com resinas de troca iônica para retirar íons radioativos. Se o CNQ não estiver com atividade muito alta, pode ser colocado em cilindros especiais que proporcionem blindagem adequada e posteriormente, o conjunto colocado em novo invólucro, armazenado na piscina.

O transporte do CNQ danificado para uma instalação de reprocessamento ou para uma instalação de armazenagem segue o mesmo caminho que o CNQ não danificado.

Os cuidados durante a colocação do CNQ no casco de transporte, os cuidados no próprio transporte e armazenagem, também são os mesmos que em situações de CNQ sem danos, isto é, situações normais.

A corrosão no revestimento durante a armazenagem do CNQ em piscinas, não aumenta quando o CNQ é depositado por longos períodos em situações de armazenagem via seca, conforme relato da IAEA (1988), por causa da atmosfera inerte existente dentro do casco.

4 GESTÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR QUEIMADO

4.1 Panorama mundial de gestão do CNQ

Conforme informação da International Atomic Energy Agency (IAEA) (2004), existem, em operação, 440 reatores nucleares comerciais em 31 países e 284 reatores de pesquisa em operação em 56 países.

Existem vários tipos de usinas nucleares: PWR, BWR, PHWR, AGR, entre outros, que geram, no total, aproximadamente 11.000ton de combustível queimado por ano. Ou seja, desde o funcionamento da primeira usina nuclear, já foram acumulados 250.000ton de combustível queimado armazenado tanto em via úmida como em via seca, conforme informação da World Nuclear Association (2001). De acordo com a projeção realizada pela IAEA, em 2000, a quantidade de CNQ total acumulada até 2010 será de 330.000ton em todo o mundo. Incluso neste total, está o CNQ proveniente do descomissionamento de alguns reatores nucleares cuja vida útil está se extinguindo e também deverá ser armazenado provisoriamente.

A IAEA (2004b) demonstrou que a remoção de CNQ é uma etapa muito importante no descomissionamento de reatores e a solução preferida é a remoção antecipada para uma instalação de armazenagem. Se o combustível queimado e outros materiais nucleares não puderem ser removidos da instalação nuclear, o descomissionamento não pode ser inteiramente realizado.

Na Tabela A5, do Anexo 1, estão relacionadas as políticas nacionais de alguns países com relação ao CNQ.

A seguir, está descrita de forma concisa de que modo os países estão gerenciando a armazenagem do combustível nuclear queimado.

África do Sul

Os dois reatores da central nuclear de Koeberg foram projetados conforme modelo das usinas nucleares francesas do tipo PWR. O CNQ destas centrais é reprocessado e por esse motivo as piscinas para combustível queimado foram construídas com capacidade útil para cinco anos de armazenagem (South Africa Quality Institute, 2004). Após vários estudos, optou-se pela modificação dos *racks* de armazenagem para novos

tipos de recipientes que permitem acomodar uma quantidade maior de combustíveis dobrando, praticamente, o número de conjuntos de varetas de combustível que podem receber (National Nuclear Regulator, 2004).

Alemanha

A Alemanha contava, em 2002, com 19 reatores nucleares que geravam anualmente 450ton de CNQ. O governo alemão enfrentou dificuldades na gerência do combustível queimado porque inicialmente a legislação estabelecia que as instalações nucleares reprocessassem esse combustível, mas após o cancelamento desta lei, o combustível passou a ser enviado para outros países para reprocessamento.

Uma lei, estabelecida em 1994, regia que o destino do combustível queimado fosse o repositório final e permitia o reprocessamento no território alemão. Para o primeiro caso, não havendo local para a deposição final, o combustível começou a ser armazenado em via seca em instalações específicas, contudo a cada transporte do CNQ da central para o local de armazenagem ocorriam grandes manifestações populares provocadas por ambientalistas e as autoridades precisavam intervir com rigor.

A Alemanha possui duas instalações centralizadas (Gorleben e Ahaus) para armazenagem de CNQ e outras duas na própria instalação dos reatores (Greifswald e Nord em Obrigheim), além das piscinas internas de resfriamento. Nas instalações de Gorleben, Ahaus e Greifswald, o combustível queimado é armazenado em cascos metálicos. A central de Obrigheim teve sua instalação de armazenagem úmida comissionada. Conforme a IAEA (2001) e Lidskog e Andersson (2002), a instalação de Gorleben possui uma capacidade de armazenagem de 3.800ton de CNQ, a de Ahaus de 3.960ton e a de Greifswald, 560ton.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas imagens da instalação de armazenagem temporária de longo prazo de Gorleben.



Figura 4.1 - Interior da instalação de Gorleben, Alemanha, onde se vê cascos com CNQ
Fonte: <http://www.gkn.de>



Figura 4.2 Cascos metálicos para armazenar CNQ em Gorleben, Alemanha
Fonte: <http://www.gkn.de>

Argentina

A Argentina utiliza, na Central Nuclear de Embalse, um sistema de armazenagem via seca, conforme mostrado na Figura 4.3 no qual o combustível queimado (CANDU) é alojado em tambores de aço dentro de silos de concreto. Em cada tambor são colocados vários conjuntos de combustível.

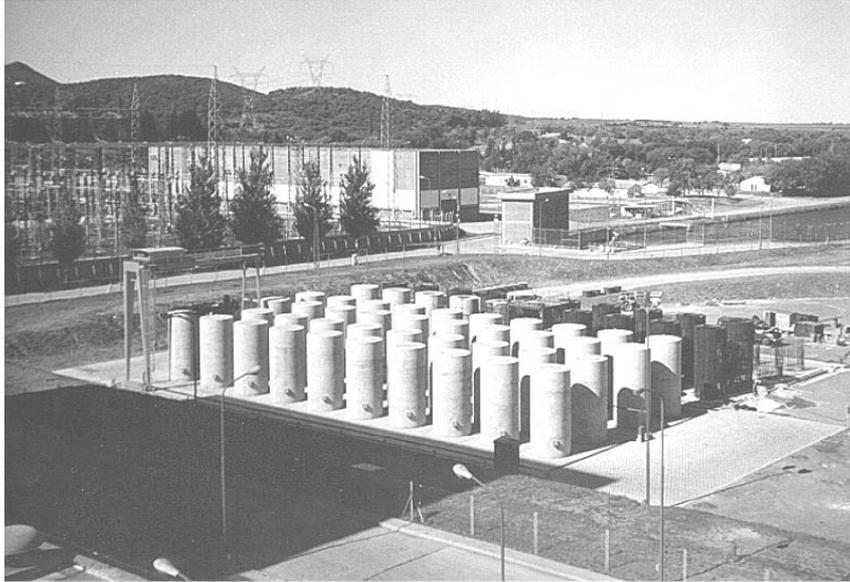


Figura 4.3 - Instalação de armazenagem de CNQ em silos de concreto a céu aberto na Argentina
Fonte: INVAP (2004)

O CNQ é colocado em recipientes (tambores) de aço inoxidável dentro da piscina. O recipiente é removido da piscina e submetido a um processo de secagem dentro de uma célula blindada e a seguir, tampado e soldado hermeticamente (Figura 4.4). O recipiente, com o CNQ, é transportado dentro de um casco de transporte blindado até o silo de armazenagem no qual é enclausurado. O silo é composto por um cilindro de aço recoberto com concreto armado apropriado e tem a capacidade para armazenar vários recipientes colocados uns sobre os outros (INVAP, 2004).



Figura 4.4 - Detalhe interno do recipiente com combustível nuclear queimado
Fonte: INVAP, 2004

A central nuclear de Atucha utiliza as piscinas da própria instalação na qual os *racks* de armazenagem foram substituídos por outros que permitem agrupar mais elementos combustíveis queimados por metro quadrado. Esta capacidade de armazenagem passou de 1.232 para 3.240 elementos combustíveis (Comisión Nacional de Energia Atómica, 2003).

Armênia

Durante o domínio soviético na Armênia, o combustível nuclear queimado retornava para a União Soviética para reprocessamento. Após 1988, nenhum combustível queimado deixou a Armênia. Em 1996, o país tinha acumulado 160 toneladas de combustível queimado. Em 1997, com falta de local para armazenagem de mais CNQ, o governo francês financiou uma instalação de armazenagem seca para que o CNQ possa ser contido por 50 anos (Nuclear Threat Initiative, 2004a). Esta instalação é composta por 11 silos de armazenagem horizontais com capacidade unitária de 56 elementos combustíveis queimados (Hanson e Chollet, 2003).

Bélgica

A Bélgica já enviou, no passado, CNQ para ser reprocessado na França, mas em virtude de decisões políticas, todo o combustível que não foi enviado para o reprocessamento está armazenado temporariamente, aguardando uma decisão com relação ao seu destino final. Os métodos utilizados são: armazenagem via seca, em cascos metálicos multi-propósito em recinto fechado na localidade de Doel e armazenagem via úmida em piscinas instaladas em um prédio blindado na instalação do reator de Tihange (Dionisi, 1999).

Bulgária

A Bulgária enviava o combustível queimado para a Rússia por um acordo governamental, mas, por causa do tempo necessário para a armazenagem temporária em curto prazo antes do transporte, foi construída uma instalação de armazenagem úmida com capacidade de 600ton de CNQ, em Kozloduy, e atualmente estão em estudo métodos para o aumento desta capacidade de armazenagem (IAEA, 2002).

Canadá

O Canadá tem um dos maiores inventários de combustível nuclear queimado no mundo, pois os tipos de reatores lá existentes, PHWR, utilizam uma quantidade maior de combustível para cada 1kW produzido. A política quanto a esse combustível é a deposição final direta, e enquanto o repositório não fica pronto (previsão para 2025), o combustível é armazenado tanto em piscinas como em via seca, e neste último caso de três formas: sistema modular em poços, cascos de concreto, e recipientes denominados ‘recipientes para armazenagem seca’ (*Dry Storage Container - DSC*). Os DSC são específicos para guardar o combustível CANDU. A diferença entre os DSC e os cascos de armazenagem de concreto está no formato que é retangular e o combustível queimado é armazenado na horizontal, conforme mostra a Figura 4.5. Os containeres vazios pesam 74ton, e carregados aproximadamente 90ton. O preenchimento de concreto que fica entre as paredes do revestimento é de 52cm e a espessura do revestimento, externo e interno, em aço-carbono têm 13mm de espessura, portanto a espessura total é de 54,6cm (Khan e King, 2003).

O Canadá possui 50 anos de experiência quanto a armazenagem de CNQ em piscinas (Hancox et al., 1987). A quantidade de CNQ armazenado, até 2003, neste tipo de instalações era de 38.825ton e nas instalações via seca 4.239ton.

Cazaquistão

Apesar da central de Aktau já estar fechada, e o CNQ ser mantido nas piscinas do reator, foi tomada a decisão de transportar esse combustível para uma instalação em fase de teste para que seja armazenado por 50 anos. Além disso, está sendo planejada a construção de uma instalação para armazenagem via seca com a colaboração do laboratório americano de Los Alamos (International Science & Technology Center, 2003)

China

Conforme a World Nuclear Association - WNA (2004a), a China conta com nove reatores tipos PWR e PHWR em operação, mais dois PWR estão em construção e mais 26 em fase de planejamento. A capacidade de armazenagem do CNQ dos reatores é pequena, mas se o combustível for enviado para a instalação de armazenagem úmida que está em construção, em Lanzhou (faz parte de um complexo de reprocessamento de CNQ), cuja capacidade será de 550ton de CNQ expansível para mais 500ton, apenas em 2020 a capacidade total de armazenagem será atingida (IAEA, 2001). Conforme a WNA (2004), o

tipo de reator influi na quantidade de CNQ gerado, portanto, conforme a predominância da quantidade de reatores PWR ou PHWR, talvez seja necessário construir instalações de armazenagem para acomodar o CNQ gerado na troca de combustível.

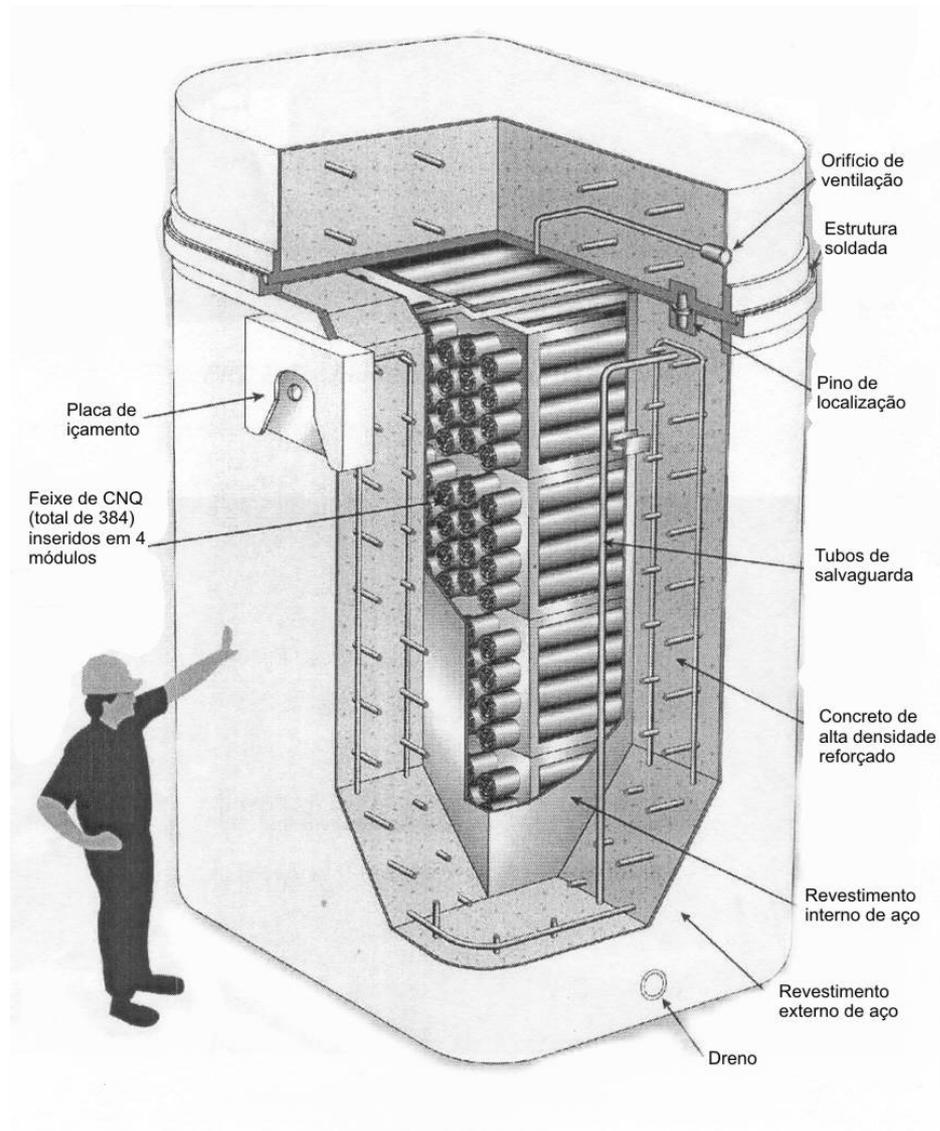


Figura 4.5 – Recipiente DSC para armazenagem seca do combustível CANDU no Canadá
Fonte: Khan e King, 2003

Coréia do Sul

A Coréia do Sul possui 14 reatores nucleares, de água leve e de água pesada, e planejam construir outros. Grande parte do combustível também se encontra sob controle dos EUA e, como em Taiwan, não foi dada permissão para o reprocessamento - o combustível nuclear queimado está temporariamente armazenado. Em 1992, a Coréia do

Sul começou a armazenar o combustível CANDU em silos de concreto na própria instalação de Wolsong. Até meados de 1998, 3.400ton de CNQ haviam sido descarregadas dos reatores e deste ano em diante quase 500ton por ano. Existe um plano (ainda em estudo) para armazenagem a seco em uma instalação centralizada, mas por causa da grande oposição pública, o combustível continua sendo armazenado nas piscinas, em *racks* modificados. A Coreia do Sul está estudando também a viabilidade de construir uma instalação via úmida centralizada (IAEA, 2002).

Eslováquia

Com o descomissionamento da unidade A-1 da central de Bohunice, até 1999, todo o combustível nuclear queimado foi enviado para a Rússia.

O combustível das outras unidades é armazenado em um prédio construído nas instalações da central, em piscina, cuja capacidade foi expandida para armazenar todo aquele CNQ gerado durante a operação (Slovenské Elekrárne, 2004).

Em 2001, foi decidida a construção de uma instalação de armazenagem via seca para receber o CNQ da central de Mochovce. Nas piscinas de armazenagem de Mochovce, cuja capacidade de armazenagem é alta, existe muito mais combustível que na instalação de Bohunice e, em 2009, estará com ela totalmente esgotada. Até lá a instalação seca ficará pronta (Vaclav, 2003).

Eslovênia

A quantidade de CNQ gerado na Eslovênia é muito pequena comparada a dos outros países da Europa. O CNQ é armazenado na piscina do reator Krsko. Em 2000, foi assinado um contrato entre o governo da Eslovênia e a empresa especializada Framatech (EUA), para a troca dos *racks* por outros mais compactos.

É possível que a Eslovênia opte por aumentar a capacidade da piscina mediante o aumento físico da mesma. Desta forma a capacidade poderá ser suficiente para a armazenagem do CNQ até o ano de 2023, prazo de vida útil da central nuclear de Krsko (Mele, 2003).

Espanha

A escolha da Espanha é a armazenagem do CNQ em via úmida nas piscinas dos reatores, com a possibilidade de aumentar a capacidade existente e a utilização de cascos metálicos de duplo propósito. Até dezembro de 2000, 56,47% da capacidade de

armazenagem das piscinas dos nove reatores nucleares existentes estava sendo utilizada (Consejo de Seguridad Nuclear, 2004).

Conforme o Ministério de Industria y Energia (1999), a estratégia da gerência do CNQ tem duas fases: a primeira, até 2010, com a armazenagem de CNQ nas piscinas dos próprios reatores e a segunda fase, a partir de 2010, a armazenagem será feita em uma instalação centralizada modular seca.

Estados Unidos

Até o final de 1998, aproximadamente 38.400ton de combustível nuclear queimado estavam armazenadas nos EUA. A maior parte desse combustível 37.632ton (98%) estava armazenada nas piscinas dos reatores. Apenas 1.511ton (2%) estavam armazenadas em cascos metálicos ou de concreto, nas instalações das centrais nucleares.

A maior parte das piscinas de resfriamento de combustível dos reatores americanos estão com mais de 50% de sua capacidade de armazenagem disponível. Hoje em dia, o país está em fase de licenciamento de novos tipos de cascos para armazenagem via seca com denominações NUHOMS (*Nuclear Horizontal Modular System*) (Figura 4.6), VSC (*Ventilate Storage Cask*) (Figura 4.7) e os cascos modelos CASTOR (*Cask of Storage for Radioactive Materials*), TN (*Trans Nucleaire*), NAC (*Nuclear Assurance Corporation*) e TranStor (*Transport Storage*) em 17 locais.



Figura 4.6 - Instalação modular horizontal NUHOMS para CNQ, Susquehanna, EUA

Fonte: www.cogemalogistics.com



Figura 4.7 - Cascos de concreto para CNQ com ventilação por dutos, Plant Hatch, EUA
Fonte: www.holtecinternational.com, 2004

Nas Figuras 4.8 e 4.9 podem ser observadas as instalações de armazenagem de Surry e Prairie Island.



Figura 4.8 - Instalação de armazenagem de CNQ, Surry, EUA.
Fonte: Bunn et al, 2001



Figura 4.9 - Casco para armazenagem de CNQ, Pairie Island, EUA
Fonte:<http://www.ilsr.org/columns/2003/pifseconomics.html>

O término da construção do repositório subterrâneo Yucca Mountains, Nevada, está previsto para 2010 (IAEA, 2002).

Finlândia

Até 1996 a Finlândia devolvia o combustível nuclear queimado de suas centrais nucleares para a Rússia, da qual havia adquirido. Depois que a legislação finlandesa proibiu a exportação de rejeitos nucleares, as duas instalações existentes, Olkiluoto e Loviisa, estão gerenciando esse combustível. Estas instalações adotaram a armazenagem por via úmida cuja capacidade pode ser aumentada caso seja necessário.

As duas instalações nucleares da Finlândia geram 70ton de CNQ por ano e após o resfriamento inicial, na piscina interna do reator, esse combustível é transferido para o local de armazenagem úmida fora do prédio do reator, mas na mesma instalação nuclear (Posiva Oy, 2004). Na instalação de Olkiluoto a instalação de armazenagem úmida, conhecida por TVO-KPA, está ativa e com capacidade de 1.204ton de CNQ. A Figura 4.10 mostra o esquema de um corte da instalação de armazenagem temporária em longo prazo de CNQ de Loviisa.

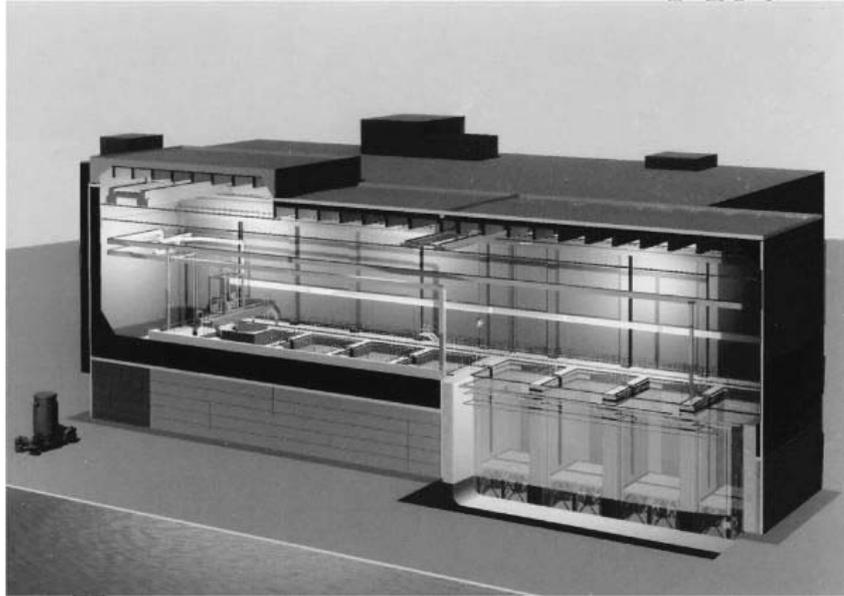


Figura 4.10 – Instalação de armazenagem úmida de Loviisa, Finlândia

Fonte: <http://www.posiva.fi/englanti/index.html>

França

A França tem a política de reprocessamento do combustível bem definida. Após a retirada das centrais nucleares, dois terços do combustível queimado gerado nos reatores de potência e pesquisa franceses contam com locais para armazenagem temporária em curto prazo, antes do reprocessamento. O transporte das centrais para as instalações de armazenagem é realizado com auxílio de cascos metálicos com aletas de refrigeração na posição horizontal. A carga e descarga do CNQ, neste tipo de invólucro, são feitas na posição vertical (Benistan et al., 1987). A instalação de armazenagem temporária em curto prazo de La Hague, por exemplo, é via úmida (Figura 4.11) e a de Cadarache, via seca (Figura 4.12). Esta última é utilizada para armazenar combustível dos reatores de pesquisa (SGN, 2004), além disso, existem as piscinas dos reatores de pesquisa e as militares (Davis, 2003). O terço restante do CNQ está armazenado, aguardando uma decisão posterior sobre o seu destino. Estudos sobre a armazenagem em longo prazo indicam que o combustível deverá ficar durante cinco anos nas piscinas dos reatores, para que o nível de atividade seja razoavelmente reduzido. Depois o CNQ será transferido para as instalações de armazenagem centralizadas, onde deverá permanecer por mais 25 anos, e então será transferido para uma instalação via seca e ficará ali por mais 300 anos. Portanto, o tempo total calculado para armazenagem antes de algum destino definitivo é de 330 anos.



Figura 4.11 - Instalação centralizada de armazenagem de CNQ em via úmida, La Hague, França

Fonte: <http://www.cea.fr/fr/Publications/Clefs45/clefs45fr/clefs4559.html>

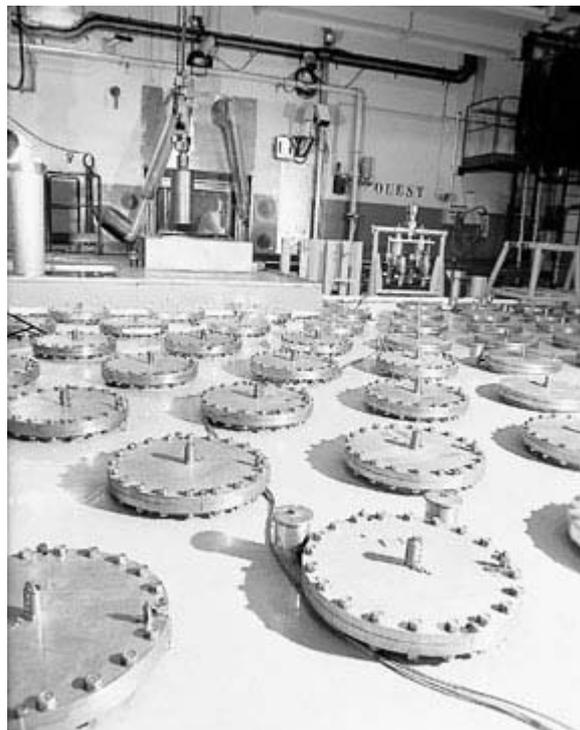


Figura 4.12 - Instalação de armazenagem seca de CNQ, Cascad, França

Fonte: http://www.cea.fr/gb/publications/Clefs46/pagesg/clefs46_57.html

Holanda

O combustível nuclear queimado, gerado na Holanda, é reprocessado na França e Reino Unido. Existe uma instalação centralizada de armazenagem seca, recém inaugurada, chamada HABOG (Figura 4.13 e 4.14). Grande parte do combustível queimado da central nuclear de Borssele aguarda o envio para as instalações de reprocessamento e está sendo armazenado nessa instalação de armazenagem temporária em curto prazo.



Figura 4.13 - Instalação de armazenagem de CNQ, HABOG, Holanda

Fonte: http://www2.rwmc.or.jp/overseas/news_flash/Netherland1016.htm

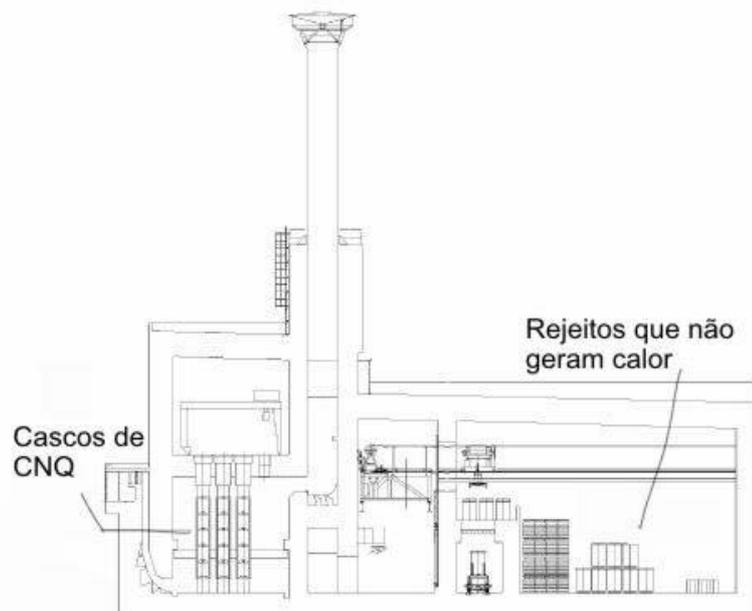


Figura 4.14 - Esquema em corte da instalação HABOG, Holanda

Fonte: http://www2.rwmc.or.jp/overseas/news_flash/Netherland1016.htm

Hungria

A Hungria tem uma central nuclear com quatro reatores. A estratégia original, com relação ao ciclo do combustível, era enviar o CNQ à antiga União Soviética, para reprocessamento, após três anos de resfriamento nas piscinas para esta finalidade. Após o envio de 2.331 elementos de combustível nuclear queimado, constatou-se que era necessário gerenciar o CNQ no próprio país, pois as modificações políticas na União Soviética resultaram na interrupção de recebimento do CNQ. (Takáts et al., 2003)

Após vários estudos, foi desenvolvido um sistema de armazenagem modular em poços - MVDS, e está previsto um total de 11 módulos. No ano 2000 oito já estavam operacionais, mas, mesmo assim, sua política de deposição final ainda está indefinida (IAEA, 2002). O CNQ é colocado nos tubos (poços) localizados no piso do prédio de armazenagem, cada elemento combustível é colocado no tubo na posição vertical (Figura 4.15). Após a monitoração, os poços são preenchidos com gás nitrogênio e hermeticamente fechados. (Paks, 2004)



Figura 4.15 – Vista externa da instalação de armazenagem de CNQ, PAKS, Hungria

Fonte: <http://www.npp.hu/kornyezet/KKAT-e.htm>

Índia

A Índia possui 14 reatores nucleares dos tipos BWR e PHWR, e mais 8 em construção (PHWR e PWR). A armazenagem via úmida é predominante para os vários tipos de combustível gerados. Em Tarapur, a piscina de armazenagem cuja capacidade era

de 528 elementos BWR foi aumentada pela utilização de *racks*, para 1500 elementos. Para o combustível gerado nos reatores PHWR está sendo construída uma instalação de armazenagem via seca, em Kota. Após ser retirado do reator o CNQ será resfriado durante 10 anos nas piscinas e então colocado em cascos de concreto em Kota.

Nas instalações de reprocessamento, o CNQ fica provisoriamente armazenado em piscinas revestidas com aço inox. As piscinas de armazenagem mais modernas são de concreto revestido com aço inox e as mais antigas pintadas com tinta epóxi. (Kulkarni et al., 2003)

Irã

Existem poucas informações sobre a central nuclear de Bushehr de 1.000MW. O governo russo assinou, em 1995, um acordo com o Irã para o término da construção da central iniciada pela Alemanha e suspensa, em 1979, após a queda do Xá. Nesse acordo o CNQ gerado na central Bushehr será enviado para a Rússia para reprocessamento.

Itália

Em 1987, o programa nuclear italiano foi abandonado e a maior parte do combustível nuclear queimado foi reprocessada no Reino Unido. O restante ficou armazenado nas piscinas dos reatores daquele país e será transferido para cascos metálicos multi-propósito, após a conclusão dos estudos a esse respeito.

Japão

Desde março de 2002, o Japão opera 52 reatores em todo o país com um total de 45.742MW. Um terço do consumo de energia elétrica é de origem nuclear. A grande maioria das centrais nucleares comerciais no Japão é do tipo BWR, com algumas ABWR, PWR e FBR. Até setembro de 1999, foram geradas no Japão 14.620ton de CNQ. Uma parte, 5.630ton, foi enviada para reprocessamento para a França (La Hague) e para o Reino Unido (Sellafield); 940ton foram enviadas para a Unidade de Reprocessamento em Tokai, no Japão; e, o restante, 8.050ton, continua armazenado nas instalações das respectivas usinas.

A capacidade de armazenagem nas centrais nucleares não suportaria cinco anos de geração de CNQ, se não fossem tomadas medidas preventivas. O Japão utiliza dois tipos de armazenagem: a via seca em cascos de concreto e metálicos, e a via úmida.

Lituânia

A central de Ignalina opera uma instalação de armazenagem a seco na qual são depositados cascos metálicos. O local pode acomodar 72 cascos. Está sendo estudada, também, a utilização de cascos de concreto tipo CONSTOR (IAEA, 1999).

A opção da armazenagem seca foi proposta pela SKB sueca e os cascos estão sendo confeccionados pela empresa alemã GNB (Gesellschaft für Nuklear Behälter).

México

No México ainda não foi definido o destino final para o CNQ que é armazenado nas piscinas dos reatores da central de Laguna Verde. Foi adotada a política "espere e veja" antes que seja escolhida uma solução.

Paquistão

A central nuclear de Karachi utiliza a piscina de armazenagem do reator para conter o CNQ gerado. Em virtude de ter atingido 90% da capacidade da piscina, o aumento da capacidade de armazenagem desta piscina está sendo planejado e, simultaneamente, a construção de uma instalação temporária de longo prazo via seca. Esta instalação via seca proposta consiste de módulos de concreto nos quais serão introduzidos os tambores com CNQ (Ahmed et al., 2003).

Reino Unido

O Reino Unido possui diversos tipos de reatores para geração de energia elétrica (MAGNOX, AGR, HTGR e PWR). Em todos eles o CNQ apresenta diferenças nos formatos, composição e quantidade de varetas, e devem ser armazenados até a época do reprocessamento ou serem considerados apenas rejeitos.

O Reino Unido adotou estratégias para a disposição do combustível nuclear queimado. O CNQ proveniente dos reatores MAGNOX e AGR é reprocessado. Após o prazo de decaimento na piscina do reator, ele é enviado para a instalação de Sellafield, na qual aguarda a fase de reprocessamento. Em Sellafield, a piscina de armazenagem, Figura 4.16, cuja capacidade de armazenagem é de 8.000ton acomoda os cascos com o CNQ.



Figura 4.16 - Piscina de armazenagem temporária de curto prazo em Sellafield, Reino Unido

Fonte: http://www.sparkingreaction.info/MTP_331EFB51-AA6C-47EB-BA8E8C131A9370F9.shtml

O combustível nuclear queimado nos reatores HTGR também é enviado para as piscinas da instalação de reprocessamento Sellafield, enquanto aguarda o reprocessamento ou o envio para um repositório final que ainda não está definido. O CNQ proveniente dos reatores PWR, não tem destino certo, pois o reprocessamento está, no momento, fora de cogitação. Por isso, fica armazenado temporariamente nas piscinas dos reatores onde é gerado e aguarda a deposição final.

O Reino Unido também possui, na central nuclear de Wylfa, uma instalação de armazenagem via seca que armazena o CNQ cuja capacidade é para 700ton de CNQ (IAEA, 2001). Essa central opera com combustível tipo MAGNOX.

República Checa

Conforme relatório da IAEA (2002), o CNQ gerado nas usinas da República Checa é visto como fonte de energia, por isso, a idéia de utilizar o reprocessamento não foi abandonada. É utilizada a armazenagem temporária via seca de curto prazo, em cascos de aço. Existe uma instalação para acomodar 60 cascos de armazenagem para 600ton de CNQ, inclusive com planos de expansão para 1.340ton e a construção de outra instalação com capacidade de 1.370ton de CNQ.

A instalação, localizada no mesmo local da central de Dukovany, recebe o combustível que é resfriado durante 6 a 7,5 anos, e deve armazenar o CNQ por um período de 60 anos, prazo que se acredita estará pronto um repositório geológico (Lietava et al., 2003).

A proposta de nova instalação de armazenagem seca, situada na central Temelin, tem o início das operações previsto para 2014 (Coufal; Brzobohatý, 2003).

Romênia

O reator 1 de Cernavoda tem gerado, desde 1996, 100ton de CNQ por ano. O reator 2 está sendo construído e a expectativa de término é em 2006. Existem ainda planos para o início da construção do reator 3. O combustível nuclear queimado é armazenado por 8 anos em piscinas localizadas no reator. Está sendo estudada uma instalação de armazenagem via seca na central elétrica de Cernavoda (Nuclearelectrica, 2004), baseada no sistema canadense MACSTOR (*Modular Air Cooled Storage*) (Figura 4.17). Esta instalação abrange a armazenagem do CNQ gerado durante 30 anos de dois reatores 1 e 2 ou 2 e 3, e é necessária uma ampliação, ou armazenagem suplementar, após a entrada do reator 3 em serviço (Biro et al., 2003)



Figura 4.17 - Sistema modular de armazenagem seca MACSTOR

Fonte: www.aecl.ca (2003)

Rússia

A Rússia apresenta problemas com alguns tipos de combustível. O combustível de 180 submarinos nucleares precisava ser armazenado de forma segura e hoje está guardado em navios especialmente adaptados. Os 29 reatores civis geram 790ton de CNQ por ano, com mais de 11.000ton de CNQ que já estão armazenados. O combustível dos reatores de grafite (RBMK) não são reprocessados por motivos econômicos, por isso as piscinas desses reatores, em particular da central nuclear de Leningrad, estão cheias. Foi planejada a construção de uma instalação centralizada para a armazenagem do combustível queimado dos reatores RBMK, mas em virtude de problemas financeiros, ela foi postergada.

A Rússia assinou convênios com vários países (Alemanha, França, Bélgica e Finlândia) para construção de instalações via seca, cascos metálicos de duplo propósito e cascos de concreto para as centrais de Bilibino e Smolensk. (IAEA, 1995). O combustível queimado provindo dos reatores VVER-440 e VVER-1000, dessas centrais ficam aguardando nas piscinas dos reatores a vez para o reprocessamento ou para serem enviados para a instalação de Zheleznogorsk, na qual está sendo construída mais uma instalação de reprocessamento (Nuclear Energy Institute, 1997)

Suécia

A Suécia possui 11 reatores nucleares em 4 locais diferentes de seu território. Estima-se que até 2010 o programa nuclear sueco tenha produzido um total de 8.000ton de CNQ, conforme Andersson e Andrews (2001). Naquele país foi construída uma instalação de armazenagem centralizada (via úmida) e, atualmente, é de consenso geral, não construir mais nenhuma usina nuclear no país. Esta instalação de armazenagem (CLAB) apresenta um conceito diferente de engenharia e arquitetura. A configuração inicial do CLAB consistia de uma área de recebimento no nível do solo e de uma câmara de armazenagem composta por quatro grandes piscinas subterrâneas localizadas a 25m de profundidade e capacidade para 5.000ton de CNQ. (Svensk Kärnbränslehantering, 2004). Uma segunda câmara, similar a primeira, mas com capacidade de 3.000ton de CNQ, teve sua construção iniciada em 1999.

Na Figura 4.18 é mostrado um desenho em corte da instalação de armazenagem CLAB com sua expansão para uma capacidade maior de armazenagem (Svensk Kärnbränslehantering, 2000).

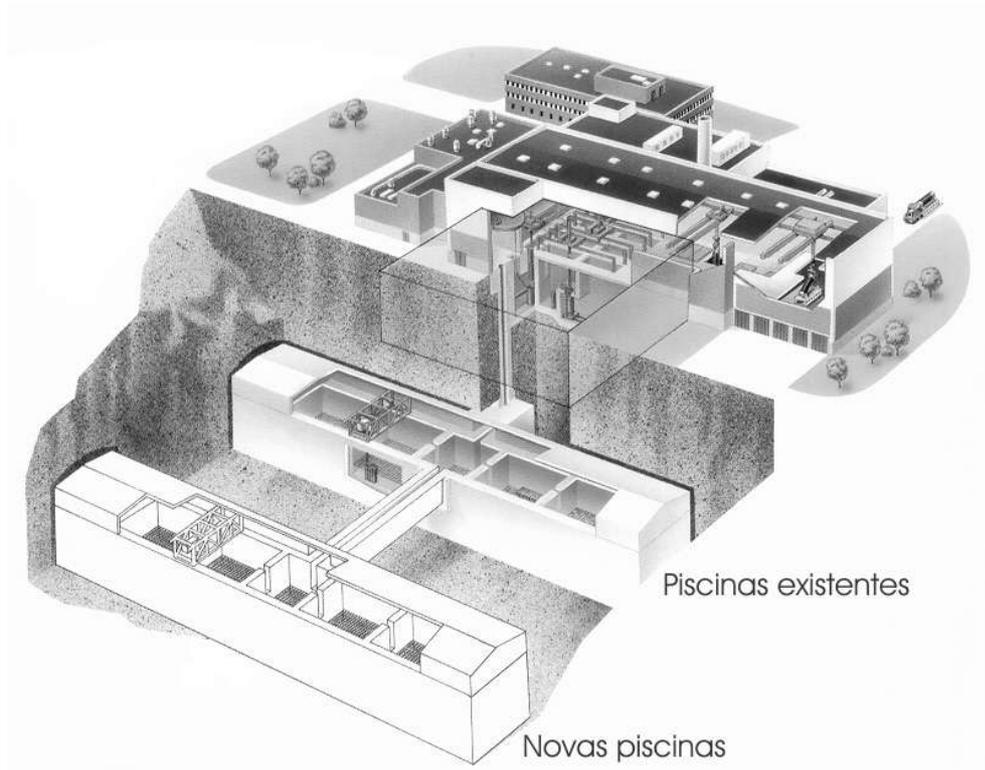


Figura 4.18 – Instalação subterrânea CLAB, Suécia, para armazenagem de CNQ via úmida

Fonte: SKB (2004)

Na Suécia também são realizados estudos para o desenvolvimento de cilindros de transporte e cilindros de armazenagem em cobre, mas estes serão utilizados para a armazenagem do CNQ apenas no repositório final.

No descomissionamento do reator 1 da central nuclear de Barsebäck, em 2001, uma parte do combustível que estava armazenada na piscina, ou seja, 214 elementos, por economia, foram enviados para a piscina do reator 2, com auxílio de cascos de transporte para 17 elementos cada. Outros 462 elementos foram enviados ao CLAB (Barsebäck, 2004).

Suíça

Conforme informação do Office of Civilian Radioactive Waste Management (2004) o combustível nuclear queimado dos quatro reatores existentes na Suíça é armazenado de 1 a 10 anos nas piscinas dos reatores suíços. Após o período de resfriamento, parte deste CNQ segue para reprocessamento no Reino Unido ou França e a outra parte segue para armazenagem via seca em ZWILAG (Figura 4.19), instalação temporária de curto prazo centralizada construída para armazenar combustível nuclear

queimado, rejeitos de atividade alta, rejeitos radioativos de atividade baixa acondicionados e rejeitos de média e baixa atividade tratados. O CNQ é enviado para ZWILAG em cascos de aço multi-propósito como mostra a Figura 4.20 (VERDIER et al., 2003).



Figura 4.19 - Instalação de ZWILAG, Suíça, para armazenar CNQ em via seca
Fonte: <http://www.zwilag.ch> (2004)



Figura 4.20 - Cascos de aço com CNQ dentro da instalação ZWILAG, Suíça
Fonte: <http://www.zwilag.ch> (2004)

Taiwan

A ilha de Taiwan apresenta um grande problema com relação à gerência do CNQ. O combustível nuclear queimado nos seis reatores existentes é armazenado nas próprias piscinas de resfriamento nas instalações dos reatores. Como o governo dos EUA controla esse combustível, ainda não decidiu sobre a política de reprocessamento por julgar que Taiwan poderia facilitar a proliferação de armas nucleares. Existe um plano para construir uma instalação de armazenagem via seca até o ano de 2008.

Ucrânia

São produzidas, aproximadamente, 265ton de combustível queimado por ano. Os elementos combustíveis são mantidos nas piscinas dos reatores (Nuclear Threat Initiative, 2004b).

Em 1995, um acordo entre Rússia e a Ucrânia permitiu o envio de uma parte do CNQ ucraniano para armazenagem nas instalações em Krasnoyarsk na Sibéria, Rússia, e outra parte do CNQ foi transferida para Khmelnytskyi, Ucrânia. (Nuclear Energy Institute, 1997).

A central de Chernobyl utiliza como método de armazenagem as piscinas dos reatores e também uma piscina centralizada cuja capacidade é de 200ton de CNQ. Também está em construção uma instalação modular via seca (IAEA, 2001).

A central nuclear de Zaporozhe conta com um sistema de armazenagem via seca em cascos de concreto (Figura 4.21). A instalação pode acomodar 380 cascos, suficiente para toda vida da central. Cada casco tem capacidade para armazenar 24 elementos de combustível nuclear queimado (Zaporozye NPP, 2004).

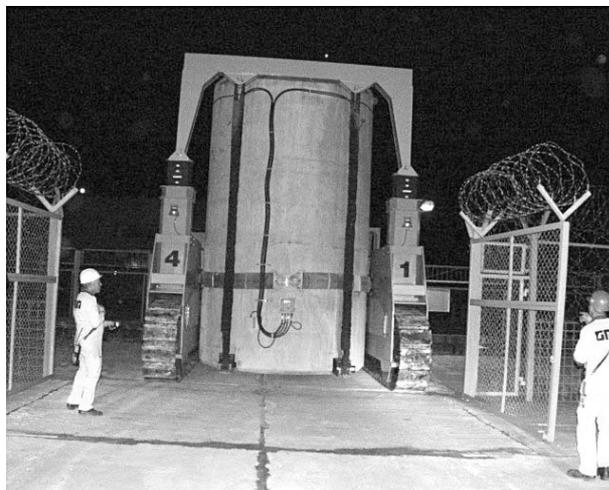


Figura 4.21 - Casco de concreto para CNQ, armazenagem via seca, Zaporozhe, Ucrânia
Fonte: Zaporozye NPP (2004)

4.2 Segurança

A segurança dos locais de armazenagem de combustível queimado, que têm uma grande concentração de produtos de fissão, é muito importante. O nível de água e a vigilância dos elementos quanto à corrosão do revestimento são constantemente monitorados, pois a perda de água da piscina poderia expor o combustível queimado. Se o combustível ficar exposto ao ar, o zircônio do revestimento reagirá provocando uma reação exotérmica e provocará um incêndio. A NRC admite que esse tipo de incêndio pode durar vários dias, pois não se extingue facilmente, liberando na atmosfera uma grande quantidade de elementos de fissão (Alvarez, 2002).

A segurança física é outro item que precisa ser considerado. Em relatório feito pelo General Accounting Office (GAO) nos Estados Unidos (2003), estudos realizados pela Sandia National Laboratory (EUA) no ano 2000, concluem que a liberação acidental de radionuclídeos em casos de acidentes de trânsito com CNQ são muito improváveis. Estudos de simulação permitem afirmar que em 99,9% dos acidentes, os cascos de transporte não sofreriam nenhum dano significativo. Os cálculos mostraram que a probabilidade de liberação de material radioativo em acidentes rodoviários no transporte de CNQ, é muito pequena, isto é, 2,8 em 10 milhões e que poderia causar até cinco mortes em longo prazo.

Outro fator considerado nas simulações foi a ocorrência de um terremoto muito forte (mais de 8 graus Richter), que poderia propiciar um incêndio na piscina, desde que toda a água da piscina escorresse por alguma fenda sem que fosse possível repô-la. Outros eventos postulados que afetam a segurança do CNQ são: perda de energia elétrica que desligaria a refrigeração da água; queda de um objeto pesado na piscina danificando as paredes e o fundo; ou a queda de uma aeronave.

Uma opção para o aumento da segurança do local onde haja CNQ é a minimização do número de transportes de cascos com CNQ. A preferência por transporte ferroviário é cogitada pela razão de se poder transportar um volume maior em apenas uma viagem do que de muitas viagens rodoviárias mais susceptíveis a acidentes.

A segurança contra roubo no transporte dos cascos também é assunto que faz parte da segurança do combustível queimado.

Em razão da massa elevada dos cascos, em torno de 40ton (os mais leves), fica difícil pensar em roubo para extração de plutônio. O combustível dentro do casco gera muito calor e apresenta altos níveis de radiação, e é difícil retirá-lo sem apoio de maquinário adequado e proteção do pessoal envolvido, em curto espaço de tempo. O

grande problema surgido nos últimos anos é a hipótese de um ato terrorista que poderia danificar a estrutura dos cascos ou a instalação. Isto poderia provocar a liberação de altos índices de radiação e até mesmo contaminação das áreas adjacentes à instalação.

Atos terroristas também estão considerados nesse tipo de segurança. O efeito de colisão de aviões, queda de mísseis ou outros tipos de explosões têm sido criteriosamente estudados.

Analisando-se, porém, do ponto de vista de um conflito armado não nuclear, as instalações úmidas e secas são muito vulneráveis. As úmidas se atingidas por ataques aéreos ou terrestres, sofreriam danos nas piscinas liberando uma grande quantidade de radionuclídeos no ambiente. Para uma instalação seca, a grande vulnerabilidade é o ataque com munição militar tipo perfurante contra os cascos, pois outro tipo de explosivo não os danificaria completamente. Ataques aéreos também danificariam os cascos (tanto metálicos como de concreto) e os poços.

Estudos teóricos realizados por Pennington e Mcgough (2002), com relação à queda de aviões, mostraram que a colisão de uma aeronave Boeing 747-400 a 800km/h contra um casco de concreto não resultaria em danos estruturais graves ao casco, nem liberação de radionuclídeos. O casco usado para os cálculos do estudo feito pelos autores foi um multi-propósito de concreto, modelo NAC, com 5,7m de altura, 3,5m de diâmetro e massa de 137.000kg. O impacto foi comparado a uma colisão entre um grande saco plástico com penas de aves arremessado contra uma coluna de concreto. Contudo, poderia haver conseqüências por causa do incêndio provocado pela explosão dos tanques de combustível da aeronave. Uma aeronave Boeing 747-400 possui 176m³ de combustível e um Airbus A340-600, 195m³, e a temperatura de queima do combustível é de aproximadamente 815°C. Esta temperatura, por um período apreciável, antes da extinção do incêndio, poderia causar fissuras nos cascos de concreto e estas por sua vez fragilizar o casco como um todo de tal forma que seria necessário transferir o CNQ para novos cascos de armazenagem.

Outros estudos, realizados por Thomauske (2003), englobando os impactos mecânicos e térmicos contra um edifício de armazenagem de cascos metálicos, apontam as conseqüências na estrutura do prédio, tendo como resultado sua destruição, porém, não danificando a estrutura dos cascos.

Na Figura 4.22 é apresentada uma comparação entre as dimensões de uma instalação de armazenagem seca com poços de convecção e uma aeronave Boeing 747 e na

Figura 4.23 uma montagem em que se supõe que um avião comercial está indo em direção a uma instalação de armazenagem seca.



Figura 4.22 – Comparação entre as dimensões do Boeing 747 e de um edifício de armazenagem de CNQ
Fonte: Thomauske (2003)

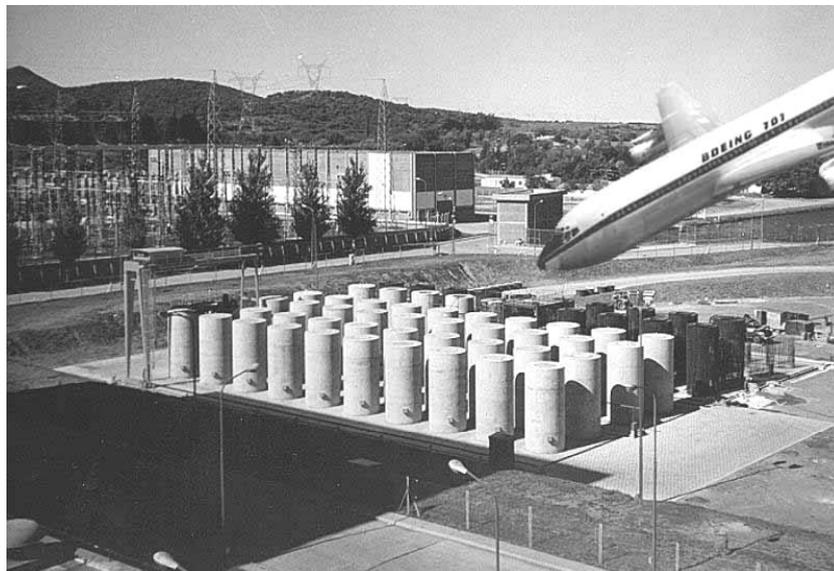


Figura 4.23 - Simulação da queda (atentado) de um Boeing 707 sobre uma instalação de armazenagem seca em silos de concreto. Fotomontagem da foto da instalação de Embalse, Argentina, e um avião de passageiros.

O impacto da aeronave contra um prédio que contém uma piscina de armazenagem é diferente, pois o provável desabamento do prédio aliado à explosão do avião e conseqüente incêndio, danificariam os elementos combustíveis queimados

armazenados. A água da piscina seria deslocada para fora da piscina e aquela misturada ao combustível evaporaria por causa do calor da combustão. Os danos ocorridos ao revestimento provocariam a emissão dos produtos de fissão na atmosfera junto com a fumaça do incêndio, acarretando níveis catastróficos de contaminação radioativa no ambiente.

Quanto à utilização de explosivos, as consequências são bem mais devastadoras se as instalações existentes não possuem medidas de proteção contra este tipo de situação. Em um estudo realizado por Hirsch e Neumann (2001), com relação a ataques com munições militares perfurantes modernas contra os cascos metálicos, mostram que esses não suportariam o impacto direto. O projétil penetraria no casco danificando todo o CNQ e contaminando uma grande área circundante.

Qualquer ato terrorista pode expor um grande número de pessoas aos efeitos da radiação do CNQ, pois se ocorrer a liberação de material radioativo do casco de confinamento, o material se dispersaria no ambiente podendo atingir áreas povoadas.

Apesar do descrito anteriormente, de acordo com o GAO (2003), estudos realizados pelo NRC e DOE, dos Estados Unidos, indicaram que é baixa a probabilidade de contaminar o ser humano com material radioativo que escape dos contêineres em um ataque terrorista ou um acidente severo no transporte ou armazenagem seca do CNQ (0,007% dos acidentes rodoviários e 0,004% dos acidentes ferroviários com CNQ poderiam liberar material radioativo).

O importante é que o local de armazenagem seja fisicamente bem protegido com barreiras que dificultem o acesso de pessoas ou veículos não autorizados.

4.3 Custos

Os custos constituem um fator importante para a escolha do tipo de armazenagem temporária a ser adotada, mas não é o único. Para a seleção do tipo de armazenagem a ser utilizado deve-se saber qual o destino final do combustível, reprocessamento ou deposição em repositório profundo, pois para o primeiro caso, o combustível será armazenado por um curto espaço de tempo, enquanto no segundo, deverá esperar até que o repositório fique pronto, processo este que pode demorar muitos anos. Os custos variam, também conforme o sistema utilizado, as modificações a serem feitas nas instalações, o licenciamento e a capacidade de armazenagem.

Para ter uma noção dos custos de construção e operação das diversas instalações foram utilizados dados disponíveis na literatura existente. Todos os valores

monetários citados no presente estudo estão expressos em dólares americanos pois quando expressos em outro valor monetário na literatura, foram transformados em dólares ao câmbio da época da publicação de cada referência.

4.3.1 Identificação dos custos

Os custos de uma instalação de armazenagem temporária podem ser divididos em custos de desenvolvimento, investimentos, operacionais, de renovação, de descomissionamento e de transporte.

Os custos de desenvolvimento são aqueles provenientes dos estudos iniciais da construção de uma instalação de armazenagem. Incluem estudos iniciais de viabilidade, projeto conceitual e outros necessários para analisar e avaliar cada opção de armazenagem antes do início da construção.

O custo do investimento envolve todas as despesas decorrentes da construção da instalação. No investimento estão inclusos: a compra e preparação do terreno, projeto de engenharia, infra-estrutura, construção, mão-de-obra direta, aquisição de equipamentos do processo, serviços, comissionamento, licenciamento, segurança e outras despesas extras que ocorram durante a construção.

Os custos operacionais compõem-se de todas as despesas associadas com a instalação. Estes custos, normalmente, são especificados em base anual e incluem mão-de-obra direta e indireta, bens e materiais, manutenção, apoios (proteção física, monitoração ambiental) seguros, taxas, etc.

Os custos de renovação são aqueles decorrentes da situação quando equipamentos grandes ou parte da instalação se tornam obsoletos e é necessário trocá-los por outros mais modernos, fazer a renovação das licenças e melhorar os sistemas. Normalmente, estes custos surgem em instalações de armazenagem em longo prazo. Pode ser citada como exemplo a melhoria da instrumentação e a substituição do sistema de proteção física.

Os custos do descomissionamento são aqueles relacionados a atividade de fechamento final da instalação, da descontaminação, restauração do sítio e conseqüente retirada do combustível nuclear queimado do local.

Os custos de transporte abrangem um investimento específico e são resultantes dos custos operacionais e de renovação.

Na Tabela 4.1 são discriminados quais os custos decorrentes das diversas opções de armazenagem, seca ou úmida. Por exemplo, na opção de aumento da piscina,

teriam que ser feitos investimentos em desenvolvimento, operação e descomissionamento, ao passo que, se a opção for usar cascos de concreto, os custos envolveriam no investimento em infra-estrutura, aquisição de cascos já existentes, transferência do CNQ para os cascos e descomissionamento.

Tabela 4.1 – Discriminação dos custos provenientes das diversas opções de armazenagem de CNQ existentes no mundo

Fonte: IAEA (1994)

Opção	Custo de Desenvolvimento	Custo de Investimento	Custo Operacional	Custo de Renovação	Custo de Descomissionamento
Dupla fila	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Re-racking</i>	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Agrupamento das varetas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Aumento da piscina	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Piscina centralizada	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Cascos metálicos	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Cascos de concreto	Não	Sim	Não	Não	Sim
Módulos horizontais	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Silos	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Poços	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Transferência de local	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Túmulos	Sim	Sim	Não	Não	Sim

4.3.2 Comparação dos custos

Nos EUA, os custos estimados para a construção de uma instalação seca para armazenagem do CNQ em cascos, independentemente de serem de aço ou concretos, ou tamanho do casco (somente projeto e construção), variam entre US\$8 milhões e US\$12 milhões. O custo do carregamento e aquisição dos cascos, somados à mão-de-obra e

descomissionamento é estimado entre US\$60 e US\$80 para cada 1kg de CNQ (Bunn et al, 2001).

Os custos operacionais são pequenos, praticamente não existem depois que os cascos estão armazenados.

Held e Hintermayer (1978) compararam os valores que envolvem a construção e a operação de várias instalações de armazenagem úmida e seca na Europa (Tabela 4.2). O preço de armazenagem seca ficou praticamente a metade daquele da armazenagem úmida.

Tabela 4.2 - Valores (corrigidos para o ano de 2004) de construção e operação em instalações com capacidade para 500ton de CNQ sob armazenagem úmida e seca na Europa.

Fonte: adaptado de Held e Hintermayer (1978)

	Armazenagem úmida	Armazenagem seca
Custo de construção (US\$/kg_U)		
Prédios	181 -263	90 - 157
Equipamentos mecânicos	181 - 227	60 - 66
Equipamentos elétricos	90 - 115	30 - 60
Comissionamento	151	121 - 205
Total	603 - 756	301 - 488
Custos Operacionais (US\$/kg_U)		
Mão de obra	3 - 6	0,9 - 6
Serviços	5,4 - 7,3	0,9 - 3
Gastos com Energia	3 - 6	Praticamente zero
Taxas, seguros	3,6 - 4,8	1,3 - 6
Total	15 - 24,1	3,1 - 15
Custos Financeiros	302 - 604	151 - 302
Custo Permanente	604 - 906	151 - 604
Total	1525 - 2289	606 - 1409

Bunn et al. (2001) compararam os custos para manter no Japão as instalações de armazenagem úmida, em piscina, e armazenagem seca, em cascos, por um período de 40 anos. Os valores obtidos estão na Tabela 4.3. Nota-se que existe vantagem na construção de uma instalação de armazenagem seca.

Tabela 4.3 – Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado para a construção e operação de uma instalação de armazenagem de 5.000ton de CNQ no Japão.

Fonte: adaptado de Bunn et al (2001)

Custos	Piscina		Cascos	
	US\$ milhões	US\$/kg _{CNQ}	US\$ milhões	US\$/kg _{CNQ}
Custos de investimento	1.278	240	1.066	213,1
Construção	1.080	202,8	85	17
Casco	81	15,2	972	194,4
Descomissionamento	117	22	8,5	1,7
Custos operacionais	1.130	212	19,2	3,8
Custos de transporte	32	6	5,3	1,1
Total	2440	458	1090,5	218

Ao comparar os valores corrigidos para 2004 das Tabelas 4.2 e 4.3, nota-se uma diferença entre elas, a tabela mais nova apresenta um custo menor. Isso é causado pela evolução tecnológica e do crescente aumento de empresas especializadas em construção dessas instalações, bem como de novos fabricantes de materiais utilizados, que faz com que o custo diminua cada vez mais.

Se a instalação de armazenagem for construída na própria central nuclear, os custos do transporte serão muito mais reduzidos.

A Tabela 4.4 mostra os valores do custo estimado para a construção e armazenagem do CNQ fornecidos pela IAEA (1994).

Tabela 4.4 - Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado para a construção de uma instalação de armazenagem para CNQ

Fonte: adaptado de IAEA (1994)

Opção de gerência do CNQ	Custo da Instalação para 500ton/20a** (US\$ milhões)	Custo total (US\$/kg/20a)
Armazenagem seca próxima ao reator	185	370
Armazenagem úmida próxima ao reator	288	576

**a = anos

Ao comparar as duas tabelas acima (4.3 e 4.4), pode-se verificar que o preço de uma instalação de armazenagem úmida depende da quantidade de combustível queimado a

ser armazenado. O custo da armazenagem por quilo de CNQ para que se possa comparar o valor é de US\$576 em via úmida e de US\$370 em via seca - cascos.

A Tabela 4.5 indica os valores de armazenagem seca em cascos metálicos realizadas por dois institutos alemães, Rhine-Westfälische Energie (RWE) e Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). Os valores da armazenagem podem ser diferentes até mesmo dentro do próprio país.

Tabela 4.5 - Custo (corrigido para o ano de 2004) estimado de armazenagem para cada quilo de CNQ avaliado pelos institutos Rhine-Westfälische Energie (RWE) e Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), Alemanha
Fonte: adaptado de Fairlie (2000)

	Custo estimado (US\$/kg _{CNQ})	
	RWE	KfK
Transporte para a instalação	33	86 - 105
Armazenagem temporária em cascos metálicos	330	352
Condicionamento e custo dos cascos de transporte	517	330 - 467

Cochran e Tsoulfanidis (1992) apresentaram custos estimados para a armazenagem via seca de CNQ nos Estados Unidos e que podem ser vistos na Tabela 4.6.

Tabela. 4.6 - Comparação entre os custos de armazenagem via seca de CNQ (corrigidos para o ano de 2004)
Fonte: adaptado de Cochran e Tsoulfanidis (1992)

Tipo de armazenagem seca	Custo estimado (US\$/kg _{CNQ})
Casco metálico	74 - 155
Casco multi-propósito	97 - 164
Casco de concreto	60 - 148
Módulo de concreto horizontal	59 - 114
Poços de concreto	101 - 222

De acordo com o Nuclear Threat Initiative (2001), o custo do transporte do CNQ da Ucrânia para Rússia e posterior armazenagem, em 2001, era de US\$350/kg_{CNQ}, enquanto o custo para a armazenagem na instalação de Zaporizhzhya (Ucrânia) de US\$32/kg_{CNQ}, ou seja, quando a Ucrânia parou de enviar o CNQ para a Rússia, economizou cerca de US\$16 milhões para cada 50ton de CNQ enviadas.

Pode-se observar que o preço da armazenagem de CNQ varia muito com o tipo de armazenagem adotado, com a massa de CNQ a ser armazenada ou com o tipo de casco utilizado. Na Tabela 4.7 são apresentados alguns modelos de cascos existentes no mercado mundial, algumas de suas características e seu preço.

Tabela 4.7 – Modelos, características e custos (corrigidos para o ano de 2004) de alguns tipos de cascos para armazenagem via seca de CNQ.

Fonte: adaptado de Fairlie (2000)

Dados	Modelo de casco					
	VSC-24	NUHOMS -24P	TN-24	TN-40	NAC-128	Castor V-21
Fabricante	BNFL	Vectra	Transnuclear		Nuclear Assurance	GNS
País	EUA		Alemanha; Bélgica; Holanda		EUA	Alemanha
Ventilação interna	Sim		Não			
Material do casco	Concreto reforçado com aço		Vaso de pressão de aço		Aço inox; chumbo	Ferro fundido dúctil
Nº Máximo de elementos PWR	24			40	26-31	21-28
Custo unitário (US\$ x10 ³)	330	418	991	770	1.145	880
Custo estimado por kg _{CNQ} (US\$)	38	42	68	44	75	63

4.3.3 Custo das instalações

No levantamento realizado pela SKB (2003), na Suécia, os custos decorrentes de: pesquisa e desenvolvimento (P&D), transporte do CNQ, construção e manutenção de uma instalação de armazenagem temporária centralizada via úmida (CLAB) e a construção e manutenção de uma fábrica de encapsulamento (construção dos cascos), alcançam um montante avaliado em US\$4.018 milhões, até o ano de 2060. Como esta instalação terá capacidade para armazenar 8.000ton de combustível nuclear queimado, o custo da armazenagem para cada quilograma de CNQ será de aproximadamente US\$500.

Para os países que escolheram o reprocessamento, a armazenagem temporária de curto prazo não é tão longa, envolve apenas o tempo necessário para aguardar a vez do início do reprocessamento. Uma armazenagem por muitas décadas, geralmente é necessária quando se entende a deposição direta em repositórios finais, mas os mesmos não estarão disponíveis por mais alguns anos. A armazenagem, portanto, tem um custo extra no ciclo de deposição direta. Os novos reatores estão sendo construídos com piscinas capazes de armazenar o combustível queimado gerado por toda a vida útil do reator, reduzindo ou eliminando o custo extra de armazenagem.

Bunn (2003) informa que o custo da construção das piscinas de armazenagem temporária de curto prazo em La Hague, França, nas quais o CNQ aguarda o reprocessamento custou US\$16 bilhões e a piscina de Thorpe em Sellafield, Inglaterra, custou US\$5,9 bilhões e a operação envolve um custo de US\$560 milhões, de modo que o custo final do reprocessamento chega a US\$1.440/kg_{CNQ}. O custo do reprocessamento já chegou a US\$4.100/kg_{CNQ}, contudo por causa da concorrência, os contratos mais atuais para o reprocessamento caíram para uma faixa de US\$600 a US\$900/kg_{CNQ}.

As despesas para a armazenagem podem variar significativamente. Alguns itens fazem esta diferença, por exemplo: tecnologia escolhida; se o combustível é transportado para instalações centralizadas ou mantido nas instalações do reator; e, se os impostos ou outras despesas devem ser pagos para os governos federais, estaduais ou municipais. Caso o combustível seja armazenado nas instalações do reator, existe um acréscimo modesto nos custos de manutenção do licenciamento pois o mesmo é dividido entre o reator e a instalação de armazenagem. Caso o CNQ seja armazenado em locais mais distantes, os custos serão maiores e deverão ser integralmente contabilizados.

A armazenagem seca em cascos, conforme Bunn et al. (2003), é tida como o melhor sistema de armazenagem existente na atualidade, pois os custos de operação são

menores, visto que após a colocação dos cascos com CNQ no pátio de armazenagem, só deverá ser feita a monitoração dos mesmos.

Os custos operacionais são muito menores para essa armazenagem, desde que não sejam necessários outros cuidados após o carregamento a não ser proporcionar segurança e monitoração, de modo a manter a certificação do NRC para a instalação. Para locais de armazenagem próximos aos reatores em operação, muitos desses custos podem ser agregados aos da operação e, neste caso, o custo líquido é estimado em US\$828.000 anuais (independente da quantidade de combustível armazenado).

Considerando um período de 40 anos, a despesa com armazenagem via seca em cascos, nos Estados Unidos, para 1.000ton de CNQ, está no intervalo de US\$110/kg_{CNQ} a US\$130/kg_{CNQ}.

Para locais independentes, ou locais situados em instalações cujo reator tenha sido fechado, todos os custos da manutenção da licença, incluindo segurança, devem ser atribuídos a instalação de armazenagem de modo que o custo líquido é maior. No caso das instalações onde os reatores foram fechados com todo o CNQ armazenado em via seca, os custos operacionais foram estimados em US\$3,3 a US\$4,4 milhões por ano. Neste caso, o valor seria de US\$219/kg_{CNQ} a US\$275/kg_{CNQ} (para uma instalação que permite comportar 1.000ton) (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Comparativo dos custos de instalações de armazenagem via seca na instalação do reator e em local afastado do reator.

Fonte: Bunn et al. (2003)

Custos	No local do reator	Distante do reator
Construção da instalação (US\$ milhões)	10	10
Aquisição e carregamento dos cascos (US\$ /kg _{CNQ})	70 - 90	70 - 90
Operação (custo anual) (US\$ milhões)	820	3.300 – 4.400
Total que compreende: aquisição, carregamento e operação durante 40 anos (US\$/ kg _{CNQ})	110 - 130	210 - 275

Em alguns casos os custos altos, por quilograma de CNQ, têm sido considerados quando um país tem uma capacidade muito limitada para armazenagem e outro país concorda em aceitar o combustível para armazenagem ou reprocessamento. A Rússia, por exemplo, recentemente, aprovou uma lei permitindo a importação de CNQ

adotando o valor médio de US\$200/kg_{CNQ} como estimativa para custos de armazenagem temporária dentro de uma faixa de valores de US\$100 a 300/kg_{CNQ}.

No futuro os custos de armazenagem tenderão a diminuir por causa da melhora da tecnologia e pelo fato que os reatores deverão ser construídos com espaços internos maiores para armazenagem do combustível nuclear queimado.

5 CENÁRIO NACIONAL

O Brasil possui duas usinas nucleares em funcionamento, Angra 1 e 2, situadas em Angra dos Reis, RJ (Figura 5.1), com capacidade de geração de energia de 657MWe e 1.345MWe, respectivamente. Possui ainda, uma outra usina em fase de construção, atualmente suspensa, Angra 3, com capacidade prevista para 1.312MWe (Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2003).

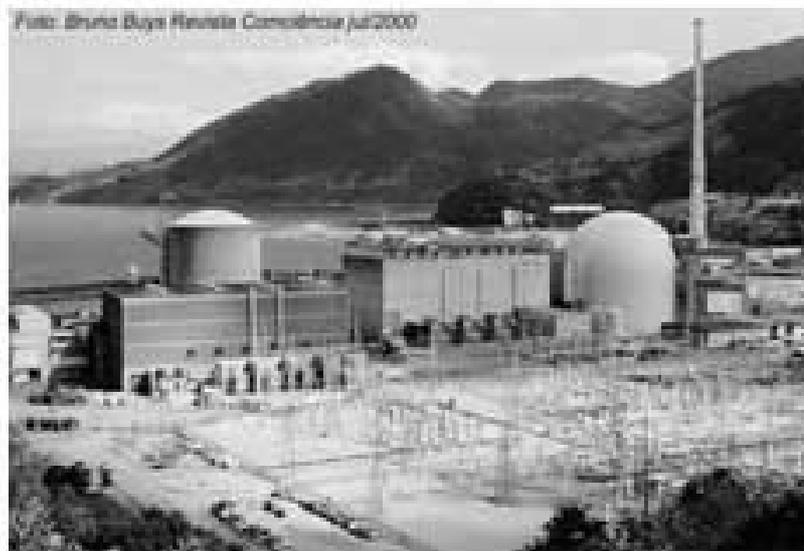


Figura 5.1 - Vista das centrais Angra 1 (esq.) e Angra 2 (dir.), Angra dos Reis, Rio de Janeiro

Fonte: <http://www.energiatomica.hpg.ig.com.br/>

Desde a publicação do Plano Diretor do Meio Ambiente do Setor Elétrico, em 1990, pelo então Ministério da Infraestrutura, questionava-se quanto aos problemas sócio-econômicos da armazenagem dos rejeitos gerados, e que Angra 1 poderia armazenar o combustível gerado por 30 anos, prazo que se acreditava que a política de armazenagem de combustível no Brasil já estivesse definida.

Angra 1 começou a produzir energia, comercializada a partir de 1985, portanto em 2015 estaria com o espaço de armazenagem completo, mas por causa da instalação de *racks* mais compactos, o combustível nuclear queimado gerado nas operações poderá ser armazenado por tempo mais longo. A capacidade máxima dos *racks* passou de 363 elementos combustíveis (153ton de CNQ) para 1.252 (527ton dede CNQ) (Rocha, 1996).

A piscina de armazenagem de combustível queimado está instalada em um prédio externo ao prédio do reator na mesma central.

No caso de Angra 2, o combustível queimado fica dentro da piscina de contenção feita de aço, na área do reator, na qual existem dois tipos de *racks* (CNEN, 2001):

Região 1: *racks* normais com capacidade para 264 elementos combustível (141,5ton de CNQ),

Região 2: *racks* com alta densidade de armazenagem com capacidade para 820 elementos combustíveis (439,5ton de CNQ). Esta capacidade é suficiente para armazenar CNQ durante 15 anos, o que significa que um espaço adicional deverá ser providenciado em médio prazo.

Os requisitos básicos para a armazenagem do combustível queimado estão previstos na norma CNEN-5.02, emitida em 1986.

Angra 3 tem projeto similar ao de Angra 2, por isso, a capacidade das piscinas para armazenagem do CNQ será suficiente para 15 anos.

5.1 Experiência de transporte de cascos com CNQ no Brasil

O IPEN teve uma experiência no transporte de CNQ do reator IEA R-1 para os Estados Unidos.

O reator IEA R1 tem três andares e no terceiro localiza-se a área operacional com acesso ao reator e combustível, sala de controle e piscina de armazenagem do CNQ.¹

A piscina do reator adjacente ao núcleo tem capacidade para 156 elementos combustíveis dispostos da forma seguinte: 3 *racks* fixados nas paredes revestidas de aço inoxidável da piscina (12X2, 12X2 e 18X2 totalizando 84 posições); 2 *racks* de alumínio que podem ser deslocados, 6X4, e ser colocados no fundo da piscina totalizando mais 48 posições e, caso necessário, mais um *rack* de aço inoxidável com 24 posições, somando-se um total de 156. O *rack* de aço inoxidável só é utilizado em último caso; tem inserido um suporte interno (cesto de alumínio) para evitar a corrosão galvânica do combustível, cujo revestimento é de alumínio, também.

Em 28 de abril de 2004, estavam armazenados 31 elementos combustíveis queimados. Este CNQ está sendo armazenado desde 1999. Antes de 1999, a piscina ficou praticamente cheia e o CNQ era de origem norte-americana, porém havendo um acordo

¹ Informações obtidas durante a visita realizada ao reator nuclear IEA R1, monitorada pelo Dr Roberto Franjdlich do IPEN, em 28/04/2004 (Comunicação pessoal)

entre Brasil e Estados Unidos para a sua devolução ao país de origem, o CNQ foi transportado para os EUA.

Foram desenvolvidos cascos de transporte na Alemanha, pela empresa GNS, com capacidade para 31 elementos (Figura 5.2). Todo o ônus da fabricação dos cascos para o transporte desse CNQ enviado, foi pago pelo governo dos Estados Unidos.

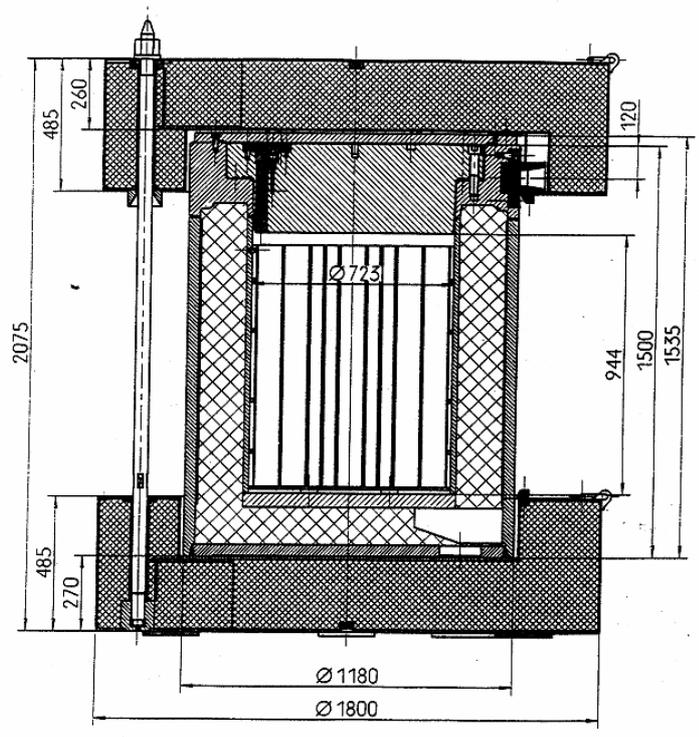


Figura 5.2 – Casco GNS para o transporte do CNQ utilizado pelo IPEN para os Estados Unidos (dimensões em milímetros)
Fonte: IPEN (2004)

Os elementos foram retirados da piscina por meio de um dispositivo como mostra a Figura 5.3 e colocado no casco de transporte que não pode ser colocado dentro da piscina para que a transferência fosse feita em submersão. Inclusive, o casco de transporte não foi levado até o andar da piscina, pois a ponte rolante existente no reator tinha capacidade apenas para 10ton e o casco tinha uma massa de 13ton. A retirada do CNQ da piscina foi por intermédio da inserção do dispositivo dentro da piscina, manuseando-se o CNQ para dentro deste dispositivo. Após a inserção do CNQ no dispositivo a tampa inferior do mesmo foi fechada. A talha retirou o dispositivo da piscina conduzindo-o ao andar inferior onde, mediante uma luva giratória para posicionar o CNQ, e finalmente o CNQ era armazenado no casco de transporte. Ao redor da luva foi colocado um protetor preenchido com água para servir de blindagem contra a radiação.

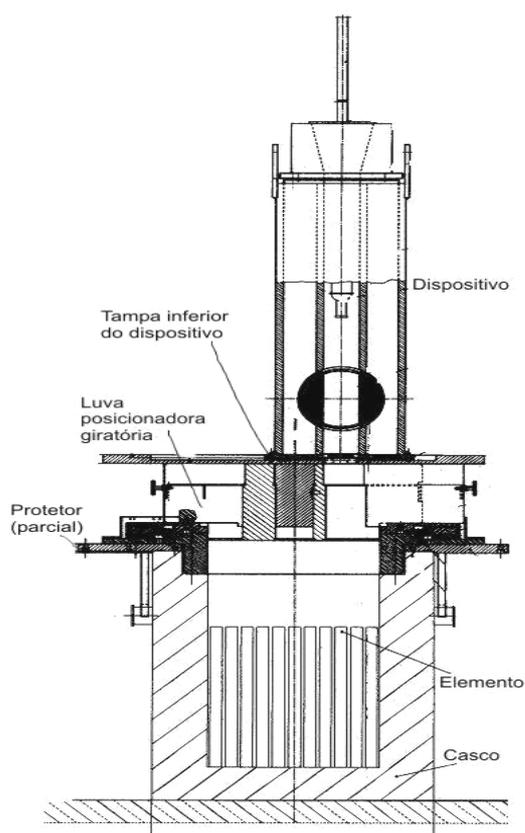


Figura 5.3 – Dispositivo de transferência do CNQ sobre o casco de transporte do IPEN, São Paulo, para os Estados Unidos
Fonte: IPEN (2004)

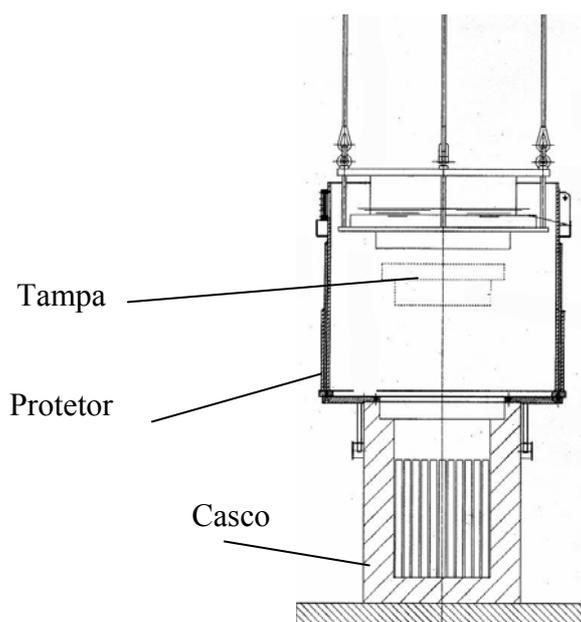


Figura 5.4 - Colocação da tampa no casco de transporte de CNQ
Fonte: IPEN (2004)

Com o abaixamento do dispositivo até a luva, abria-se a tampa inferior e o CNQ era introduzido no casco. O dispositivo era retirado e retornava à piscina para pegar outro elemento combustível queimado. Quando o casco já estava totalmente completo, a luva era retirada, colocada a tampa no casco (Figura 5.4) e a posterior vedação da tampa.

Após a colocação da tampa, a água de proteção e o protetor foram retirados do casco, que foi lacrado após a realização dos testes de estanqueidade.

Os quatro cascos preenchidos com CNQ foram colocados nos containeres de transporte, embarcados em caminhões e transportados até o porto de Santos, São Paulo, de onde seguiram em navios para os Estados Unidos.

5.2 Perspectivas futuras

O tema referente à armazenagem de CNQ proveniente das centrais nucleares de geração de eletricidade envolve um planejamento em longo prazo. Embora a política nuclear de geração energética no Brasil não esteja totalmente definida para os próximos trinta anos, a análise sobre as previsões da demanda são importantes para criação de leis e alocação de verbas no orçamento ligadas a área nuclear.

A produção de combustível nuclear no Brasil com tecnologia nacional de enriquecimento de urânio, em centrífugas, permitirá que as centrais elétricas futuras possam ser abastecidas com combustível totalmente nacional. Depois que a capacidade de geração de energia elétrica deste combustível tenha se exaurido no reator, isto é após a queima, o mesmo deverá ser armazenado seja para seguir a via de reprocessamento como para aguardar a deposição final.

Os tópicos seguintes mostram, em linhas gerais, alguns dados importantes que permitem fazer previsões quanto o destino futuro do CNQ nacional e a necessidade de existirem no Brasil parques de armazenagem para este combustível.

5.2.1 Aumento populacional no Brasil

Desde 1980 a população do Brasil vinha crescendo a uma taxa de anual de 1,7% e, no ano de 2000, era de aproximadamente 170 milhões de habitantes conforme dados da IAEA (2003a). Esta mesma agência cita que a previsão de crescimento populacional até 2010 será de 10,9%, elevando a quantidade de habitantes para aproximadamente 188 milhões. Extrapolando estes dados e considerando uma taxa média fixa, entre 2011 e 2030, de 10% por década, em 2020, a população será de 207 milhões de habitantes, e, em 2030, de 228 milhões de habitantes (Figura 5.5). Conseqüentemente, com

este aumento populacional, ocorrerá, obviamente, o aumento na demanda de energia elétrica no país.

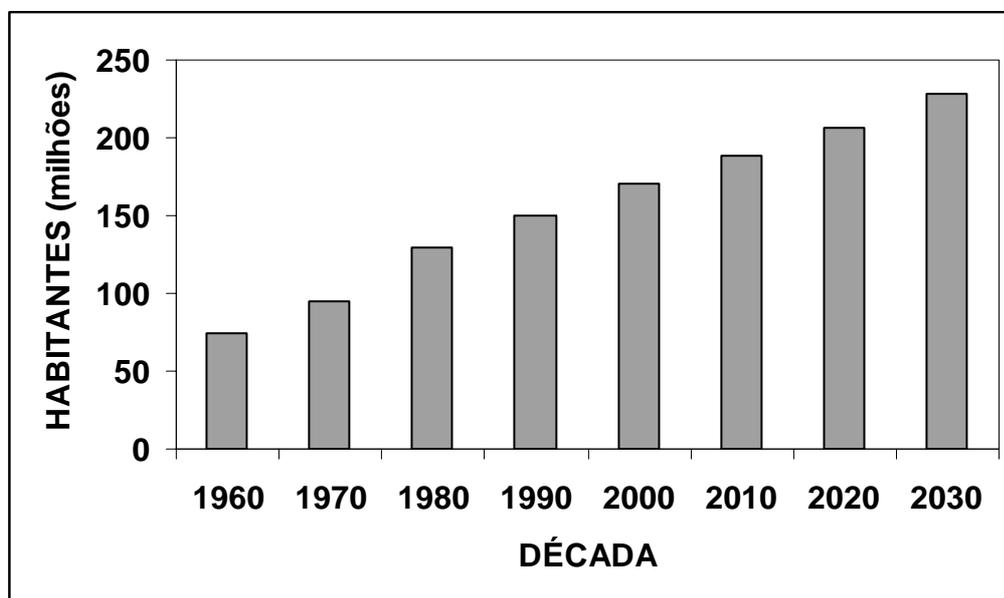


Figura 5.5 - Crescimento da população brasileira entre 1960 e 2030
Fonte: Energia Brasil (2004)

5.2.2 Aumento da demanda de energia elétrica e a construção de novas usinas nucleares

Hoje em dia, o aumento da disponibilidade de energia elétrica advinda do setor nuclear não está nos planos do governo, conforme cita a Eletrobrás (2004).

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas, PROINFA, tem como objetivo a diversificação da matriz energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis, a partir do aumento da participação da energia elétrica produzida com base naquelas fontes.

O programa do PROINFA promoverá a implantação de 3.300MWe de capacidade em instalações de produção de eletricidade originadas de fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e de usinas de transformação de biomassa, com início de funcionamento previsto até 30 de dezembro de 2006. A instituição Centrais Elétricas Brasileiras S.A – Eletrobrás assegurou a compra de energia que será produzida por esses meios por um período de 20 anos, de todos os empreendedores que preencherem, na íntegra, os requisitos de habilitação.

De acordo com a IAEA (2003b), em suas previsões para a América Latina para os próximos 30 anos, o consumo energético por habitante aumentaria conforme é mostrado na Tabela 5.1

Tabela 5.1 – Consumo energético por habitante na América Latina

Fonte: IAEA 2003b

Ano	Consumo energético (MW.h/habitante)
2002	1,9
2010	2,0 - 2,4
2020	2,5 - 3,5
2030	3,1 - 5,3

Os recursos hídricos, que são a principal fonte de energia elétrica do Brasil, estão se esgotando em torno dos grandes centros consumidores e o licenciamento ambiental, para a construção de novas hidrelétricas, está cada vez mais difícil. Reside aí a importância das usinas nucleares na matriz energética nacional, ainda mais, ao se considerar que o Brasil dispõe da sexta maior reserva mundial de urânio.

São de origem nuclear os 16% de toda a energia elétrica produzida hoje em dia no mundo, conforme Energia Brasil (2004). As duas usinas nucleares no Brasil, Angra 1 e Angra 2, produzem energia que corresponde a apenas 1,8% do total gerado pelo sistema elétrico.

A Tabela 5.2 mostra a oferta de energia elétrica no Brasil (Energia Brasil, 2004a). A importação de energia já chega a 6.650MWe e a previsão de importação em 2004 é de 9.638MWe. Desconsiderando a importação de Itaipu, em 2001, a importação foi de 1.150MWe e a previsão para 2004 é de 3.438MWe.

Tabela 5.2 - Evolução da potência instalada no Brasil

Fonte: Energia Brasil (2004)

Tipo de Geração	Potência instalada em 2001		Previsão de potência instalada para 2004	
	(MWe)	(%)	(MWe)	(%)
Usina Hidrelétrica	61.555	82%	69.448	67%
Usina Termelétrica	6.944	9%	17.024	47%
Usina Nuclear	1.966	3%	1.966	2%
Fontes alternativas (Eólica, PCH, Biomassa)	2.345	3%	5.645	5%
Subtotal	72.810	92%	94.083	91%
Importação de Itaipu	5.500	7%	6.200	6%
Demais Importações	1.150	1%	3.438	3%
Total	79.460	100%	103.721	100%

Se a usina nuclear Angra 3 estivesse pronta, gerando 1300MWe, o Brasil não precisaria ter importado energia elétrica em 2001, e para 2004, apenas Angra 3 não supriria a demanda, e ainda seriam necessários mais 2.100MWe para inteirar a previsão de consumo de energia elétrica no país. Seriam necessários, portanto, mais dois reatores similares a Angra 2.

A Tabela 5.3 mostra uma extrapolação dos valores analisados anteriormente na Tabela 5.2, para os anos de 2010, 2020 e 2030. Conforme a Tabela 5.3, para o ano 2010, seria necessário importar 3.750MWe. Em 2020, Angra 1 estaria, provavelmente descomissionada, e não produziria mais energia elétrica, e como consequência a importação seria de 8.200MWe. Da mesma forma em 2030, o descomissionamento de Angra 2 provocaria a importação de 13.000MWe, equivalente ao funcionamento de 12 reatores similares a Angra 2.

Observando os dados analisados, conclui-se que, além da necessidade de construção de Angra 3, seria necessário construir, até 2030, mais 10 reatores equivalentes, além de aumentar a vida útil de Angra 1 e 2, naturalmente se o restante da demanda energética for suprida pela geração de energia em hidrelétricas, termelétricas e por outras fontes alternativas.

Tabela 5.3 - Demanda prevista para 2001 e 2004 de energia elétrica para o consumo brasileiro, extrapolada para os anos de 2010, 2020 e 2030

Tipo de Geração	Ano				
	2001	2004	2010	2020	2030
Potência (MWe)					
Usina Hidrelétrica	61.555	69.448	82.000	100.000	120.000
Usina Termelétrica	6.944	17.024	27.734	45.150	77.500
Usina Nuclear	1.966	1.966	1.966	1.300	-
Fontes alternativas	2.345	5.645	6.800	17.350	30.000
SubTotal	72.810	94.083	113.750	163.800	227.500
Importação de Itaipu	5.500	6.200	7.500	8.000	9.000
Outras importações	1.150	3.438	3.750	8.200	13.500
Total	79.460	103.721	125.000	180.000	250.000

Obs: Em 2020, Angra 1 estaria descomissionada e Angra 2 em 2030, se não houver extensão da vida útil destas centrais nucleares brasileiras.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (2004), ANEEL, prevê que para o ano de 2008, a geração de energia elétrica pode ultrapassar 100.000MWe, corroborando com as informações contidas na Tabela 5.3. A ANEEL prevê para o futuro, ainda, algumas alterações na estrutura dos investimentos em energia, incluindo a instalação de centrais termelétricas movidas a gás natural, pois exigem prazos de implementação e investimentos menores que as hidrelétricas. Por outro lado, deverão ser ampliadas as importações de energia da Argentina, Venezuela e Bolívia.

O Ministério de Minas e Energia (2002), considerou dois cenários como referência no estabelecimento da oferta atual de energia elétrica. Foi verificado apenas o caso da oferta no qual a energia elétrica é gerada pelas usinas “existentes” (seja em operação, motorização, construção, como aguardando outorga), mais as usinas futuras que estariam em funcionamento nas épocas em que se tornar necessário equilibrar a oferta e a demanda de energia, pois o outro caso prevê, ainda, importações de energia elétrica.

Quanto ao mercado, o Ministério considera três situações de crescimento de mercado: baixo (taxa de crescimento anual média de 3,2%), normal ou de referência (taxa

de crescimento anual média de 5,1%) e alto (taxa de crescimento anual média de 6,0%)

Considerando o cenário e os mercados: baixo; referência; e, alto, ao longo do período decenal, será necessária uma expansão de potência instalada de 17.694MW, 37.846MW e 48.579MW, respectivamente. Portanto, se não houver um aumento na capacidade de geração de energia elétrica, não importando qual o cenário para 2013, haverá falta de energia.

A previsão feita na Tabela 5.3 corrobora com as informações do Ministério de Minas e Energia.

5.2.3 Quantidade de CNQ gerado no Brasil nos próximos 30 anos – planificação e demanda de energia

No IPEN, existem hoje 31 elementos combustíveis queimados MTR armazenados na piscina do reator, portanto, se fosse utilizada armazenagem via seca em cascos, seria necessário um casco GNS e um galpão de armazenagem com piso de concreto. Com o passar do tempo, se o reator funcionar com a potência atual, a cada ano poderão ser gerados mais 15 elementos combustíveis queimados, ou seja, após o resfriamento na piscina, para a armazenagem a seco será necessário um casco a cada 2 anos.

Como o reator do IPEN, cuja vida útil está prevista para 50 anos, o IEA-R1 funcionará, no mínimo, até o ano 2015, portanto, seriam necessários seis cascos. A instalação de armazenagem, caso não seja licenciada por mais alguns anos, após o descomissionamento do reator teria sete ou oito cascos, somando-se aos rejeitos de atividade alta provenientes do descomissionamento, que também poderiam ser armazenados em cascos o que totalizaria 10 cascos.

Em Angra 1 e 2, as piscinas atendem apenas a capacidade de armazenagem necessária; Angra 1 tem um prédio anexo ao reator onde existe espaço para armazenagem do CNQ por mais 20 anos. Angra 2, apesar de utilizar *racks* de quantidade alta de varetas, tem a piscina instalada dentro do prédio do reator, por isso até 2015 é necessária uma instalação temporária de armazenagem para atender a demanda de geração de CNQ do reator.

Analisando-se o *status quo* futuro, se for feita a construção de Angra 3 até 2012, será necessário que a instalação acomode não só o CNQ gerado em Angra 2, mas também tenha espaço para o de Angra 3 e de Angra 1. Justifica-se porque além da armazenagem via úmida provocar maior corrosão nos elementos combustíveis, quando

ocorrer o descomissionamento de Angra 1, todo o CNQ armazenado deverá ser enviado para a instalação de armazenagem.

Para os próximos 30 anos, o panorama mundial mostra que a quantidade de usinas construídas será maior, ocorrerá o descomissionamento das mais antigas e o aumento populacional demandará um consumo de energia elétrica mais elevado. Tal fato está baseando em:

- Novos projetos de construção de centrais nucleares tais como na China, Japão, Coréia, Índia;
- Possibilidade de aumento da vida útil das centrais nucleares nos EUA e até a hipótese da construção de novas usinas nucleares naquele país;
- Revisão da validade das usinas nucleares, pois outras fontes de energia alternativas acabam saindo mais caro que a opção nuclear, como mostra a Alemanha.

O Brasil também não deverá ficar atrás, numa previsão otimista de crescimento, com o aumento da demanda de energia, poderão ser construídas ao menos mais duas centrais nucleares. Uma delas na região Nordeste do país, para atender a demanda de eletricidade para a indústria que vem se instalando cada vez mais naquela região e o aumento do turismo que eleva a demanda energética. Outra região potencial no território nacional para receber uma usina nuclear é a Centro-Oeste, entre os estados de Goiás e Tocantins, que está se tornando o novo pólo agro-industrial do país, podendo abastecer, inclusive, a Capital Federal.

Por causa das grandes distâncias entre os reatores existentes e os novos, uma instalação de armazenagem de combustível queimado centralizada seria inviável por causa das dificuldades de transporte, portanto, cada central nuclear deveria possuir um local para uma instalação de armazenagem antes que o destino do CNQ seja definido pelas autoridades brasileiras.

6 DISCUSSÃO - PROPOSTA DE UMA INSTALAÇÃO DE ARMAZENAGEM TEMPORÁRIA DE COMBUSTÍVEL QUEIMADO NO BRASIL

6.1 Introdução

Atualmente, existem cinco locais que podem gerar combustível queimado no Brasil; quatro são reatores de pesquisa situados nas cidades de São Paulo, SP (reatores do IPEN IEA-R1 e MB-1), Rio de Janeiro, RJ (reator Argonauta do IEN) e Belo Horizonte, MG (reator Triga do CTDN) e o quinto é um conjunto de dois reatores PWR de potência, situados em Angra do Reis, RJ, (Angra 1 e 2). A Figura 6.1 mostra um mapa da região onde estão localizados os reatores nucleares no Brasil.

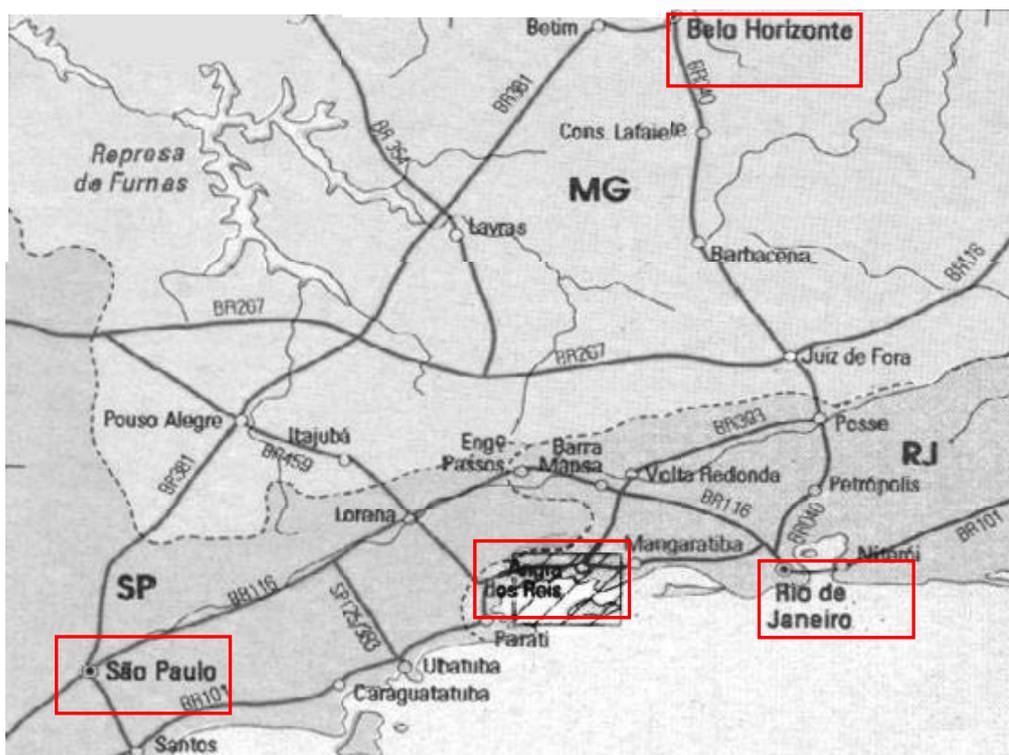


Figura 6.1 - Localização das cidades brasileiras que possuem reatores nucleares

Fonte: www.angra2reis.com.br

Todo este estudo foi realizado em função dos reatores de potência.

Nos reatores Angra 1 e Angra 2 os elementos combustíveis queimados têm um perfil semelhante aos dos elementos combustíveis existentes nos reatores de pesquisa. É

preciso salientar, no entanto, que os combustíveis dos reatores de pesquisa e dos reatores de potência não podem ficar, dentro de uma mesma piscina de armazenagem em virtude da diferença de enriquecimento de urânio nos combustíveis, o que pode ocasionar uma situação de criticalidade. Podem ficar juntos apenas dentro de cascos protetores especialmente desenvolvidos.

6.2 Opção de uma instalação de armazenagem de CNQ para o Brasil

Conforme Ryhänen (2000) a seleção das áreas para as instalações nucleares como local de condicionamento de rejeitos radioativos e armazenagem temporária tem como fatores o planejamento, distâncias curtas de transporte e infra-estrutura. Outro fator importante é a aceitação pública, que em muitos países, pode ou não, favorecer a demarcação dessas áreas para esta finalidade.

No Brasil, a Lei Federal 10.308, aprovada em 2001, estabelece que os depósitos, intermediários serão construídos, licenciados, administrados e operados segundo critérios, procedimentos e normas estabelecidos pela CNEN.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear, por ser um órgão federal superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, estabeleceu normas e regulamentos em radioproteção e licenciamento, fiscalização e controle da atividade nuclear no Brasil. A norma CNEN 6.05 (1985a) estabelece critérios para a gerência de rejeitos radioativos na instalação radiativa, classificando os rejeitos de acordo com sua atividade ou nível de radiação, de modo que o combustível queimado é classificado como de material radioativo de atividade alta. A norma trata da segregação, recipientes de acondicionamento, transporte, armazenagem temporária, tratamento, eliminação e transferência do rejeito. Para qualquer rejeito, o local de armazenagem temporária deve ser monitorado, estar distante da área de trabalho classificada como livre, a proteção física do prédio deve permitir classificar o exterior do prédio como área livre, prover a segurança contra a ação de eventos naturais, possuir planos de proteção física, de radioproteção e de emergência, entre outros.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (1985b), na norma CNEN-NE-6.06, considerou vários fatores para a escolha do local para construção de um depósito intermediário para rejeitos com níveis de radiação baixos e médios. Entre os critérios mínimos para este depósito está, além da localização preferencialmente em terras públicas, identificar as regiões de interesse em varias escalas de detalhes. Cada local deve ser claramente descrito quanto aos fatores ecológicos, sócio-econômicos, geológicos e

fisiográficos e estudos detalhados para cada um deles. O documento não engloba os rejeitos de atividade alta, portanto a escolha de um local para armazenagem temporária de CNQ não pode ser considerado regulamentada, embora se possa utilizar o mesmo documento como exemplo para fazer a escolha.

De todas as informações descritas anteriormente, a opção sugerida de escolha para a armazenagem temporária no Brasil foi a de cascos multi-propósito.

Os motivos para esta escolha foram os seguintes:

a) Colocação dos elementos combustíveis queimados dentro do casco, que após o fechamento, não será mais aberto. Este casco poderá permanecer em algum local determinado do prédio do reator (local onde se encontra a piscina de resfriamento) e poderá ser movimentado de acordo com os planos internos de distribuição dos cascos.

b) Caso se defina o destino final para o combustível queimado, o casco poderá ser transportado para outro local sem que seja necessário transferir os elementos combustíveis para um outro invólucro de transporte. No outro local poderá permanecer novamente armazenado ou seguir outro destino escolhido.

A tendência atual no mundo, para armazenagem temporária de CNQ, é a construção de instalações centralizadas, de grande porte, de modo que todo o combustível gerado no país seria administrado neste local. Verifica-se, no entanto, que esta tendência é adotada pelos países que têm pequena extensão territorial. Países como os Estados Unidos e Alemanha, estão construindo instalações regionalizadas.

Pode-se observar na Figura 6.1, a existência de rodovias federais de acesso às cidades que possuem os reatores nucleares, mas seu estado de conservação não é dos melhores. Um veículo que transporte um casco com 60 toneladas pode apresentar muitos problemas em qualquer uma das estradas federais existentes no país no momento.

Nas Figuras 6.2 e 6.3 pode ser observada a malha ferroviária nacional na região dos reatores nucleares de pesquisa e de geração de potência.

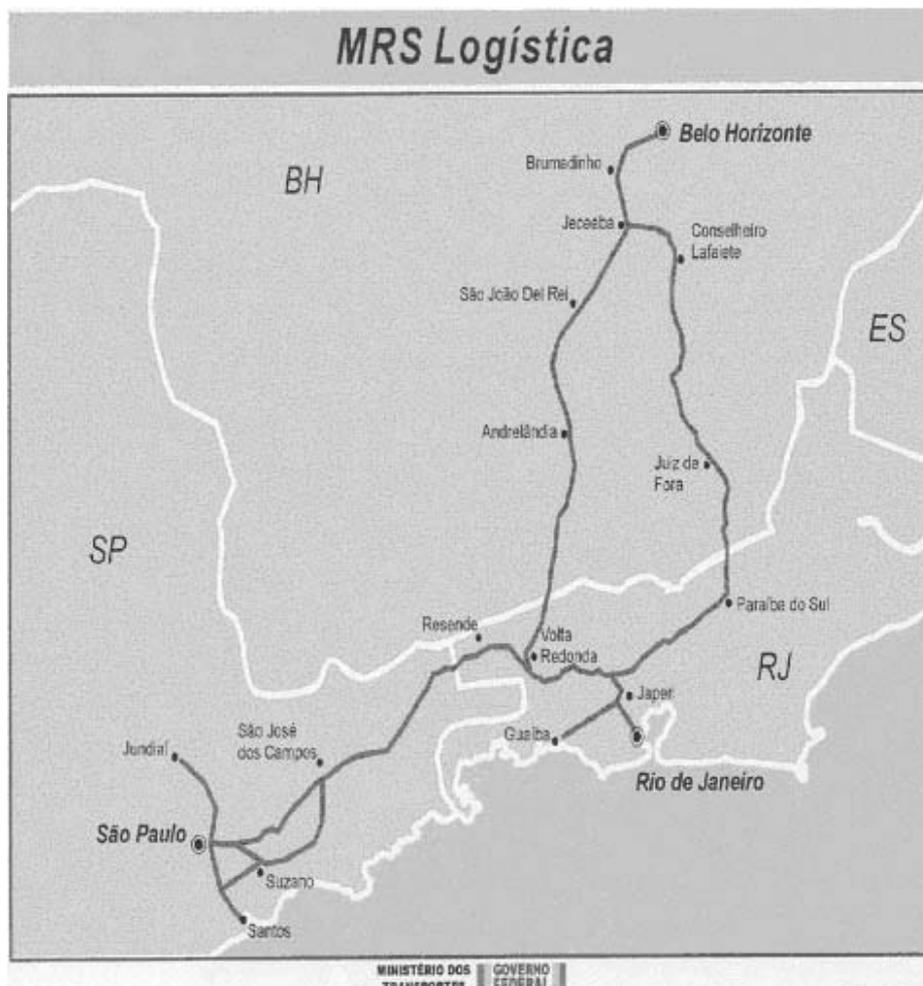


Figura 6.2 - Ferrovias da região em que se encontram os reatores nucleares brasileiros (malha operada pela MRS Logística)

Fonte: Ministério dos Transportes (2004)

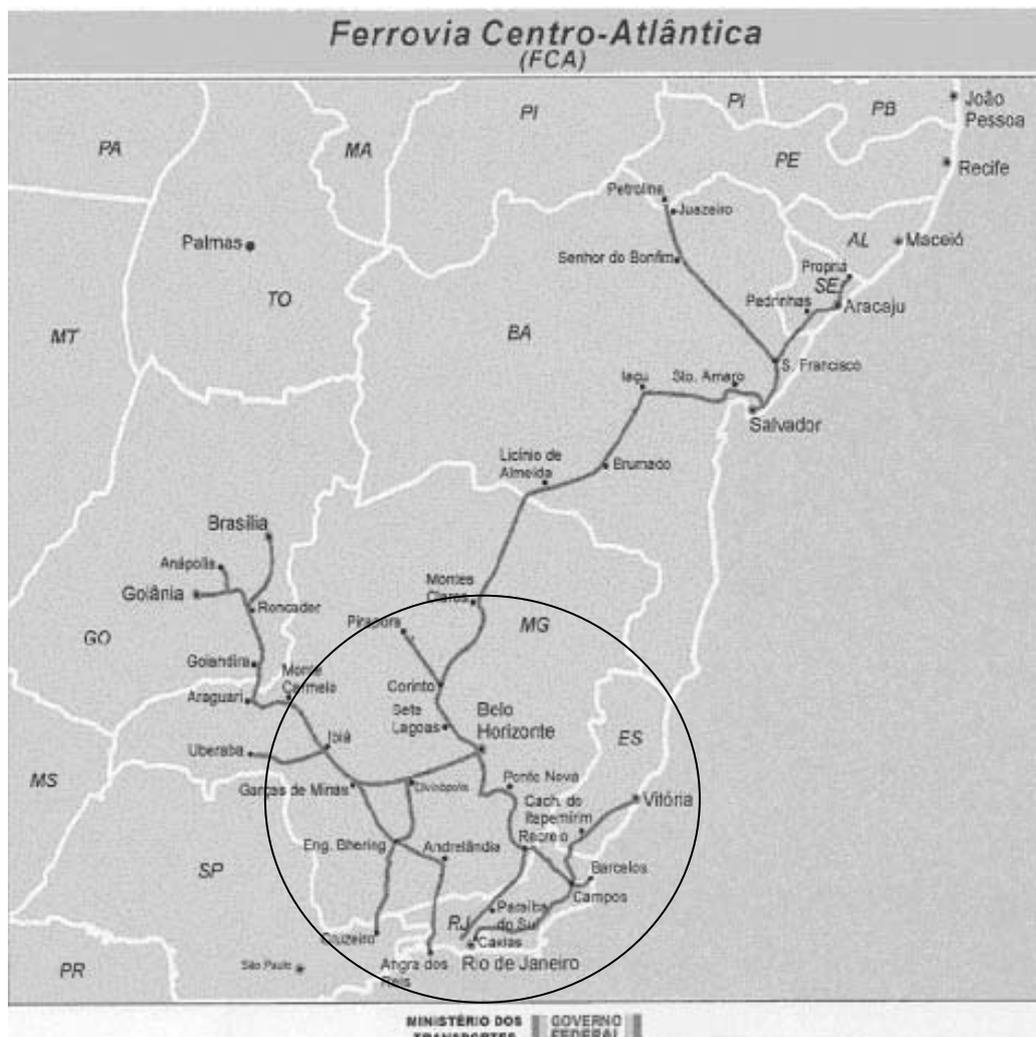


Figura 6.3 - Ferrovias da região em que se encontram os reatores nucleares brasileiros (malha operada pela FCA Ferrovia Centro Atlântica)

Fonte: Ministério dos Transportes (2004)

A malha ferroviária existente no Brasil é pequena e sub-utilizada. A logística de transporte do local de geração do CNQ para a estação ferroviária, transferência e transporte para o local próximo a uma instalação centralizada resultaria em perda de tempo muito grande e o CNQ ficaria mais tempo exposto.

c) O transporte de longa distância só será necessário se for decidido que o Brasil terá um local centralizado de armazenagem de CNQ. Caso contrário cada reator manterá uma área na própria instalação para a armazenagem do CNQ.

O CNQ poderá ser armazenado na própria instalação, ou seja, em Angra dos Reis (Angra 1 e 2), Rio de Janeiro (IEN), Belo Horizonte (CTDN), e São Paulo (IPEN, IEA R-1 e MB-1).

O reator Triga IPR-R1 do CDTN opera, desde 1960, com os elementos combustíveis originais, e até o momento não gerou combustível nuclear queimado. Quando isto ocorrer o CDTN conta com 12 poços de água para a estocagem do CNQ^[2]. O reator MB1 também opera com os mesmos elementos utilizados desde o início das operações (este conta com poços secos para armazenagem do combustível, pois a potência do reator é muito pequena e os poços são para blindar apenas a pequena radiação gerada; a quantidade de calor de decaimento é muito pequena e não é necessário usar água para refrigeração). Para Angra e para o IPEN, que queimam mais combustíveis, é necessária uma instalação que permita uma armazenagem de CNQ alternativa às piscinas e uma solução é a armazenagem via seca.

Neste escopo são apresentadas duas propostas de armazenagem para o combustível queimado que servem tanto para as usinas de potência como para os reatores de pesquisa. Uma, em cascos metálicos ou de concreto em recinto fechado e outra, em cascos metálicos ou de concreto, ambos mantidos em local a céu aberto. O recinto fechado permitirá evitar a exposição para o público e possível pré-julgamento a respeito da periculosidade deste tipo de instalação.

As Figuras 6.4 a 6.6 mostram as propostas de uma instalação de armazenagem. Atualmente, para o Brasil, o melhor local para armazenagem é na própria instalação de origem do CNQ.

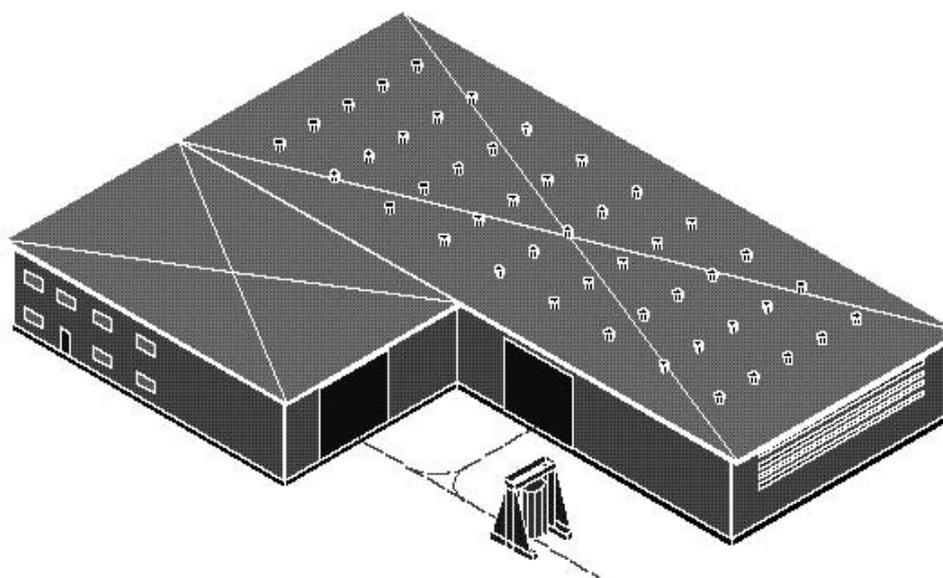


Figura 6.4 - Proposta de prédio para a armazenagem de CNQ em recinto fechado

² Comunicação pessoal recebida por e-mail de Amir Zacarias Mesquita do CDTN em 14 abr. 2004

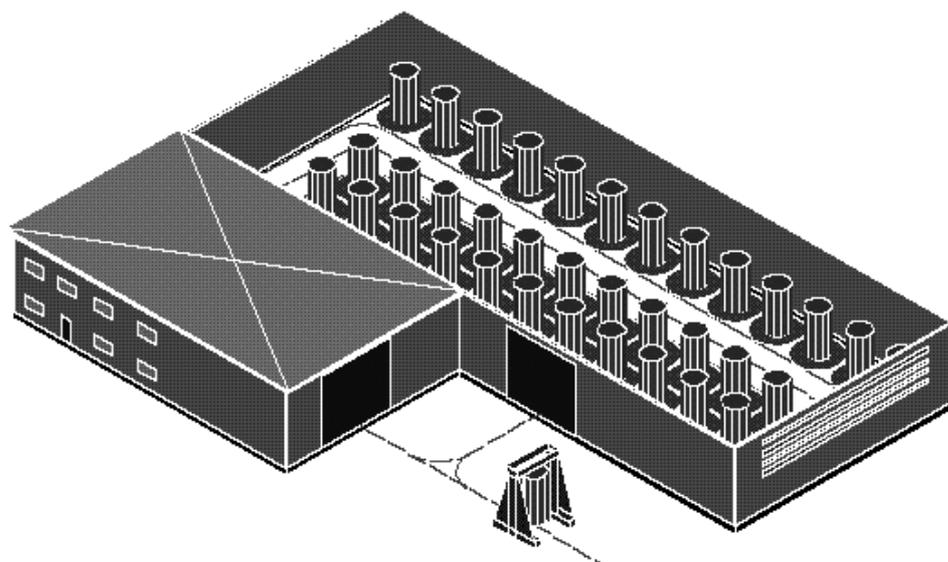


Figura 6.5 - Detalhe do local de armazenagem dos cascos metálicos com CNQ.

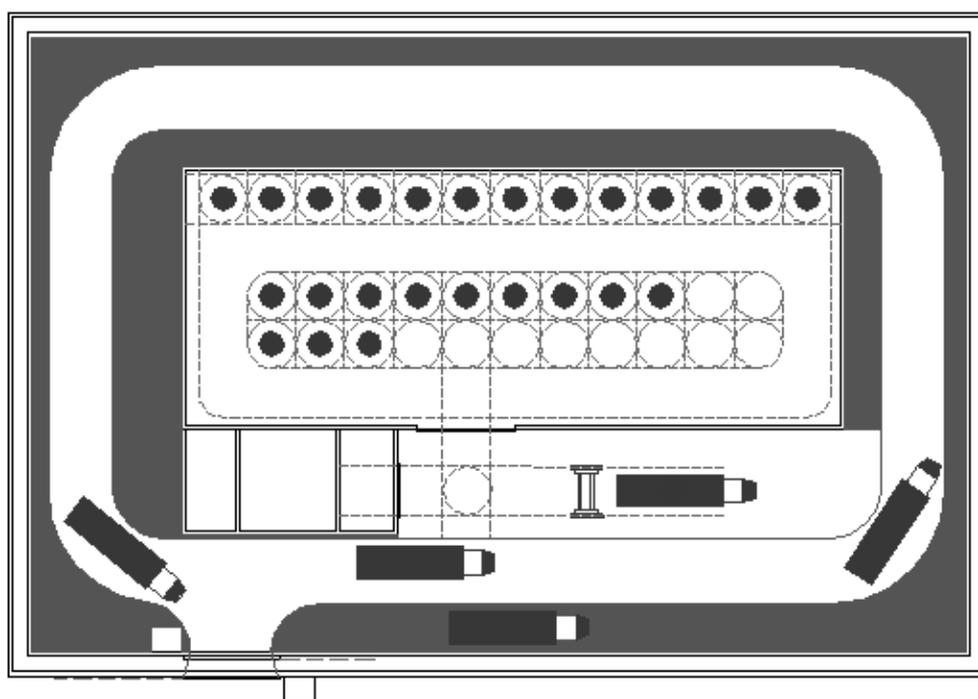


Figura 6.6- Planta de uma instalação de armazenagem para cascos de concreto em área aberta.

Os motivos principais para a instalação de armazenagem no local do reator são:

a) Quem gera o CNQ terá condições mais seguras de gerenciar a armazenagem se tiver uma área disponível próxima ao reator.

b) Nas condições atuais o transporte seguro do CNQ para fora da instituição do reator pode ser temeroso, pois no Brasil a falta de uma rede ferroviária ou de uma malha rodoviária com pavimento adequado que não ocasione acidentes de percurso é outro item limitante.

6.3 Licenciamento da instalação

Como uma instalação de armazenagem temporária é um depósito que abrigará o CNQ por muitos anos (existem instalações licenciadas para 50 anos, podendo chegar a 100 anos), a norma CNEN-NE-1.04, de 1984, considera-a como instalação nuclear. O licenciamento deve ser feito conforme está solicitado nesta norma.

O processo de licenciamento da instalação envolve os atos seguintes:

- a) Aprovação do local;
- b) Licença de construção;
- c) Autorização para utilização de material nuclear;
- d) Autorização para operação inicial;
- e) Autorização para operação permanente.

6.3.1 Aprovação do local

Deverá ser emitido o Relatório de Local de acordo com o roteiro descrito na norma em questão. No caso da instalação de armazenagem se localizar na mesma instalação do reator, muitas das informações desse relatório já estão aprovadas, facilitando sua confecção.

6.3.2 Licença de construção

A construção da instalação só pode ser iniciada após a concessão por parte da CNEN da devida licença e após ter o Relatório de Local aprovado. Nesta fase deverá ser emitido o Relatório Preliminar de Análise de Segurança no qual serão descritas: características do projeto, análise preliminar, avaliação e desempenho da instalação, planos preliminares de treinamento de pessoal, programa de garantia da qualidade, identificação dos riscos potenciais para o funcionamento, planos preliminares de emergência e o plano preliminar de proteção contra incêndio.

6.3.3 Autorização para utilização de material nuclear

A instalação de armazenagem não receberá materiais nucleares e sim os cascos contendo o material nuclear queimado confinado. Numa instalação nuclear é previsto o processamento do material nuclear, daí a necessidade dessa autorização. No caso de uma instalação de armazenagem provisória este item não é aplicável.

6.3.4 Autorização para operação

A autorização é requerida em duas etapas, a primeira é para operação inicial e a segunda para operação permanente.

Para a primeira é necessário que já esteja pronto o Relatório Final de Análise de Segurança no qual serão descritas: características de projeto e de processo; análise de segurança de toda a instalação; avaliação e desempenho da instalação; planos de treinamento de pessoal; programa de garantia da qualidade; programas de testes pré-operacionais e operação inicial, programas de manutenção; monitoração e ensaios periódicos; identificação dos riscos potenciais para funcionamento; especificações de técnicas propostas; descrição dos planos de emergência e plano de proteção contra incêndio; e, o Plano Final de Proteção Física.

Para receber a segunda autorização devem ser incluídos, além dos itens expostos: o prazo de operação da instalação e dados complementares que não tenham sido incluídos anteriormente.

6.3.5 Inspeções e teste

A CNEN realizará inspeções e auditorias nas instalações licenciadas, utilizando para isso pessoal devidamente credenciado, a fim de comprovar a eficácia e o fiel cumprimento do proposto pela instalação.

7 CONCLUSÕES

Apesar da geração de energia elétrica, em centrais nucleares, estar bastante difundida pelo mundo, todo país detentor dessa tecnologia encontra algum tipo de problema com relação à armazenagem do CNQ.

A complexidade com relação à gerência do CNQ advém de sua retirada do reator, manutenção nas piscinas de resfriamento, armazenagem temporária de curto prazo antes de um reprocessamento ou armazenagem temporária de longo prazo antes do envio para um repositório, até mesmo qual tipo de armazenagem seca ou úmida que será utilizada.

Pode-se verificar que as vantagens da armazenagem seca com relação à úmida compreendem:

- a) o combustível queimado não fica submetido à corrosão por água;
- b) a construção da instalação, no caso dos silos horizontais e verticais, pode ser planejada e realizada à medida que seja necessário;
- c) Para uma instalação de armazenagem em que sejam usados cascos metálicos ou de concreto, os cascos podem ser adquiridos de acordo com a quantidade de combustível a ser armazenado;
- d) os custos de armazenagem, vigilância, inspeção e monitoração radiológica são bem menores;
- e) existe uma facilidade maior de inspeção geral da instalação, embora o CNQ não é mais inspecionado após ter sido colocado no casco; e,
- f) a recuperação do combustível é mais simples, para um eventual transporte futuro.

Hoje, muitos países abandonaram a idéia inicial de reprocessamento do CNQ, pois o valor envolvido no processo é muito alto, mas ainda alguns o realizam, outros se decidiram pela deposição final em um repositório geológico, apesar de não haver nenhum operante até o momento e outros, ainda esperam para ver o que pode acontecer.

O Brasil se encontra no impasse do que fazer com o CNQ, reprocessamento ou deposição, por isso o governo deverá decidir, em futuro próximo qual será a melhor solução. De qualquer forma, o CNQ deverá ser armazenado de forma segura e econômica.

Após a análise do panorama mundial e experiência alcançada em outros países, as principais conclusões neste trabalho são:

1) A melhor opção para a armazenagem de CNQ é em via seca que é mais econômica que a via úmida;

2) Nas instalações secas, os cascos e módulos são mais baratos que os poços de convecção;

3) Os cascos permitem ter maior mobilidade que os módulos, e podem ser transportados a qualquer momento para uma outra instalação seja para reprocessamento ou deposição;

4) Entre os cascos, em média, os de concreto são mais baratos que os metálicos, conforme comparação de custos de cascos fabricados pelo mundo;

5) Atualmente, no Brasil, uma instalação de armazenagem centralizada é inviável, em razão das condições das estradas de rodagem e ferrovias. No futuro, caso sejam construídas novas centrais nucleares, a inviabilidade continuaria pelo motivo acima e pela provável distância existente entre elas.

6) A instalação de armazenagem construída no mesmo local da central ou do reator, economizaria transporte, custos e tempo de licenciamento.

7) Para maior economia e independência do mercado externo, o Brasil precisa ter fornecedores nacionais de cascos de armazenagem.

8) A melhor proposta na atualidade para a armazenagem de CNQ no Brasil é em instalação via seca com cascos metálicos ou de concreto, depositados na própria instalação do reator de origem.

ANEXO 1

Tabela A1 - RADIONUCLÍDEOS PRINCIPAIS EXISTENTES NO COMBUSTÍVEL DE UM REATOR TIPO PWR DE 1000MW APÓS A ESTOCAGEM EM PISCINA POR CINCO MESES

RADIONUCLÍDEOS	MASSA DO ELEMENTO POR TONELADA DE URÂNIO (g/t_U)	ATIVIDADE TOTAL (Bq)
Actinídeos	$1,1 \times 10^4$	$2,2 \times 10^{15}$
^3H	$7,0 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{13}$
^{85}Kr	$2,7 \times 10^1$	$1,8 \times 10^{14}$
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$3,6 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{10}$
^{90}Sr	$5,4 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{15}$
^{129}I	$1,8 \times 10^2$	$4,8 \times 10^8$
^{131}I	$1,8 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{10}$
^{137}Cs	$1,2 \times 10^3$	$1,8 \times 10^{15}$
Outros	$2,8 \times 10^4$	$7,0 \times 10^{16}$
TOTAL		$7,6 \times 10^{16}$

Fonte: RADUAN (1994)

Tabela A2 – ATIVIDADE DO CNQ E DOS REJEITOS RADIOATIVOS DE NÍVEL ALTO (RNA), PROVENIENTES DE UM REATOR PWR, APÓS A QUEIMA DE 33 GW-d/t E ESFRIAMENTO.

Tempo após a remoção do reator (anos)	Actinídeos e filhos no CNQ (TBq)	Actinídeos e filhos no RNA (TBq)	Produtos de fissão no CNQ ou RNA (TBq)
10	2.660	120	11.500
100	234	32,7	1.270
1.000	57	8,3	0,8
10.000	16,3	0,94	-

1 TBq = 27 Ci

1Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci

Fonte: Notas de aula do curso TNA-5742 Tratamento e Deposição de Rejeitos Radioativos no Ciclo do Combustível Nuclear, IPEN-CNEN/SP

Tabela A3 – INSTALAÇÕES DE ARMAZENAGEM VIA ÚMIDA, FORA DO REATOR, EM VÁRIOS PAÍSES DO MUNDO (AFR- *Away from reactor*)

País	Instalação	Situação	Escala
Alemanha	Greifswald NPP, ZAB - Zwischenlager	Em operação	Comercial
Alemanha	Karlsruhe	Desativada	Planta Piloto
Argentina	Atucha NPP	Em operação	Comercial
Bélgica	Eurochemic Reprocessing Plant Site	Aguardando	Comercial
Bélgica	Tihange NPP	Em operação	Comercial
Bulgária	Kozloduy NPP	Em operação	Comercial
China	Lanzhou Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Eslováquia	Bohunice NPP	Em operação	Comercial
EUA	Hanford - K Basins	Em operação	Laboratório
EUA	Idaho CPP-603, CPP-666	Em operação	Laboratório
EUA	Morris Reprocessing Plant	Stand by	Comercial
EUA	Savannah River (SRS)	Em operação	Laboratório
EUA	West Valley Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Finlândia	Loviisa NPP (Spent Fuel Storage 1)	Em operação	Comercial
Finlândia	Loviisa NPP (Spent Fuel Storage 2)	Em operação	Comercial
Finlândia	Olkiluoto NPP, TVO KPA	Em operação	Comercial
França	La Hague - C	Em operação	Comercial
França	La Hague - D	Em operação	Comercial
França	La Hague - E	Em operação	Comercial
França	La Hague - HAO	Em operação	Comercial
França	La Hague - NPH	Em operação	Comercial
Índia	Prefre - Tarapur Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Inglaterra	BNFL Sellafield B27 Pond	Em operação	Comercial
Inglaterra	BNFL Sellafield B29 Pond	Descomissionada	Comercial
Inglaterra	BNFL Sellafield B30 Pond	Descomissionada	Comercial
Inglaterra	BNFL Sellafield Fuel Handling Plant	Em operação	Comercial
Inglaterra	BNFL Sellafield Pond 4	Em operação	Comercial
Inglaterra	BNFL Thorp RT & ST-1,2	Em operação	Comercial
Japão	Fukushima NPP - SFSF	Em operação	Comercial
Japão	Tokai Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Japão	Rokkasho Spent Fuel Storage	Em operação	Comercial
Rússia	Leningrad NPP	Em operação	Comercial
Rússia	Novovoronezh NPP	Em operação	Comercial
Rússia	Kursk NPP	Em operação	Comercial
Rússia	RT-1, Mayak, Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Rússia	RT-2, Krasnoyarsk, Reprocessing Plant	Em operação	Comercial
Rússia	Smolensk NPP	Em operação	Comercial
Suécia	Clab ISF	Em operação	Comercial
Ucrânia	Chernobyl NPP	Em operação	Comercial

Fonte: INFCIS - IAEA - 2004

Tabela A4 - INSTALAÇÕES DE ARMAZENAGEM VIA SÊCA FORA DO REATOR
(AFR – *Away from reactor*)

País	Instalação	Situação	Escala
Alemanha	Ahaus Central Interim Storage	Em operação	Comercial
Alemanha	Biblis NPP, Brennelement-Zwischenlager	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Biblis NPP Site, Interimslager	Em operação	Comercial
Alemanha	Brokdorf On-Site Storage Facility	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Brunsbuettel NPP - Interimslager	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Brunsbuettel NPP - Standort-Zwischenlager	Em construção	Comercial
Alemanha	Gorleben Central Interim Storage	Em operação	Comercial
Alemanha	Grafenrheinfeld (KKG BELLA) NPP	Em construção	Comercial
Alemanha	Greifswald NPP - ZLN Dry Storage	Em operação	Comercial
Alemanha	Grohnde NPP - Standort-Zwischenlager	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Gundremmingen NPP - Standort-Zwischenlager	Planejada	Comercial
Alemanha	Isar NPP - (KKI BELLA)	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Juelich Research Center, AVR Storage	Em operação	Comercial
Alemanha	Kruemmel NPP - Interimslager	Em construção	Comercial
Alemanha	Kruemmel NPP - Standort-Zwischenlager	Aguardando licença	Comercial
Alemanha	Lingen NPP - Standort-Zwischenlager	Em operação	Comercial
Alemanha	Neckarwestheim NPP - (GKN)	Planejada	Comercial
Alemanha	Philippsburg NPP	Planejada	Comercial
Alemanha	Pilot Conditioning Gorleben (PKA)	Aguardando	Planta Piloto
Argentina	Embalse NPP	Em operação	Comercial
Armênia	Metzamor NPP	Em operação	Comercial
Bélgica	Doel NPP	Em operação	Comercial
Canadá	Bruce NPP	Em construção	Comercial
Canadá	Chalk River Laboratórios	Em operação	Comercial
Canadá	Douglas Point NPP	Desativada	Comercial
Canadá	Gentilly 1 NPP	Desativada	Comercial
Canadá	Gentilly 2 NPP	Em operação	Comercial
Canadá	NPD Spent Fuel Storage	Em operação	Comercial
Canadá	Pickering 1 NPP	Em operação	Comercial
Canadá	Pickering 2 NPP	Aguardando licença	Comercial
Canadá	Point Lepreau NPP	Em operação	Comercial
Canadá	Whiteshell Laboratórios	Em operação	Comercial
China	Chin Shan NPP	Planejada	Comercial
Coréia	Korea ISFSF	Planejada	Comercial
Coréia	Wolsong NPP	Em operação	Comercial
Eslováquia	Mochovce NPP - SFSE	Planejada	Comercial
Espanha	Trillo NPP	Em operação	Comercial
EUA	Actinide Packaging and Storage Fac. APSF	Planejada	Laboratório
EUA	Arkansas Nuclear #1 & 2 NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Big Rock Point NPP	Planejada	Comercial
EUA	Calvert Cliffs NPP	Em operação	Comercial
EUA	Davis Besse NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Dresden NPP	Em construção	Comercial

Continua

Continuação da Tabela A.4

EUA	Duane Arnold NPP	Planejada	Comercial
EUA	Fort St. Vrain NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	H.B. Robinson NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Hanford - Canister Storage Building	Em construção	Laboratório
EUA	Idaho CPP-603 IFSF, CPP-749	Em operação	Laboratório
EUA	Idaho TAN-607 demonstração	Em operação	Planta Piloto
EUA	McGuire NPP	Planejada	Comercial
EUA	North Anna NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Oconee NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Owl Creek NPP	Planejada	Comercial
EUA	Oyster Creek NPP	Planejada	Comercial
EUA	Palisades NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Peach Bottom NPP	Em operação	Comercial
EUA	Point Beach NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Prairie Island NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Private Fuel Storage LLC	Planejada	Comercial
EUA	Rancho Seco NPP - ISFSI	Planejada	Comercial
EUA	Surry NPP - ISFSI	Em operação	Comercial
EUA	Susquehanna NPP Site	Em operação	Comercial
EUA	TMI-2, Debris at Idaho	Em operação	Comercial
EUA	Trojan NPP - ISFSI	Em construção	Comercial
Hungria	Paks NPP - ISFSF	Em operação	Comercial
Índia	Rajasthan NPP	Em operação	Comercial
Índia	Tarapur NPP	Em operação	Comercial
Inglaterra	Wylfa NPP	Em operação	Comercial
Japão	Fukushima NPP - SFSF	Em operação	Comercial
Lituânia	Ignalina NPP	Em operação	Comercial
República Checa	Dukovany NPP - ISFSF	Em operação	Comercial
República Checa	Dukovany NPP - SFSF	Em construção	Comercial
República Checa	Temelin NPP - SFSF	Em estudo	Comercial
Romênia	Cernavoda NPP	Em operação	Comercial
Rússia	Mining and Chemical Complex Site	Planejada	Comercial
Ucrânia	Chernobyl NPP	Planejada	Comercial
Ucrânia	Zaporozhe NPP	Em operação	Comercial

Fonte: INFCIS - IAEA - 2004

Tabela A5 – POLÍTICAS NACIONAIS QUANTO AO CNQ

Países que utilizam armazenagem temporária (seca e úmida)	Países com instalações de armazenagem via seca	Países com planos de armazenagem via seca	Países que realizam reprocessamento
Canadá	Alemanha	África do Sul	China
Estados Unidos	Argentina	Brasil	França
Finlândia	Armênia	Cazaquistão	Índia
Suécia	Bélgica	Eslovênia	Inglaterra
	Bulgária	Itália	Japão
	Coréia do Sul	Paquistão	Rússia
	Eslováquia	Romênia	
	Espanha	Taiwan	
	Holanda		
	Hungria		
	Lituânia		
	Rep. Checa		
	Rússia		
	Suíça		
	Ucrânia		

Fonte: adaptado de Fairlie (2000)

ANEXO 2

Endereços eletrônicos relacionados com o CNQ e os rejeitos nucleares:

- <http://anlw.anl.gov> - Laboratório de Argonne, Estados Unidos
- <http://fueltrac.nacintl.com/default.htm> - *NAC Worldwide Consulting*, Estados Unidos
- <http://hanaro.kaeri.re.kr> - *High-flux advanced neutron application reactor*, Coreia do Sul
- <http://nsnfp.inel.gov> - *National spent nuclear fuel program*, Estados Unidos
- <http://reactor.engr.wisc.edu/reactor.htm> - *University of Wisconsin*, Estados Unidos
- <http://toshiba.co.jp/product/abwr/abwr-int/index.htm> – Japão
- <http://www.1nuclearplace.com> - Informações nucleares
- <http://www.aben.com.br> - Associação Brasileira de Energia Nuclear, Brasil
- <http://www.abeunet.com.br/~vini/angra2.html> - Usina nuclear Angra 2, Brasil
- <http://www.aecl.ca> – *Atomic Energy of Canada Limited*, Canadá
- <http://www.andra.fr/> - *National radioactive waste management agency*, Châtenay-Malabry, França
- <http://www.ans.org> - *American Nuclear Society*, Illinois, Estados Unidos.
- <http://www.ansto.gov.au> - ANSTO - *Australian Nuclear Science and Technology Organisation*, Austrália
- <http://www.areva.com> - Grupo AREVA, França
- <http://www.bellona.no> - *Bellona Foundation*, Noruega
- <http://www.bfs.de> - *Federal Office for Radiation Protection*, Alemanha
- <http://www.bnfl.com> - *British Nuclear Group*, Reino Unido.
- <http://www.ccnr.org> - *Canadian coalition for nuclear responsibility*, Canadá
- <http://www.cea.fr> - *French Atomic Energy Commission*, Paris, França.
- <http://www.cez.cz> - Operador de central nuclear na Checoslováquia
- <http://www.cfe.gob.mx> - *Comisión Federal de Eletricidad - Central nuclear de Laguna Verde*, México

- <http://www.cnea.edu.ar> - *Comisión Nacional de Energía Atómica*, Argentina
- <http://www.cnen.gov.br> - *Comitê Nacional de Energia Nuclear*, Brasil
- <http://www.cntrillo.es> - *Centrais nucleares de Almaraz e Trillo*, Espanha
- <http://www.cnwm.berkeley.edu> - *University of California-Berkeley*, Estados Unidos
- <http://www.cogema.fr> - *Compagnie Générale des Matières Nucléaires*, França.
- <http://www.covra.nl> - *Central Organization for Radioactive Waste*, Holanda
- <http://www.ctmsp.mar.mil.br> - *Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo*, Brasil
- <http://www.dae.gov.in/aec.htm> - *Atomic Energy Commission*, Índia
- <http://www.de.framatome-anp.com/anp/e/foa/anp/products/a-z/nass-trocken.htm> - *Framatome*, Alemanha
- <http://www.dbe.de> - *The German Company for the Construction and Operation of Waste Repositories*, Peine, Alemanha.
- <http://www.edram.org> - *International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials*.
- <http://www.eia.doe.gov> - *Energy Information Administration*, Washington DC, Estados Unidos.
- <http://www.eletronuclear.gov.br> - *Eletrobrás Termonuclear S.A.*, Brasil
- <http://www.eneabba.net/radlinks> - *Radiation Links*, Austrália
- <http://www.energiatomica.hpg.ig.com.br> - *Monitor Nuclear*, Brasil
- <http://www.energy.gov> - *DOE - U.S Department Of Energy*, Estados Unidos
- <http://www.enresa.es> - *Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A.*, Madrid, Espanha.
- <http://www.eskom.co.za> - *Operador de central nuclear na África do Sul*
- <http://www.euronuclear.org> - *European Nuclear Society*, Brussels, Bélgica.
- <http://www.eurosafe-forum.org/ipsn/index.htm> - *Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe*.
- <http://www.foratom.org> - *FORATOM - FORum ATOMique européen*
- <http://www.framatome-anp.com> - *Framatome* - França
- <http://www.gkn.de> - *Kernkraftwerk Neckarwestheim* - Alemanha

- <http://www.gns-nuklearservice.de> - *Gesellschaft für Nuklear-Service mbH*, Essen, Alemanha.
- <http://www.gov.si/arao/aodpadki-slo.htm#6> - *Radioactive waste in Slovenia*, Eslovênia
- <http://www.grs.de> - *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS)*, Cologne/Garching/Brunswick/ Berlin, Alemanha.
- <http://www.hanford.gov/doe/snf/Index.cfm> - *Spent nuclear fuel*, Hanford, Estados Unidos
- <http://www.howstuffworks.com/nuclear-power.htm>
- <http://www.iae.lt/iae/inpp.htm> - Central nuclear de Ignalina, Lituânia
- <http://www.iaea.org> - *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, Vienna, Áustria.
- <http://www.iaea.org/programmes/inis/ws/index.html> - *International Nuclear Information System*, operado pela IAEA, Vienna, Austria.
- <http://www.icjt.org/an/index.htm> – *Nuclear training center* - Eslovênia
- <http://www.inb.gov.br> - Indústrias Nucleares do Brasil, Brasil
- <http://www.insc.anl.gov/> - *International Nuclear Safety Center*, Estados Unidos
- <http://www.invap.net> - *Invap*, Argentina
- <http://www.ipen.br> - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil
- <http://www.jaeri.go.jp/english/index.cgi> - *Japan Atomic Energy Research Institute*, Japão
- <http://www.japc.co.jp/english/index.htm> - *Japan Atomic Power Company*, Japão
- <http://www.jnc.go.jp/jncweb/index.htm> - *Japan Nuclear Cycle Development Institute*, Japão
- <http://www.jnfl.co.jp/index-e.html> - *Japan Nuclear Fuel Limited*, Japão
- <http://www.kcd.nl/index1.html> - Central nuclear de Dodewaard, Holanda
- <http://www.kerncentrale.nl> - Central nuclear de Borselle, Holanda
- <http://www.kernenergie.de> - Alemanha
- <http://www.kkg.ch> - *Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG (NPP Gösgen-Däniken)*, Däniken, Suíça.
- <http://www.kkl.ch> - *Kernkraftwerk Leibstadt AG (NPP Leibstadt)*, Leibstadt, Suíça.
- <http://www.kolanpp.ru/english> - Central nuclear de Kola, Rússia

- http://www.kznpp.org/index_e.htm - Central nuclear de Kozloduy, Bulgária.
- <http://www.laes.ru> - Central nuclear Leningrad, Rússia
- <http://www.laradioactivite.com> - *La radioactivité* - França
- <http://www.nacintl.com> - NAC International, fabricante de cascos, Estados Unidos
- <http://www.nagra.ch> - *Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle*, Wetingen, Suíça
- <http://www.nea.fr> - *Nuclear Energy Agency*, OECD, Issy-les-Moulineaux, França.
- <http://www.nei.org> - NEI - *Nuclear Energy Institute*, Estados Unidos
- <http://www.neras.be> - *Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile materials*, Brussels, Bélgica.
- <http://www.nirex.co.uk> - *Nirex Ltd*, Harwell, Reino Unido.
- <http://www.nok.ch> - *Nordostschweizerische Kraftwerke* (NPPs Beznau I and II), Baden, Suíça.
- <http://www.npcil.org> - *Nuclear Power Corporation of India Limited*, Índia
- <http://www.npp.hu> - Central nuclear de Paks, Hungria
- <http://www.nppzap.zaporizhzhhe.ua> - Central nuclear de Zaporozie, Ucrânia
- <http://www.nrc.gov> - *U.S. Nuclear Regulatory Commission*, Estados Unidos
- <http://www.nsc.org/ehc/wipp.htm> - *Waste Isolation Pilot Plant*, Carlsbad, New Mexico, Estados Unidos.
- <http://www.nuclear.ru/eng> - Fonte independente russa, Rússia
- <http://www.nucleartourist.com> - Informações gerais
- <http://www.numo.or.jp/english/> - *Nuclear Waste Management of Japan*, Japão
- <http://www.nwmo.ca> - *Nuclear Waste Management Organisation*, Canadá
- <http://www.ornl.gov> - Oak Ridge, Estados Unidos
- <http://www.ocrwm.doe.gov> - *Office of Civilian Radioactive Waste Management*, um programa do U.S. Department of Energy (DOE), Estados Unidos.
- <http://www.oecd.org> - OCDE - *Organisme de Coopération et de Développement Economique* - França
- <http://www.posiva.fi> - *Posiva Oy*, Olkiluoto, Finlândia.
- <http://www.privatefuelstorage.com> - *Private Fuel Storage*, Estados Unidos
- <http://www.radwaste.org> - Resíduos radioativos
- <http://www.ringhals.se/index.asp?ItemID=1291> - Central nuclear de Barsebäck, Suécia

- <http://www.rosatom.ru> - Companhia de geração de energia Rosenergoatom, Rússia
- <http://www.rwmc.or.jp> - *Radioactive Waste Management Funding and Research Center*, Tokyo, Japão.
- <http://www.sandia.gov> - *Sandia National Laboratories*, New Mexico (Albuquerque) e California (Livermore), Estados Unidos.
- <http://www.sckcen.be> - (SCK-CEN), Bélgica.
- <http://www.seas.sk> - *Slovenske Elektrarne*, Eslováquia
- <http://www.sgn.fr> - França
- <http://www.skb.se> - *Svensk Kärnbränslehantering AB*, Stockholm, Suécia.
- <http://www.ski.se> - Entidade supervisora de atividades nucleares na Suécia
- <http://www.srs.gov> - Savannah River, Estados Unidos
- <http://www.ssi.se> – *Swedish radiation protection authority*, Suécia
- <http://www.surao.cz> – República Checa
- <http://www.taipower.com.tw> - Operador de central nuclear em Taiwan
- <http://www.temelin-besuch.cz/menu-d.html> - Central nuclear de Temelin, Checoslováquia
- <http://www.transnuclear.com> - Transnuclear
- <http://www.trex-center.org> - *Transportation Resource Exchange Center*, Estados Unidos
- <http://www.tvo.fi/etvohome> - Finlândia.
- <http://www.uic.com.au> - UIC - *Uranium Information Center*, Austrália
- <http://www.ukaea.org.uk> - Reino Unido.
- <http://www.vattenfall.se> - Suécia
- <http://www.wipp.carlsbad.nm.us> - Estados Unidos
- <http://www.worldenergy.org/wec-geis> - *World Energy Council*, London, Reino Unido.
- <http://www.worldnuclear.org> - *The World's Nuclear News Agency*; Berne, Suíça.
- <http://www.world-nuclear.org> - *World Nuclear Association*, London, Reino Unido.
- <http://www.ymp.gov> – *Yucca Mountain*, Estados Unidos
- <http://www.yonden.co.jp/english/links/index.htm> - Operador de central nuclear no Japão
- <http://www.zwilag.ch> - *ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG*, Würenlingen. Suíça

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. Informações do setor elétrico. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso: em 29 jul. 2004.
- [2] AHMED, W.; ARSHAD, M.; GHULAM QASIM, Kh. Dry storage of spent KANUPP fuel and booster rod assemblies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p.482 - 484. (IAEA-CN-102)
- [3] ALVAREZ, R. ¿Y el Combustible Agotado?, *Bulletin of the Atomic Scientists*, ene./feb. 2002, v. 58, n. 1, p. 45-47. Disponível em: <<http://www.thebulletin.org/Spanish/jf02/jf02alvarez.htm>>. Acesso em: 20 mai. 2002.
- [4] AMERGEN ENERGY COMPANY. LLC. Oyster Creek Nuclear Generating Station; Environmental Assessment and Finding of No Significant Impact. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA~IMPACT/2000/September/Day-12/i2339.htm>>. Acesso: em 09 mar. 2004.
- [5] ANDERSSON, C.; ANDREWS, R. The development of advanced welding techniques for sealing nuclear waste canisters. In: 2001 MRS Spring meeting, April 2001, San Francisco, CA (SKB TR-01-25)
- [6] ARAO -Agencija za radioaktivne odpadke (Agência para gerência de rejeitos radioativos). Radioactive waste in Slovenia. Disponível em: <<http://www.gov.si/rao/aodpadki-slo.htm#6>>. Acesso em 07 set. 2004
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR – Angra 3: Energia para o crescimento do Brasil. *Brasil Nuclear*, n. 26, P. 31, jul. - dez. 2003.
- [8] BAILLIF, L.; BONNET, C. *Advanced designs and systems for interim storage of spent nuclear fuel*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - In: Back End of the Nuclear Fuel Cycle - Strategies and Options, Proceedings..., Vienna, 1987, p.333-339 IAEA SM 294/19
- [9] BARSEBÄCK. Decommissioning - Removing the Fuel. Disponível em: <<http://www.ringhals.se/index.asp?ItemID=1291>>. Acesso em 04 abr. 2004.

- [10] BELLONA FOUNDATION. Spent fuel storage ship secured. Disponível em: <<http://www.bellona.no/imaker?sub=1&id=7748>>. Acesso em: 07 mar. 2002.
- [11] BELLONA FOUNDATION. Support ships for spent nuclear fuel. Disponível em: <http://www.bellona.com/en/international/russia/navy/northern_fleet/spent_fuel/28238.html>. Acesso em: 07 out. 2003.
- [12] BENISTAN, G.; BLANCHON, T.; LENAIL, B. *Le Programme Français concernat la Partie Terminale du Cycle du Combustible Nucleaire*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - In: Back End of the Nuclear Fuel Cycle - Strategies and Options, Proceedings..., Vienna, 1987, p 3-14, IAEA SM 294/28
- [13] BIRO, L.; RODNA, A. Implementation of Romanian NPP spent fuel management strategy - A regulatory approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 49-60. (IAEA-CN-102)
- [14] BUNN, M.; HOLDREN, J.; MACFARLANE, A.; PICKETT, S.; SUZUKI, A.; SUZUKI, T.; WEEKS, J. **Interim Storage of Spent Fuel: A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management**. Harvard University and University of Tokyo, June, 2001.
- [15] BUNN, M.; FETTER, S.; HOLDREN, J.; van der ZWAAN, B. **The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel**. Project on managing the atom. Belfer Center for Science and International Affairs. John F. Kennedy School of Government and Harvard University. MA, Dec., 2003.
- [16] COCHRAN, R.; TSOULFANIDIS, N. **The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management**. American Nuclear Society, 1992.
- [17] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGIA ATÓMICA. Joint convention on the safety of the spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, section G - Safety in spent fuel management. National Report. Argentina, 2003. Disponível em: <<http://www.cnea.gov.ar/xxi/residuos/residuos.asp>>. Acesso em: 29 set. 2003.
- [18] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações nucleares**. (CNEN NE 1.04). Dez. 1984.
- [19] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de Materiais Radioativos**. (CNEN NE 5.01). Ago. 1988.

- [20] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Elementos Combustíveis de Usinas Nucleoelétricas.** (CNEN NE 5.02). Out. 1986.
- [21] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas.** (CNEN-NE-6.05) 1985a.
- [22] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Seleção e escolha para locais de depósitos de rejeitos radioativos.** (CNEN-NE-6.06) 1985b.
- [23] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Second National Report of Brazil for the Nuclear Safety Convention.* Sep., 2001
- [24] CONGRESSO FEDERAL. **Lei 10308 - Seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos,** Brasil. Nov., 2001
- [25] CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR. Residuos de alta actividad - Situación en España. Disponível em:
<http://www.csn.es/plantillas/frame_nivelult.jsp?id_nodo=1666&&>. Acesso em: 02 abr. 2004.
- [26] COUFAL, J.; BRZOBOHATÝ, K. Spent fuel storage facilities in the Czech Republic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 22-24 (IAEA-CN-102).
- [27] DIONISI, M. Installations for the storage of spent fuel conditioning facilities geology, *Esarda Bulletin* 30, Dec. 1999, European Safeguard Research and Development Association.
- [28] ELETROBRÁS. Programa PROINFA. Disponível em:
<http://www.eletronbras.gov.br/EM_Programas_Proinfa/proinfa.asp>. Acesso em: 29 jul. 2004.
- [29] ENERGIA BRASIL. Disponível em:
<http://www.energiabrasil.gov.br/setframe.asp?Marcado=oferta&Pagina=fontesenergia_nuclear.asp>. Acesso em: 02 jun. 2004.
- [30] ENERGIA BRASIL. Disponível em:
<http://www.energiabrasil.gov.br/setframe.asp?Marcado=oferta&Pagina=oferta_potencia.asp>. Acesso em: 21 jun. 2004a.

- [31] ESKOM. Disponível em: <http://www.eskom.co.za/nuclear_energy/waste_re-racking/waste_re-racking.html#>. Acesso em: 20 jun. 2004.
- [32] FAIRLIE, I. **Dry storage of spent nuclear fuel: the safer alternative to reprocessing**. Report to Greenpeace International in response to Cogema dossiers to the La Hague public inquiry. London, May 2000.
- [33] GENERAL ACCOUNTING OFFICE (GAO). **Spent nuclear fuel - Options exist to further enhance security**. Report to the Chairman ... Jul. 2003, GAO-03-426.
- [34] HANCOX, W.; ISAAC, H; HOWIESON, J. *Status of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Programme*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - In: Back End of the Nuclear Fuel Cycle - Strategies and Options, Proceedings... Vienna 1987, p 15- 31 IAEA SM294/81.
- [35] HANSON, A.; CHOLLET,P. International experience of storing spent fuel in NUHOMS® systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 168-178 (IAEA-CN-102).
- [36] HELD, CH. HINTERMAYER, H. Comparison of concepts for independent spent fuel storage facilities. In: Storage of spent fuel elements. Madrid, Jun. 1978. *Proceedings...* Organisation for Economic Co-operation and Development OECD, Paris, 1978. p.179-195.
- [37] HIRSCH, H.; NEUMANN, W. *Verwundbarkeit von CASTOR-Behältern bei Transport und Lagerung gegenüber terroristischen und kriegerischen Einwirkungen sowie zivilisatorischen Katastrophen*, BUND-Studie: Verwundbarkeit von CASTOR-Behältern, Hannover, Nov. 2001
- [38] INTEGRATED NUCLEAR FUEL CYCLE INFORMATION SYSTEM. **International Atomic Energy Agency**. Vienna. Disponível em: <http://www-nfcis.iaea.org/Default.asp>. Acesso em 07 out. 2004.
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Storage of Water Reactor Spent Fuel in Water Pools - Survey of World Experience**. Vienna, 1982. (Technical Report Series, 218).
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Handling and Storage of Conditioned High-Level Wastes**. Vienna, 1983. (Technical Report Series, 229).
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Survey of experience with dry storage of spent nuclear fuel and update of wet storage experience**. Vienna, 1988. (Technical Report Series, 290).

- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Management of severely damaged nuclear fuel and related waste**. Vienna, 1991. (Technical Report Series, 321).
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Cost analysis methodology of spent fuel storage**. Vienna, 1994. (Technical Report Series, 361).
- [44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. International co-operation on nuclear waste management in the Russian Federation. May 15-17, 1995. Vienna, **Proceedings...** International Atomic Energy Agency, IAEA, 1995
- [45] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Survey of wet and dry spent fuel storage**. Vienna, 1999. (IAEA TECDOC 1100)
- [46] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Multipurpose container technologies for spent fuel management**. Vienna, 2000. (IAEA TECDOC 1192).
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Country nuclear fuel cycle profiles**. Vienna, 2001. (Technical Report Series, 404).
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Long term storage of spent nuclear fuel - Survey and recommendations**. Vienna, May 2002. (IAEA TECDOC-1293)
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Country nuclear power profiles 2002 edition**. Vienna. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2003/CNPP_Webpage/PDF/2002/index.htm>. Acesso em: 24 nov. 2003a.
- [50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2030**. Vienna, 2003b. (Reference Data Series No. 1).
- [51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Spent Fuel Performance Assessment and Research**. Vienna, 2003c. (IAEA TECDOC-1343).
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. The Promise of Underground Geological Repositories. Staff Report Jan. 23 2004. Disponível em: <<http://www.iaea.org/PrinterFriendly/NewsCenter?Features/Grl/repositori es20040123.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2004.
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Transition for operation to decommissioning of nuclear installations**. Vienna, 2004a. (Technical Report Series 420).

- [54] INTERNATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY CENTER. Fuel Assembly Materials under Dry Storage. Disponível em: <<http://www.tech-db.ru/istc/db/projects.nsf/prjn/K-812>>. Acesso em: 09 dez. 2003.
- [55] INVAP, ASECQ - Almacenamiento en Seco de Elementos Combustibles Quemados. Disponível em: <<http://www.invap.com.ar>>. Acesso em: 08 mar. 2004.
- [56] KHAN, A.; KING, F. Regulatory approval of used fuel dry storage facilities in Canada, An Ontario Power Generation case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. **Proceedings...** International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 240-249 (IAEA-CN-102/6)
- [57] KULKARNI, W. B.; SONI, R. S.; AGARWAL, K. Spent fuel storage in India. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. **Proceedings...** International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 30-36 (IAEA-CN-102/24)
- [58] LA RADIOACTIVITÉ - DANS LE NUCLÉAIRE. Déchets et Combustibles Usés. Le déchargement du combustible. Disponível em: <<http://www.laradioactivite.com/nucleairef.htm>>. Acesso em: 13 fev. 2004.
- [59] LIDSKOG, R.; ANDERSSON, A. **The management of radioactive waste. A description of ten countries**. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden, 2002.
- [609] LIETAVA, P.; BARTÁK, L.; KUBA, S. Current status of the spent fuel management from power reactors in the Czech Republic - Licencing and operational experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. **Proceedings...** International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 250-260. (IAEA-CN-102/11).
- [61] MELE, I. Disposal plans and activities in Slovenia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIOACTIVE WASTE AND SPENT FUEL MANAGEMENT, Nov. 6 - 8, 2003, Plovdiv, Bulgaria. **Proceedings..**
- [62] MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA. **Quinto plan general de residuos radiactivos**. España, 1999.
- [63] MINISTERIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Diretor do Meio Ambiente do Setor Elétrico 1991/1993**. Brasil, 1990.
- [64] MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Sumário executivo do plano decenal de expansão 2003/2012 - Expansão dos sistemas elétricos do país**. Brasil. dez. 2002

- [65] MOUNFIELD, P. **World Nuclear Power**. Routledge, London, 1991. cap. 12, the back-end of the nuclear fuel cycle: storing and transporting radioactive waste. p.329 - 382.
- [66] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Interim Storage of Solidified High-Level Radiactive Wastes**. National Academy Of Sciences, Washington, D.C. 1975.
- [67] NUCLEARELECTRICA. Intermediate Used Fuel Storage System (DICA). Disponível em: <http://www.nuclearelectrica.ro/NewsArticle.asp?ID_News=27>. Acesso em: 08 mar. 2004.
- [68] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *The Safety of the Nuclear Fuel Cycle*. Paris, 1993.
- [69] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. *Soviet-Designed Nuclear Power Plants in Russia, Ukraine, Lithuania, Armenia, the Czech Republic, the Slovak Republic, Hungary and Bulgaria*. NEI, Washington, Fifth Edition, 1997.
- [70] NUCLEAR FRANCE: MATERIALS AND SITES. Davis, M.; Management of Irradiated Fuel. Disponível em: <http://www.francenuc.org/en_chn/irr_fuel1_e.htm>. Acesso em: 09 dez. 2003.
- [71] NUCLEAR THREAT INITIATIVE. Ukraine: Spent fuel and Radioactive Waste Developments. 8/18/2001: Loading of Zaporizhzhya dry storage containers begins, testing period to begin 6 sep. 2001. Disponível em: <www.nti.org/db/nisprofs/ukraine/reactors/power/wastedev.htm> Acesso em: 05 abr. 2004
- [72] NUCLEAR THREAT INITIATIVE. Metsamor Nuclear Power Plant. Disponível em: <<http://www.nti.org/db/nisprofs/armenia/powerrea.htm>>. Acesso em: 04 abr. 2004a
- [73] NUCLEAR THREAT INITIATIVE. Ukraine: Spent Fuel and Radioactive Waste. Disponível em: <<http://www.nti.org/db/nisprofs/ukraine/reactors/power/wasteovr.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2004b
- [74] OFFICE OF CIVILIAN RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT - OCRWM. Switzerland's Radioactive Waste Management Program. Disponível em: <<http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0417.shtml>>. Acesso em: 07 jun. 2004
- [75] PAKS NPP. Interim Storage of Spent Fuel. Disponível em: <<http://www.npp.hu/kornyezeti/KiegettUa-e.htm>>. Acesso em: 18 mai. 2004.

- [76] PENNINGTON, C.; MCGOUGH, M. MADness and spent fuel cask safety. *Radwaste Solutions*. p.25-30, May/Jun. 2002.
- [77] POSIVA OY. Spent Nuclear Fuel in Finland. Disponível em: <<http://www.posiva.fi/englanti/index.html>>. Acesso em: 04 abr. 2004.
- [78] RADUAN, R. **Requisitos ambientais para disposição final de rejeitos radioativos em repositórios de superfície**. Dissertação de mestrado orientada pela Profa. Dra. Bárbara M. Rzyski. IPEN, 1994.
- [79] ROCHA, M. Engenharia brasileira acerta Angra 1 – Mais espaço para o Urânio queimado. *Brasil Nuclear*, n. 10, p. 4-7, jul. - set. 1996.
- [80] ROLAND, V.; SOLIGNAC, Y.; CHIGUER, M.; GUENON, Y. Dry storage Technologies: keys to choosing among metal casks, concrete shielded steel canister modules and vaults. In: RADIOACTIVE WASTE AND SPENT FUEL MANAGEMENT INTERNATIONAL CONFERENCE, *Proceedings...* Nov. 6 – 8, 2003, Bulgaria.
- [81] ROMANATO, L.; RZYSKI, B. Levantamento dos aspectos ambientais no transporte de combustível nuclear queimado, da central nuclear para o local de armazenagem provisória. IN VI CONGRESO REGIONAL SOBRE SEGURIDAD RADIOLOGICA Y NUCLEAR. CONGRESO REGIONAL IRPA, *Proceedings...* 9 - 13 nov. 2003, Lima, Peru. 1 CD-ROM.
- [82] RYHÄNEN, V. Siting of radioactive waste management facilities. Safety of radioactive waste management. In PROCEEDING OF AN INTERNATIONAL CONFERENCE, IAEA, *Proceeding...* Cordoba, Spain, p.127-136, Mar. 13 - 17, 2000.
- [83] SGN. Gestion des Combustibles Usés. Disponível em: <http://www.sgn.fr/secteurs_activites/gestion_combustibles_uses.htm>. Acesso em: 06 fev. 2004.
- [84] SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE a.s. Decommissioning Nuclear Instalation. Disponível em: <<http://seas.sk/index.php?id=201>>. Acesso em: 06 abr. 2004.
- [85] SOUTH CAROLINA ELECTRIC & GAS CO. Virgil C. Summer Nuclear Station; Environmental Assessment and Finding of No Significant Impact. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-IMPACT/2002/August/Day-29/i22108.htm>>. Acesso em: 09 mar. 2004.
- [86] SOUTH AFRICAN QUALITY INSTITUTE. Tell, T. Project management solutions using HR and QM principles. Disponível em: <http://www.saqi.co.za/QE_ar_1103_3.htm>. Acesso em: 29 mar. 2004.

- [87] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB - SKB - Facilities - CLAB - Central interim storage facility for spent nuclear fuel - Produced by Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Mar. 2000.
- [88] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB - SKB. *Costs for management of the radioactive waste products from nuclear power production, Plan 2003*. Stockholm, Sweden, Jun. 2003. (Technical Report TR-03-11).
- [89] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB - SKB. CLAB Central interim storage facility for spent fuel. Disponível em <http://www.skb.se/templates/SKBPage_____3333.aspx>. Acesso em: 14 abr. 2004.
- [90] TAKÁTS, F.; BUDAY, G. Spent fuel storage in Hungary. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 25-29 (IAEA-CN-102/23)
- [91] THOMASKE, B. Realization of the german concept for interim storage of spent nuclear fuel - Current situation and prospects. In: WM'03 CONFERENCE. Feb. 23-27, 2003, Tucson, AZ. *Proceedings...*
- [92] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Spent fuel pools. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/pools.html>>. Acesso em: 10 mar. 2002
- [93] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-trans-cask-system.html>>. Acesso em: 08 mai. 2003
- [94] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/dry-cask-storage.html>>. Acesso em: 07 mar. 2004
- [95] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. NRC approves 40 years license renewal for independent spent fuel storage installation at Surry Nuclear Plant. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2004/04-156.html>>. Acesso em: 10 dez. 2004a
- [96] VACLAV, J.; Spent fuel management in Slovak Republic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIOACTIVE WASTE AND SPENT FUEL MANAGEMENT, Nov. 6 - 8, 2003, Plovdiv, Bulgaria. *Proceedings...*

- [97] VERDIER,A.; ROLAND,V.; LEBRUN, M. Interim Storage and Transport casks in Switzerland - COGEMA logistics experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 261-269 (IAEA-CN-102/15)
- [98] VOSSNACKE, A.; HOFFMANN, V.; NÖRING, R.; SOWA, W. Management of spent fuel from power and research reactors using CASTOR and CONSTOR casks and licensing experience in Germany. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STORAGE OF SPENT FUEL FROM POWER REACTORS, Jun. 2-6, 2003, Vienna. *Proceedings...* International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Oct 2003. p. 142 -149 (IAEA-CN-102/20)
- [99] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in the World today. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf01.htm>>. Acesso em: 01 mar. 2004.
- [100] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in China. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf63.htm>>. Acesso em: 22 set. 2004a.
- [101] ZAPOROZYE NUCLEAR POWER PLANT, Устройство и описание СХОЯТ (Armazenagem a Seco Fora do Reator). Disponível em: <http://www.nppzap.zaporizhzhhe.ua/sh_ustr.php>. Acesso em: 22 mar. 2004.