

CHERNOBYL – O Estado da Arte

Daiane C. B. de Souza¹, Roberto Vicente, Maria Elisa C. M. Rostelato¹, Jéssica F. Borges¹, Rodrigo Tiezzi¹, Fernando S. Peleias Junior¹, Carla D. Souza¹, Bruna T. Rodrigues¹, Marcos A. G. Benega¹, Anderson S. de Souza¹ e Thais H. da Silva¹

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)

Av. Professor Lineu Prestes 2242

05508-000 São Paulo, SP - Brasil

dcsouza@ipen.br

rvicente@ipen.br

elisaros@ipen.br

jessicabfratini@gmail.com

rtiezzi@ipen.br

bteigarodrigues@gmail.com

fernandopeleias@gmail.com

carladdsouza@yahoo.com.br

marcosagbenega@ipen.br

asorgatti@hotmail.com

thaishunk@ipen.br

RESUMO

Considerado o maior desastre nuclear da história, o acidente resultou na exposição às radiações ionizantes de regiões da Bielorrússia, Rússia, Ucrânia e da população de diversos países europeus. Em vista da sua singularidade, em termos de fatores radiológicos específicos como, tempo de exposição, doses recebidas, área de exposição, contaminação, número de vítimas, o acidente possui aspectos sem precedentes em toda a história de acidentes provocados pelo homem. Dentre esse contexto, o acidente de Chernobyl completou em 2014, 28 anos de história. Nesses anos muitas lições foram aprendidas. Este artigo propõe analisar o que tem sido feito até o momento em relação aos danos causados pelo acidente e o estado da arte em Chernobyl, bem como os impactos na radioproteção aplicada na segurança de centrais nucleares. Parte do trabalho consistiu no levantamento de dados por meio de revisão bibliográfica e, outra parte dos dados, foi coletada em uma visita realizada em junho de 2013 no local do acidente, na qual se observou os valores de dose nas áreas afetadas e as obras de reparação que têm sido realizadas no sarcófago e arredores, bem como em relatórios oficiais disponíveis por meio de órgãos internacionais atuantes. Os principais resultados obtidos indicam significantes melhorias nos sistemas de radioproteção.

Palavras Chaves: Chernobyl; Pripyat; Acidente; Reatores Nucleares.

1. INTRODUÇÃO

1.1 URSS em 1986

Décadas antes do maior acidente nuclear já ocorrido, o mundo desfrutava de uma série de experiências na área nuclear que teve início em 2 de dezembro de 1942 nos Estados Unidos.

Nessa época, uma série de programas nucleares foi desencadeada pelo mundo. Destacam-se o Projeto Manhattan durante a 2ª guerra mundial (1939-1945), o qual os Estados Unidos desenvolveram o que culminou na produção das bombas de Hiroshima e Nagasaki em 1945, a criação, em 1952, da *Windscale*, fábrica britânica com o primeiro reator nuclear para produção de plutônio, o próprio programa nuclear soviético, que teve início em 1942, e que em 1949, mesmo com a devastação e crise econômica pós-guerra, já havia produzido urânio suficiente para fabricar armamentos nucleares [1].

Entretanto, após a 2ª Guerra, houve um significativo interesse na utilização da energia nuclear para o fornecimento de energia elétrica para as cidades em crescimento. Com essa finalidade, nos EUA a *Westinghouse*, juntamente com a *Duquesne Light Company*, uniram-se para adotar a energia nuclear como fonte alternativa na produção de energia em Pittsburg [1].

Na Inglaterra, em outubro de 1956 a Rainha inaugurava a usina Calder Hall em Windscale, a primeira usina de produção de energia nuclear em escala industrial do mundo criada com o intuito de gerar eletricidade para consumo de uma cidade. Entretanto haviam outras usinas que também reivindicavam para si, o título como primeira usina nuclear do mundo: Obninsk foi a primeira a gerar eletricidade para consumo de uma cidade, apesar de originalmente não ter sido projetada para isso e Shippingport que foi a primeira exclusivamente criada para gerar eletricidade. Tanto Obninsk como Calder Hall produziam como subproduto plutônio para os programas militares da URSS e do Reino Unido.

Em meados de 1953 na URSS¹, 80% dos recursos energéticos naturais estavam concentrados na região leste do país, ao passo que 80% da população e consumidores ficavam ao oeste. Surge então um programa de eletrificação de todo o país, por meio do programa nuclear soviético que construiu, em 1954, o primeiro pequeno reator nuclear de 5.000 quilowatts para fornecer energia elétrica para comunidade de Obninsk situada a 100 km de Moscou. Essa expansão nuclear acelerada colocou a URSS, em 1985 e 1986, como o país detentor do maior programa de construção de centrais nucleares do mundo, com capacidade instalada de 18.000 megawatts [1].

1.2 Usina e Arredores

A Usina de Energia Atômica de Chernobyl está localizada aproximadamente 183 km de Kiev. Foi estrategicamente construída próximo de grandes centros e indústrias. Num raio de 30 km, havia cerca de 100 fazendas e vilas, que cultivavam principalmente batata, milho, soja e beterraba. A fazenda mais próxima está cerca 14 km de distância e, tinha aproximadamente 6500 cabeças de gado e 1500 suínos e ovinos. Possuía como reservatório o rio Pripyat, com 4 km de extensão. A cidade havia sido construída para ser habitada pelos funcionários da usina de Chernobyl. Tinha aproximadamente 20 mil habitantes, com média de idade de 27 anos. A energia gerada por Chernobyl era comprada pela COMECON para o fornecimento de energia elétrica na URSS (Fig. 1).

¹ Sigla para: União de Repúblicas Socialistas Soviéticas.



Figura 1. Mapa de Chernobyl e arredores da usina [2].

A usina possuía quatro reatores nucleares do tipo RBMK-1000². Sendo que o reator nº 4 estava em fase de troca de combustível e manutenção anual entre os meses de abril e maio de 1986. Esse reator possuía 1600 tubos metálicos para passagem de água através do núcleo durante sua operação. Esse conjunto de tubulações estava dentro de um bloco de grafite de 1700 toneladas com dimensões de 26,6 x 21,6 x 25,5 metros. Possuía 192 toneladas de urânio como combustível [3]. A tecnologia escolhida pelos soviéticos para a construção de reatores era do tipo RBMK. Suas vantagens envolviam a *on-load*, que permitia o reabastecimento do reator sem a necessidade de desligá-lo; além de o fornecimento de plutônio como subproduto da queima do urânio. Em 1986 haviam 28 reatores desse tipo na URSS [1]. A TAB. 1 apresenta descrição técnica dos reatores RBMK-1000.

Tabela 1. Parâmetros dos reatores RBMK-1000 usados em Chernobyl 1986 [3]

Parâmetros	RBMK-1000
Potência	1000 MW
Eficiência	31,3 %
Temperatura de saída do reator	280 °C
Massa de urânio	192 toneladas
Enriquecimento inicial de urânio	1,8%
Consumo de urânio/ano	50 toneladas/ano
Dimensões do núcleo do reator	Altura: 7 metros; diâmetro: 11,8 metros

1.3 O Acidente

Na noite de sexta para sábado, 26 de Abril de 1986 às 00h 26min uma equipe reduzida de operários³, trabalhavam na sala de controle em um dos reatores em Chernobyl. A equipe

² RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy*): Reatores refrigerados a água leve e moderados a grafite.

³ Era época de feriados na URSS: 1º de maio e 9 de maio dia da Vitória. No turno da noite estava trabalhando 150 funcionários. Dos 17 funcionários responsáveis, 10 haviam saído de férias. Os principais funcionários escalados no dia eram: Aleksandr Akimov (eng. supervisor); Anatoliy Kurguza (Chefe dos operadores da sala de controle); Valery Khodemchuk (operador básico) e Vladimir Shashenok (operados do sistema de controle)

desejava realizar testes na unidade 4, solicitados pelo Comitê Estatal para Uso da Energia Atômica, para aumentar a segurança do reator. O objetivo era investigar quanto tempo o turbo alternador continuaria gerando eletricidade após interromper a alimentação de vapor que acionava as bombas de refrigeração, no caso de um colapso, e ainda, se as turbinas girando por inércia, tinha a capacidade de fornecer um pouco mais de potência para manter as bombas em funcionamento nestas circunstâncias [1].

As respostas para as perguntas acima poderiam ser respondidas com o desligamento do reator. No entanto desligar totalmente o reator resultaria em um tempo maior, na ordem de dias, para religá-lo devido ao processo conhecido como envenenamento por xenônio. Nesse processo, como a potência de operação do reator é reduzida, a quantidade de xenônio-135, produto de fissão absorvedor de nêutrons, aumenta com o decaimento do iodo-135. Consequentemente o reator inicia o processo de ‘envenenamento’, no qual a quantidade de xenônio-135 presente não permite sua reativação imediata, tornando-se necessário aguardar o decaimento para a reativação do reator [1;3].

Uma vez que optaram por não desligar, os testes seguiram com uma redução na potência do reator. Barras de controle foram inseridas no núcleo de forma que a potência de saída fosse reduzida, chegando a 30 megawatts (térmicos) o que equivalia a 1% da potência máxima do reator nº4. Em reatores do tipo RBMK, para esse nível de potência, existem sistemas automáticos de desligamento. No entanto, foram desativados os controles de potência, o sistema de refrigeração de emergência do núcleo e outros dispositivos similares para que os testes pudessem continuar [1].

Com a potência baixa, deram início ao processo de envenenamento por xenônio-135. O que inicialmente foi evitado pelos operadores. Para interromper o processo, os operadores elevaram a potência. À 1h22m 30s, a reação estava em um ponto crítico, mas com os sistemas desligados, nada foi feito. Então, às 1h23m 4s, as bombas reservas foram ligadas e a energia que alimenta a turbina das bombas de água foi cortada deixando sobre ação da inércia. Após 40 segundos os geradores a *diesel* entrariam em funcionamento.

O teste visava saber com qual eficácia a turbina que estava parando, manteria as bombas de água funcionando até que o gerador entrasse em ação. Esse procedimento isolou o reator, uma vez que, com as barras de controle levantadas, seguido com pouca quantidade de água circulando no núcleo, sistemas de segurança desligados e com o aumento do vapor e da pressão interna, tais condições, impossibilitava seu controle. Estudos após o acidente indicaram que o reator se tornava altamente instável a baixa potência, sendo essa falha desconhecida pelos operadores.

Após 36 segundos, o engenheiro nuclear, chefe da equipe Anatoly Kurguza, registra o aumento de pressão e então, ordena que seja acionado o comando emergencial AZ-5 a fim de baixar as barras de controle, e assim reduzir a potência e estabilizar a reação. Entretanto, as barras de controle apesar de serem constituídas de boro, possuíam grafite na ponta e ao penetrarem no núcleo causaram aumento da potência e não redução como o esperado, com núcleo já deformado, impossibilitou o encaixe das barras, consequentemente a pressão no interior do reator disparou de 7% para 50% em 3 segundos [3].

automático) (HAWKES, et al 1986).

Com a alta temperatura no núcleo, o revestimento dos elementos combustíveis, zircônio, reagiu com o vapor, produzindo hidrogênio. O teto do reator já possuía, nessa altura, avarias que acabaram por permitir a mistura do hidrogênio com o ar atmosférico, causando 30 focos de incêndio. O grafite utilizado como moderador, incendiou-se soltando fumaça e produtos de fissão como lantânio-140; rutênio-103; céσιο-137; iodo-131; telúrio-132; estrôncio-89; estrôncio-90 e ítrio-9. Marcava 1h 23min e 48 s, quando ocorreu a explosão. A reação entre o vapor, grafite e zircônio, causou uma sequencia de explosões. Ao todo 500 toneladas de combustível, 700 toneladas de grafite e gases radioativos foram lançados na atmosfera com um vazamento radioativo que durou 10 dias [1;4].

2 CONSEQUENCIAS DO ACIDENTE

2.1 Pós-Acidente

Uma das primeiras preocupações após o acidente foi conter a radiação lançada na atmosfera que atravessava as fronteiras soviéticas. De acordo com HAWKES [1], na manhã do sábado de 26 de abril, registros da estação meteorológica nas proximidades de Chernobyl indicavam uma acentuada e súbita elevação nos níveis de radiação indicando que as nuvens contaminadas por elementos radioativos estavam migrando para o oeste e norte da Europa.

No dia 28 de abril, a 1600 km na Suécia, cerca de 700 funcionários da usina nuclear de Forsmark, ao norte de Estocolmo apresentaram contaminação nos sapatos e roupas, indicando a chegada da nuvem radioativa. Iniciou-se então uma busca para identificação da fonte emissora. Após confirmarem que o vazamento não vinha de suas usinas, suecos suspeitaram que a URSS houvesse feito testes nucleares. Entretanto, não havia registros, valores e tipos de contaminantes não indicavam esses tipos de testes. Passou a ser exigido da URSS esclarecimento sobre o que estava ocorrendo. Inicialmente, houve uma intensa recusa da união soviética em fornecer informações. Devido a isso, EUA e França passaram a utilizar satélites de alta resolução.

Os satélites norte americano, Landsat e KH – 11 quatro dias após o acidente já haviam obtido fotos indicando uma possível explosão no reator nº 4. No entanto, devido à falta de declarações oficiais do governo soviético e a intensa especulação por parte de outros países, houve uma confusa troca de informações, que alarmaram ainda mais a mídia e a população. Informações essas, também publicadas pela *United Press International*, estimavam em mais de 2 mil mortos, enquanto que o governo soviético, em boletim oficial de Moscou anunciava somente 2 mortes, além da evacuação de uma cidade e três vilarejos, sendo como medida preventiva e que as demais vítimas estavam recebendo devida assistência. Efetivamente, a contaminação radioativa atingiu tanto o leste, quanto o oeste europeu, num total de 1.500 km de distância (Fig. 2) [1;3; 4].



Figura 2. Mapa da contaminação radioativa pela Europa (direita) [2].

2.2 Vítimas

Duas horas e meia após a explosão, ainda na madrugada de sábado, tropas militares chegaram à Chernobyl a fim de iniciar a remoção da população nos arredores e controlar as áreas de acesso. Foram providenciados 1.100 ônibus para evacuação em massa de aproximadamente 20.000 habitantes de Pripyat e mais de 26.000 pessoas residentes em zonas rurais, num raio de 10 km.

De acordo com pronunciamento oficial prestado pela IAEA, em 21 de maio do mesmo ano, a primeira evacuação em massa da população de Pripyat, iniciou-se no dia 27 de abril, 36 horas após o acidente. Às 14h00min a primeira fila de ônibus entrou na cidade, sendo que às 16h20m todos já haviam sido retirados da cidade [3]. De acordo com relatórios fornecidos na época, ao todo, cerca de 46.000 pessoas foram removidas da zona de evacuação, estendida por quase 20 km, desembarcando em Kiev e sendo alojadas em casas de famílias designadas para abrigar os retirantes de Pripyat e arredores [3;4].

Dados fornecidos no ano do acidente informam que no processo de evacuação, houve vítimas mais graves, como os bombeiros e operários da usina. Desses, 18 tiveram graves queimaduras e mais 186 com lesões e ferimentos leves ou de moderada gravidade, foram transportados para hospitais de Moscou e Kiev.

Relatórios oficiais divulgados após a tragédia, produzidos na tentativa de esclarecer as reais consequências do acidente, reconhecem a demora ocorrida no reconhecimento da gravidade do acidente e conseqüentemente na evacuação dos arredores das cidades Chernobyl e Pripyat. Somente nove dias após o acidente, foi ordenada a evacuação de Chernobyl e arredores, ao todo 30.000 habitantes que foram deslocados para uma zona rural à 112 km ao sul em fazendas hospedeiras. Até meados de 1986 o número total de evacuados chegou a 92.000 pessoas [1]. Atualmente, sabe-se que esse número foi bem maior. De acordo com a IAEA [4] mais de 100.000 pessoas foram evacuadas imediatamente, sendo que o número total tem sido relatado entre 200.000 à 350.000. A média de dose acumulada para esses indivíduos chegou a 33 mSv [6].

Além da remoção, o governo soviético prestou ajuda as famílias removidas, por meio de auxílios de 200 rublos (cerca de 280 dólares), bem como crédito em lojas de roupas, alimentos e vagas em escola foram concedidas a todas as famílias [1]. Campanhas para

fornecer auxílio financeiro aos países envolvidos no acidente ainda são mantidos. Em 1995 os países que mais prestaram ajuda financeira foram: Japão, Suíça, Finlândia, República Tcheca e Eslováquia [7;8;9;10].

Equipes de emergência, liquidadores, foram convocadas para ajudar com a limpeza das instalações da usina e da área circundante. Esses trabalhadores eram em sua maioria funcionários da usina, bombeiros, além de muitos soldados e mineiros da Rússia, Bielorrússia, Ucrânia e em outras partes da antiga União Soviética. O número exato de liquidadores é desconhecido, devido à falta de registros precisos, porém por estimativas é considerado maior do que o número de evacuados. Em 1991, cerca de 600.000 pessoas receberam o *status* de “liquidadores”. Essas 600.000 pessoas receberam benefícios especiais por causa de seu envolvimento, no combate do acidente [4;7].

As atividades dos liquidadores variavam. Eles trabalharam na descontaminação e em grandes projetos de construções, incluindo estabelecimentos de assentamento de vilas para trabalhadores da usina e desabrigados. Construíram também depósitos de rejeitos, barragens, realizaram a limpeza do bloco e arredores do reator e na contenção da água do sistema de filtração, de julho a setembro de 1986, além da construção do sarcófago, de maio a novembro de 1986.

Os valores de dose absorvida por esses profissionais têm sido estudado. Alguns dos métodos tem envolvido dosimetria retrospectiva por análise da arcada dentária. Em 1998, foram coletadas amostras em todo o país e armazenadas no repositório de amostra central, para posteriormente serem analisadas. Até a data de publicação, 660 dentes de, cerca de 430 liquidadores haviam sido coletados. Após coletados, foram coletados e arquivados no *Bioprobe Central Bank*. Resultados de reconstrução de doses para 191 apresentou média de 190 mGy, doses acima de 250 mGy (nível acidental permissível), tinha sido ultrapassado por 20% dos indivíduos [11].

Relatórios publicados pela IAEA indicam que entre 1986 e 1987 240.000 liquidadores foram chamados. Ao todo 600.000 pessoas, entre civis e militares trabalharam como liquidadores, até 1990, recebendo em média 100 mSv de dose acumulada durante esse período [4;12].

Em relação ao número de vítimas, existem diferentes dados publicados, por vários meios de comunicação. Um estudo realizado em 2009 relatou a discrepância entre os números de vítimas de Chernobyl, relatados por diferentes jornais brasileiros. O estudo mostrou que a especulação por parte de jornalistas resultou em números alarmantes de vítimas, variando entre 31 a 300.000 vítimas [13].

Entretanto, os valores relatados por organismos internacionais como IAEA e UNSCEAR, têm sido mais conservadores. De acordo com o *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) 30 trabalhadores da usina morreram em poucos dias ou semanas. O número de mortos atribuídos à síndrome aguda da radiação (SAR) nos primeiros anos foi de 134. No mesmo ano do acidente, 28 pessoas morreram devido à SAR. Sendo duas mortes ainda dentro da unidade 4 do reator, devido à exposição pela radiação. Entre 1987 e 2004, ocorreram 19 mortes atribuídas a diversas causas, não necessariamente atribuídas à radiação [4;12].

Um relatório divulgado pela IAEA em 2008: “*Looking back to go forward*” [14] apresenta números definitivos relacionados as vítimas, fatais e não fatais. Entre as equipes de resgate de emergência no local do acidente, 50 pessoas morreram, seja de síndrome de radiação aguda em 1986, ou devido a outras doenças após a exposição, e aproximadamente 4.000 crianças e adolescentes contraíram câncer de tireóide devido à ingestão de leite e outros alimentos contaminados aonde, 15 dessas crianças vieram a óbito. O número de mortes atribuídas ao acidente de Chernobyl, com base em modelagens estatísticas das doses de radiação recebidas por trabalhadores e moradores locais, é de 4.000 mortes.

2.3 Reatores RBMK- Segurança

A usina de Chernobyl possuía até mais recentemente, 5 reatores. No dia 15 de dezembro de 2000, o último reator em operação no local foi fechado e atualmente segue em fase de descomissionamento. Isso envolve a remoção e eliminação de combustível e rejeitos, a descontaminação da planta e a área ao seu redor, incluindo qualquer tipo de solo e da água, que possam estar contaminados. Havia no total, três reatores aposentados que precisaram ser descomissionados. O projeto foi realizado sob a supervisão do governo ucraniano com colaboração da IAEA no planejamento, engenharia e consultoria administrativa (Tab. 2) [3;4].

Tabela 2. Reatores RBMK da Usina de Chernobyl e seu estado atualmente [15]

Reator	Unidade	Comissionamento	Capacidade (MW)	Condição atual
	1	1977	925	Fechado 1996
	2	1978	925	Fechado 1991
	3	1981	925	Fechado 2000
	4	1983	925	Destruído em 1986
	5	-	925	Construção cancelada
	6	-	925	Construção cancelada

Reator do tipo RBMK era um modelo de reator com água pressurizada opera com canaletas individuais de combustível e usa a água como seu refrigerador e grafite como seu moderador. Possuíam vantagens técnicas e econômicas, devido a isso sua concepção fazia parte de um projeto executado para a produção do plutônio e energia na antiga URSS.

Nesses reatores, onde o mesmo circuito de água atua como moderador e refrigerante, o excesso de geração de vapor reduz a desaceleração de nêutrons necessários para sustentar a reação nuclear em cadeia. Em tais casos, a redução da absorção de nêutrons como resultado da produção de vapor, e a conseqüente presença de nêutrons livres, aumenta a reação em cadeia, ocasionando o aumento da reatividade do sistema.

Medidas de segurança tomadas após o acidente de Chernobyl têm sido estabelecidas e seguidas. Todos os reatores RBMK que operam na antiga União Soviética realizaram as seguintes mudanças implementadas para melhorar a segurança operacional: a redução do

coeficiente de vazio de reatividade; melhoria da eficácia de resposta do sistema de proteção de emergência; introdução de programas de cálculo para fornecer uma indicação do valor da margem reatividade operacional (número efetivo de barras de controle restantes no núcleo) na sala de controle [15].

As medidas para reduzir o coeficiente de vazio de reatividade foram realizadas por meio da instalação de amortecedores de 80-90 fixos adicionais no núcleo para inibir a operação de baixa potência; aumento do número de barras de controle de 26-30 hastes, para 43-48; e aumento no enriquecimento do combustível a partir de 2% a 2,4% [14;15].

A eficiência e rapidez do sistema de proteção de emergência foi melhorado através da implementação de três operações de adaptação independentes:

- Arranjo de barras de controle, com um desenho que não permita a formação de colunas de água na parte inferior dos canais.
- Redução do tempo da ação da função *Scram* (desligado) para inserção da haste: De 18 para 12 segundos.
- A instalação da função *fast-acting* para proteção de emergência do sistema.

Todas essas adaptações passaram a ser testadas e implementadas nos anos seguintes ao acidente, nas usinas de Ignalina e Leningrado (os primeiros RBMK eram equipados com o novo sistema de segurança). Aos poucos os RBMK têm sido substituídos por MKER-1000. Estes são uma modificação da concepção RBMK. As principais diferenças são o espaçamento da estrutura de grafite no núcleo e a incorporação de sistemas de segurança [15].

2.4 Sarcófago e imediações atualmente

A explosão ocorrida no reator nº 4 gerou uma extensa contaminação radioativa e uma grande quantidade de rejeitos radioativos na instalação e na área circundante. De acordo com IAEA [4] 150.000 km de áreas foram contaminados na Bielorrússia, Rússia e Ucrânia. Uma área de 30 km envolta da usina é considerada até os dias atuais como zona de exclusão.

O reator nº 4 encontra-se sobre abrigo e blindagem, conhecido como “sarcófago”. De acordo com análise feita pela IAEA, o invólucro carece de manutenção. Sendo construído em menos de seis meses, é constituído de concreto maciço e aço. A deterioração, potencialmente perigosa, tem exigido vários reparos, incluindo o reforço do telhado [4].

Atualmente está em andamento a construção de uma estrutura mais segura e permanente que encobrirá o sarcófago existente, chamado de Plano de Implementação do Abrigo (*Shelter Implementation Plan- SIP*), um projeto do Fundo de Proteção de Chernobyl, administrado pelo Banco Europeu para a Reconstrução e o Desenvolvimento (*EBRD*), criado em 1997 pelo G-7. Mais governos recentemente têm contribuído com doações: Nova Iorque (Novembro de 1997), Berlin (Julho de 2000), Londres (Maio de 2005) e Kiev (abril de 2011). Iniciado no final de 2010, estima-se a conclusão em 2015, excedendo 450 milhões dólares [16;17].

Em relação a contaminação ambiental, as consequências do acidente se estenderam para terras cultiváveis, florestas, rios, peixes e animais selvagens, além de centros urbanos. Após o acidente a descontaminação dos arredores e a contenção da radioatividade do reator foi realizada a fim de evitar a disseminação da poeira radioativa e conseqüentemente a exposição

continua à radiação. Fez-se uso de películas plásticas, semelhante ao polietileno que, ao serem resfriadas, aderiam à poeira formando uma camada plástica que era descartada posteriormente. Em outras áreas, os níveis de radiação eram tão elevados, que robôs, importados da Alemanha Ocidental ou construídos por engenheiro soviéticos, foram usados para remover entulhos de regiões com altos níveis de contaminação [1]. Dados obtidos após anos de monitoração nos três países mais afetados mostram que cerca de 800.000 hectares de terras agrícolas foram contaminados e a extração de madeira foi interrompida em cerca de 700.000 hectares de floresta [14].

Atualmente, próximo a usina, uma nova floresta tem crescido, substituindo a chamada 'floresta vermelha'. Bem como também a vida selvagem. Sistemas de monitoração em tempo real têm mostrado que os níveis de exposição em humanos nas áreas contaminadas, têm caído exponencialmente. No entanto, pelas próximas décadas, 10.000 km² de terra ainda estarão contaminadas pelos radionuclídeos de meia vida longa. Alimentos como frutos e grãos, e animais, principalmente peixes, ainda continuarão contaminados por um longo período, sendo constantemente monitorados por programas realizados pelos governos russo e ucraniano (EMERCOM) [13;14].

As zonas de exclusão, caracterizadas pela elevada concentração de radionuclídeos na superfície do solo e comprometimento da agricultura local devido contaminação radioativa, têm sido constantemente monitoradas. De acordo com as avaliações feitas nos últimos anos pela IAEA, a atividade total de radionuclídeos nessas áreas é de cerca de 20 milhões de Ci [14].

Os programas de mitigação dos efeitos biológicos, explorados com mais afinco desde 1991, em parceria com a UNESCO tem realizado medidas de proteção nas principais áreas contaminadas e na população que ali ainda residem. Ações como: monitoração radiológica; redução das doses de exposição do público; remediação da agricultura local e o fornecimento de informação e reabilitação psicossocial para o público. Atualmente há 3 centros criados numa parceria entre a UNESCO e os governos locais, que já operam a mais de 10 anos. Com um total de 270.000 moradores em zonas de controle restrito e 5.000.000 em áreas contaminadas [4].

Os próprios processos naturais têm contribuído para a redução da contaminação radioativa, bem como os programas de medidas protetoras de descontaminação e monitoração de alimentos. A média de dose acumulada em até 2005 era de 50 mSv, a contar de 1986 [14;18].

A população evacuada vive principalmente nas cidades recém-construídos como Slavutich em áreas com níveis inferiores de contaminação ambiental. Em diversos casos os meios de consumo são obtidos da própria plantação e colheita de alimentos. Alguns alimentos com baixos níveis de contaminação são consumidos por países da União Europeia, como o caso de cogumelos vendidos para a Polônia. Os valores de concentração de atividade são em alguns casos, inferiores aos determinados nos países da União Europeia, tornando atrativo o consumo dos produtos ucranianos [19].

A habitação da zona de exclusão ainda é protegida por lei. Na maioria dos casos, é habitada por idosos, com idade média de 63 anos. No início de 2007, havia, de acordo com a administração da zona de exclusão da Ucrânia, 314 pessoas que se estabeleceram em várias aldeias da parte menos poluídas da zona de exclusão. Com base em considerações

radiológicas parte da zona sudoeste, atualmente já pode ser habitada. Embora alguns dos isótopos radioativos liberados na atmosfera ainda permaneçam, principalmente o estrôncio-90 e o cézio-137, os níveis de exposição são toleráveis por períodos limitados de tempo [17;19].

3. VISITAÇÃO À CHERNOBYL

Em junho de 2013 alguns autores deste trabalho realizaram uma visita em Pripjat e Chernobyl e arredores juntamente com uma equipe de apoio que rotineiramente tem acompanhado visitantes no local. A visita teve duração de 8 horas. Durante a visita o grupo foi orientado em relação ao uso de roupas adequadas, alimentação no local e tempo máximo de permanência.

O acesso às zonas de exclusão foi realizado por meio de veículos previamente autorizados e identificados e monitoração radiológica na entrada e saída das zonas. Os controles de acesso possuem detectores do tipo portal, e são monitorados por profissionais responsáveis pela radioproteção do local (Fig. 3).

A fim de se ter acesso aos locais abandonados, parte do trajeto foi realizada a pé. Nesse percurso, casas, hospitais, creches e outros ambientes foram visitados com monitores tipo *Geiger Muller*. Além desse monitor foram utilizados, durante a visita, dosímetros TLD para monitoração individual. Um dosímetro de controle foi deixado fora da zona de exclusão para posterior desconto dos valores de dose atribuídos à radiação de fundo entre os voos ida e volta: São Paulo – Madri; Madri – Paris e Paris – Kiev.

Os valores de dose obtidos durante a visita são apresentados nas Tab. 3. As doses mensuradas nos dosímetros individuais (controle e Chernobyl) no Laboratório de dosimetria termoluminescente do IPEN foram respectivamente: 0,42 e 1,01 mSv.

Tabela 3. Relação das taxas de dose e locais visitados (detector Geiger Muller)

Local	Dose $\mu\text{Sv/h}$
Chernobyl (entrada)	0,14
Chernobyl monument	0,45
Chernobyl Casa/solo	9,40
Próximo rio Pripjat	0,35
Arredores do Reator nº 4 (atrás)	2,20
Pripjat (entrada)	1,19
Reator nº frente e lateral	2,80
Pripjat (solo/jornal)	0,50
Pripjat	7,92
Pripjat (árvore)	10,30
Pripjat (escola)	190,5
Pripjat (peça de roupa)	261,8



Figura 3. Entrada zona de exclusão em Chernobyl (esquerda); monitoração pessoal na saída da zona dentro da zona de exclusão (centro) e monitoração de uma máscara de oxigênio localizada dentro de uma escola primária (direita).

Atualmente, nos 30 km que compõem uma das zonas de exclusão, encontram-se 190 pequenas comunidades compostas por alguns moradores que optaram por retornarem para suas casas. Entretanto crianças não estão autorizadas a viverem nesta área, devido às exposições ainda elevadas.

Os níveis de radioatividade são constantemente monitorados nos arredores da usina de Chernobyl. Dados em tempo real podem ser observados na *homepage* da usina. Bem como o andamento das obras da nova contenção para o reator [20].

Estima-se que a partir de 2015, parte dos assentamentos poderão ser retomados. Em 2045 todo o território abandonado pode ser usado novamente, embora em 2055 serão necessárias várias medidas preventivas para reduzir a contaminação radioativa nos produtos [19].

Uma equipe de operários responsáveis pela construção do novo confinamento para o reator nº 4 e pela gestão dos rejeitos radioativos do local tem vivido na região por meio de um sistema de alimentação e moradia coletiva mantida pelo governo local e apoio financeiro internacional (Fig. 4).



Figura 4. Vista frontal do assentamento dos operários (foto esquerda), monumento erguido em homenagem aos primeiros bombeiros a entrarem na usina durante o acidente (foto direita).

Na parte final da visita, o grupo conheceu o sarcófago e a nova contenção. A obra encontrava-se no término da segunda etapa de construção. De acordo com dados técnicos, o novo confinamento terá 165 metros de comprimento, com 260 metros extensão e, pesando mais de 30.000 toneladas. Acredita-se sua vida útil terá aproximadamente 100 anos. A estrutura é composta por redes tubulares de aço construídas em duas vigas longitudinais de concreto. A Fig. 4 apresenta fotos tiradas no local, durante a visita técnica.



Figura 4. Confinamento de segurança em construção (foto esquerda) – junho de 2013. O sistema será erguido sobre o sarcófago atual, cobrindo toda a estrutura atual (foto direita).

3. CONCLUSÕES

De modo geral, as lições aprendidas com o acidente, têm sido utilizadas na identificação dos pontos fracos e aplicadas à melhoria na segurança da concepção de novos reatores RBMK. Atualizações foram realizadas em todas as unidades RBMK para eliminar as deficiências de projeto que contribuíram para o acidente nuclear de Chernobyl, como melhorar os mecanismos de desligamento e aumentar a consciência geral de segurança entre os funcionários, tanto na segurança operacional, quanto nos sistemas de supervisão regulatória.

Observou-se também que situações concomitantes, evitaram que o acidente de Chernobyl fosse ainda pior:

- O acidente ocorreu à noite: implicando em um número menor de profissionais trabalhando e pessoas em seus lares, conseqüentemente, menor quantidade de pessoas expostas.
- Incêndio do grafite: o calor intenso lançou materiais radioativos para a atmosfera de 500 a 1000 metros de altitude. Portanto, quanto mais tempo esses elementos ficassem suspensos no ar, mais rápido decairia a radioatividade dos radionuclídeos suspensos.
- Condições climáticas: na noite do acidente havia pouco vento, a coluna de poeira radioativa subiu diretamente para camadas elevadas na atmosfera. Entretanto, essa combinação de condições climáticas acabou por levar para território europeu a contaminação radioativa principalmente na Suécia. As medições feitas nesses países causaram grande confusão, visto que, elevados índices de contaminação estavam sendo registrados nas regiões distantes da usina, mas não condiziam com as

informações locais. Mais tarde observou-se que as condições climáticas descritas acima, evitaram uma tragédia ainda maior em termos de contaminação na população.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro concedido durante a elaboração desse trabalho e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) da Universidade de São Paulo (USP) pelo apoio científico prestado.

REFERÊNCIAS

1. HAWKES, N.; LEAN, G.; LEIGH, D.; McKIE, R.; PRINGLE, P.; WILSON, A. **The Worst Accident in the World - Chernobyl: the end of the nuclear dream.** Pan Books & William Heinemann, London, 1986.
2. HYPER PHYSICIS. **Chenobyl.** Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/cherno.html>
3. CHERNOUSENKO, V. M. **Chernobyl: Insight from the Inside.** Springer-Verlag: **Berlin, 1991.**
4. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. **Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine 2003-2005.** <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>
5. UNITED PRESS INTERNATIONAL. **Chernobyl Disaster and Hands Across America.** 1986. Disponível em: <http://www.upi.com/Archives/Audio/Events-of-1986/Chernobyl-Disaster-and-Hands-Across-America/>.
6. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine". <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>
7. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "The Enduring Lessons of Chernobyl". <http://www.iaea.org/newscenter/statements/2005/ebsp2005n008.html>
8. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "Frequently Asked Chernobyl Questions". Disponível em: <http://www.iaea.org/newscenter/features/chernobyl-15/cherno-faq.shtml>
9. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "ONE DECADE AFTER CHERNOBYL". Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1001_web.pdf.

10. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "CHERNOBYL: Looking Back to Go Forward". Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCDD/Publications/PDF/Pub1312_web.pdf.
11. CHUMAK, V.; LIKHTAREV, I. SHOLMO, S.; MECKBACK, R.; KRJUCHKOV, V. **Chernobyl experience in field of retrospective dosimetry: reconstruction of doses to the population and liquidators involved in the accidente.** Radiation Protection Dosimetry. Vol 77, N° ½ pp. 91-95 (1998).
12. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. "Exposures and effects of the Chernobyl accident". Disponível em: http://www.unscear.org/docs/reports/2000/Volume%20II_Effects/AnnexJ_pages%20451-566.pdf
13. R. VICENTE; R. LÁGULA. *Reports of the Chernobyl accident consequences in brazilian newspapers.* 2009. Disponível em: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/072/41072585.pdf
14. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "Fifteen Years after the Chornobyl Accident. Lessons Learned". Disponível em: http://www.iaea.org/newscenter/features/chernobyl-15/execsum_eng.pdf.
15. WORD NUCLEAR ORGNAZATION. "RBMK Reactors". Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Appendices/RBMK-Reactors/>.
16. EUROPEAN BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT. **Chernobyl Shelter Fund.** Disponível em: <http://www.ebrd.com/pages/sector/nuclearsafety/chernobyl-shelter-fund.shtml>. Acesso em 23 março de 2014.
17. INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. "Shelter Implementation Plan Chernobyl Shelter Fund". Disponível em: <http://www.iaea.org/newscenter/features/chernobyl-15/shelter-fund.pdf>.
18. "Living environment in areas with special conditions". Disponível em: http://un.by/pdf/nhdr/1996_en_chapter_7.pdf.
19. CHERNOBYL.INFOR. Природні та штучні джерела опромінення людини за рахунок різних джерел. Disponível em: <http://www.chernobyl.info/Default.aspx?tabid=351>.
20. CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT. **Radiation Monitoring.** Disponível em: http://www.chnpp.gov.ua/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=107&Itemid=467&lang=en#top.