



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

MODELAGEM NUMÉRICA DA PISCINA DO REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO (RMB) UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Fernando Lage A. Schweizer, Amir Z. Mesquita, André Augusto C. dos Santos, Hugo C. Rezende, e Daniel Artur P. Palma

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear
(CDTN/CNEN)

Campus da UFMG – Pampulha, Belo Horizonte - Brasil

flas@cdtn.br, aacs@cdtn.br, hcr@cdtn.br, amir@cdtn.br, dapalma@cnen.gov.br

RESUMO

O Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) consiste em um reator de pesquisa do tipo piscina aberta com 30 MW de potência, atualmente em processo de construção em parceria com a Argentina. O RMB tem a finalidade de produzir um fluxo de nêutrons aplicado à irradiação de materiais para a produção de radioisótopos, testes de materiais e combustíveis.

Para proteção contra a radiação emitida pelo reator, este se encontra imerso em uma piscina cilíndrica de água que atua como uma blindagem. Para reatores de pesquisa de alta potência como o RMB, é utilizado um sistema de filtragem e aquecimento da água no topo da piscina que cria uma camada de água quente (CAQ) estratificada e purificada que evita que a água contaminada da piscina, próxima ao núcleo do reator, atinja a sua superfície, reduzindo a dose de radiação na sala do reator.

No presente trabalho é realizado um estudo do comportamento desta camada quente desde a sua formação à sua operação, em que perturbações provocadas devido aos circuitos de refrigeração e aquecimento da piscina provocam uma agitação na CAQ, o que reduz a sua proteção. Este estudo é realizado de forma numérica pela simulação de um modelo da piscina do RMB, utilizando o código comercial CFX 14.0 de Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD em inglês).

Foram avaliados nas simulações diferentes modelos de turbulência, o posicionamento e velocidade de injeção e remoção da água do circuito, a potência dos aquecedores do circuito, a temperatura de formação da CAQ e a taxa de dose de radiação teórica durante a operação do reator. É descrito também a montagem experimental em desenvolvimento no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), do circuito termohidráulico que irá simular o comportamento da camada quente da piscina do RMB.

Palavras Chaves: *Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), mecânica dos fluidos computacional (CFD), reator nuclear de pesquisa, camada de água quente.*

REFERÊNCIAS

- [1] ANSYS CFX-14.0, User manual, ANSYS-CFX, 2012.
- [2] CNEN, Geração de Seções de Choque para o Primeiro Núcleo do Reator Multipropósito Brasileiro, Relatório Técnico: RMB-10100-RD-003.00. 2010.
- [3] SAR, Safety Analysis Report for ANSTO Replacement Research Reactor Facility, 2004.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

É meta da Comissão Nacional da Energia Nuclear (CNEN) a construção do Reator Multipropósito Brasileiro – RMB que será projetado, construído e operado para atender as atuais necessidades brasileiras para a produção de radioisótopos, teste de materiais, e pesquisa na área nuclear [1]. O contrato se insere no âmbito dos acordos de Cooperação Bilateral para o desenvolvimento de usos pacíficos da Energia Nuclear e na declaração conjunta firmada pelos governos do Brasil e Argentina em 2008. A empresa contratada é a argentina INVAP, que está projetando, naquele país, um reator semelhante ao RMB, como parte dos referidos acordos de cooperação. A INVAP foi responsável pelo projeto do reator de pesquisas australiano OPAL (*Open Pool Australian Light-water*), inaugurado em 2007, que servirá de referência para o RMB e o novo reator argentino [2].

O RMB terá 30 MW e será do tipo piscina aberta imerso em água leve desmineralizada, que garante proteção contra a radiação gerada no núcleo do reator. Protege também o núcleo contra superaquecimento e ao mesmo tempo possibilita acesso pelo topo da piscina, podendo manipular o seu combustível e as amostras que serão irradiados. Neste tipo de reator de pesquisa de elevada potência, é usual a utilização de um circuito de purificação e aquecimento da água no topo da piscina, criando uma camada estratificada que impede que a água próxima ao reator atinja a superfície da piscina, o que elevaria a dosagem de radiação na sala do reator. O projeto do RMB (30 MW) é baseado no reator OPAL (20 MW). Mas serão necessárias modificações em seu projeto, para o reator comportar a maior potência e obter uma concepção que atenda aos propósitos brasileiros [3] [4].

Para a sua construção, torna-se necessário um estudo de todos os seus componentes e sistemas para o seu correto dimensionamento e definições do projeto. Medições experimentais são proibitivas nas etapas iniciais do projeto devido ao seu custo e complexidade. Uma forma alternativa de se realizar estes estudos é por meio da utilização de ferramentas computacionais como o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) [5].

Neste trabalho é estudado o escoamento na piscina do reator, com o objetivo de se analisar o comportamento da camada de água quente gerada no topo da piscina. As simulações são realizadas por meio da criação de um modelo do RMB, a partir de dimensões obtidas em referências que detalham a geometria do OPAL, alterando algumas características de acordo com definições do projeto brasileiro. Com a geometria do modelo definida, é gerada uma malha para a discretização do modelo e aplicação das equações de transporte via o programa computacional. Para isso, são definidas condições de contorno apresentando valores de vazão, temperatura e propriedades dos materiais aplicados ao modelo através de referências obtidas de outros reatores



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

e adaptando-as às características do RMB. Com a simulação, espera-se analisar os distúrbios causados na Camada de Água Quente (CAQ) pelos circuitos de refrigeração do reator, verificando o quanto estes distúrbios interferem na estratificação da CAQ e quais são as consequências para a proteção radiológica da sala do reator. São verificadas diferentes configurações de temperatura e injeção do circuito da CAQ para garantir sua estabilidade ao longo da operação do reator o que permitirá um pré-projeto do sistema da CAQ.

2. O REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO (RMB)

A Figura 1 apresenta um desenho das estruturas principais do RMB detalhando o posicionamento de seus componentes. A chaminé conecta o *Plenum* inferior à tubulação de saída de água localizada em sua lateral. Em sua parte superior há uma abertura que dá acesso ao núcleo pela piscina, possibilitando a manipulação e visualização dos elementos combustíveis. Dentro da chaminé, em sua parte inferior, está localizado o núcleo do reator [1]. A água que passa pelo núcleo tem função refrigerante e moderadora de nêutrons. Em torno do núcleo, há o tanque de água pesada por onde passam as tubulações para refrigeração dos dispositivos de irradiação aí instalados.

2.1 Sistemas de Refrigeração

Devido à grande potência térmica do reator é necessária a refrigeração forçada de seus elementos combustíveis, o que é realizado pelo circuito primário de refrigeração. A vazão de água deve garantir a integridade térmica do combustível e não provocar vibração e arraste das placas combustíveis. Neste circuito a água entra por duas tubulações no *Plenum* inferior do reator, sendo direcionada aos elementos combustíveis pelos bocais em sua parte inferior passando por entre as placas de combustível, retirando calor e atuando como moderador. Para sair do núcleo a água passa por uma tubulação lateral da chaminé sendo direcionada aos sistemas de purificação e trocadores de calor externos à sala do reator.

2.2 Sistema de Camada de Água Quente

No topo da piscina, um circuito adicional de aquecimento e purificação injeta água, por meio de difusores, a uma temperatura mais elevada que o restante da piscina e succiona água 1,5 metros abaixo do nível de injeção, criando uma camada de água quente estabilizada no topo da piscina do reator. Esta camada atua como uma barreira impedindo que a água contaminada com partículas radioativas na piscina atinja a superfície por movimento de convecção, o que elevaria a dosagem de radiação na sala do reator. Esta instalação é usual nos reatores de pesquisa de potências

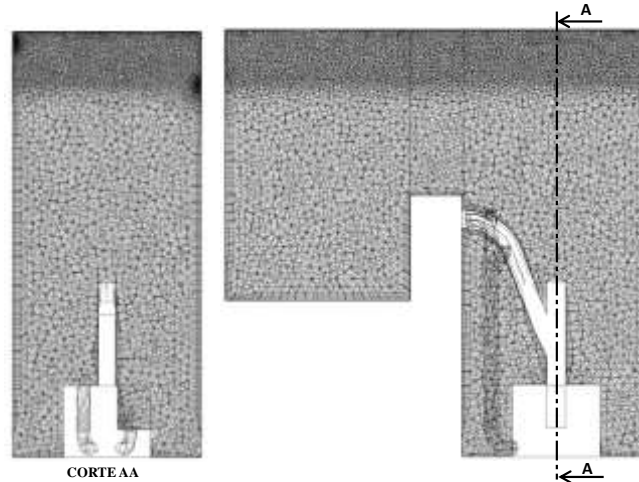


Figura 2. Plano longitudinal e corte da malha para simulação da formação da CAQ.

4. RESULTADOS

4.1. Avaliação do modelo de turbulência utilizado.

O gráfico da Figura 3 demonstra a variação da espessura da CAQ na simulação de operação do reator utilizando diferentes modelos de turbulência. Observou-se que, utilizando o modelo RS- ω , a CAQ apresentou menor mistura com a água da piscina. Uma provável razão para isto é o fato do modelo ser capaz de captar a anisotropia da turbulência na interface termicamente estratificada da CAQ com a piscina e assim estimar uma menor mistura.

Os modelos SAS e SST apresentaram resultados similares, o que indica que as escalas turbulentas capturadas pelo modelo SAS para o tamanho da malha e passo no tempo adotados não afetaram de forma significativa a mistura da CAQ. A diferença na espessura da CAQ encontrada entre o modelo k- ϵ e o SST revela que houve influência de parede em seu escoamento. Avaliou-se que a menor espessura da CAQ calculada utilizando o modelo k- ϵ pode ter duas razões:

- 1- A camada apresentou uma maior viscosidade turbulenta, permanecendo estratificada no topo, enquanto nos outros modelos houve uma maior mistura fazendo a camada se expandir, levando o critério da diferença de 5 °C para uma posição mais profunda.
- 2- A camada apresentou uma maior mistura, fazendo com que a sua parte inferior se resfriasse, elevando a altura onde o critério de diferença de 5 °C é atendido.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

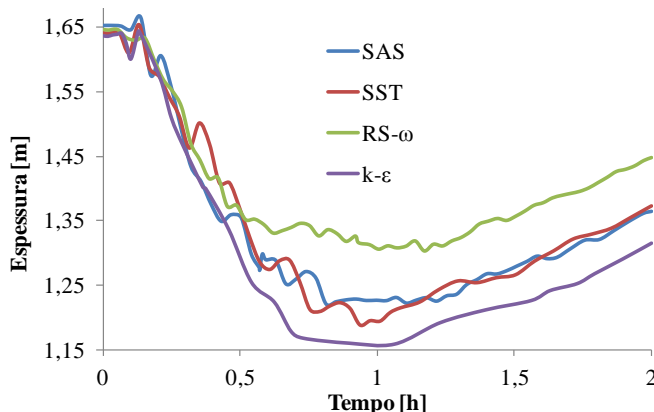


Figura 3. Espessura média da CAQ para diferentes modelos de turbulência.

Por meio dos gráficos da Figura 4, que mostram a variação da temperatura da CAQ ao longo de sua altura, em dois momentos da operação do reator, observou-se que a razão do modelo k-ε apresentar menor espessura foi a maior mistura na camada, evidenciado pelo perfil da curva da variação da temperatura pela altura que é mais gradual na primeira hora de operação que nos outros modelos avaliados.

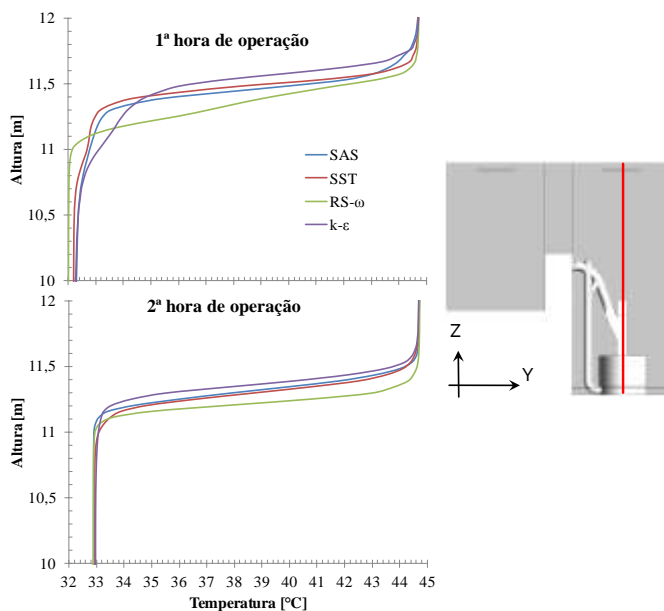


Figura 4. Perfil de temperatura da CAQ para diferentes modelos de turbulência.

Como não há um resultado experimental para realizar uma comparação entre os valores numéricos dos modelos para levantar qual deles reproduz melhor o fenômeno de estratificação da CAQ, adotou-se para todas simulações o modelo k-ε. Este modelo resulta em uma maior mistura da



camada, o que tende para o lado da segurança na avaliação da blindagem radiológica para as diferentes configurações do sistema.

4.2. Avaliação do posicionamento das janelas da CAQ

Após a simulação da piscina, para os quatro casos de injeção e sucção do sistema da CAQ, pôde-se observar que a diferença de temperatura entre os dois volumes, mostrados na Figura 5, nas quatro configurações foram superiores a 5 °C, valor de referência na literatura para garantir a estratificação entre a CAQ e a piscina.

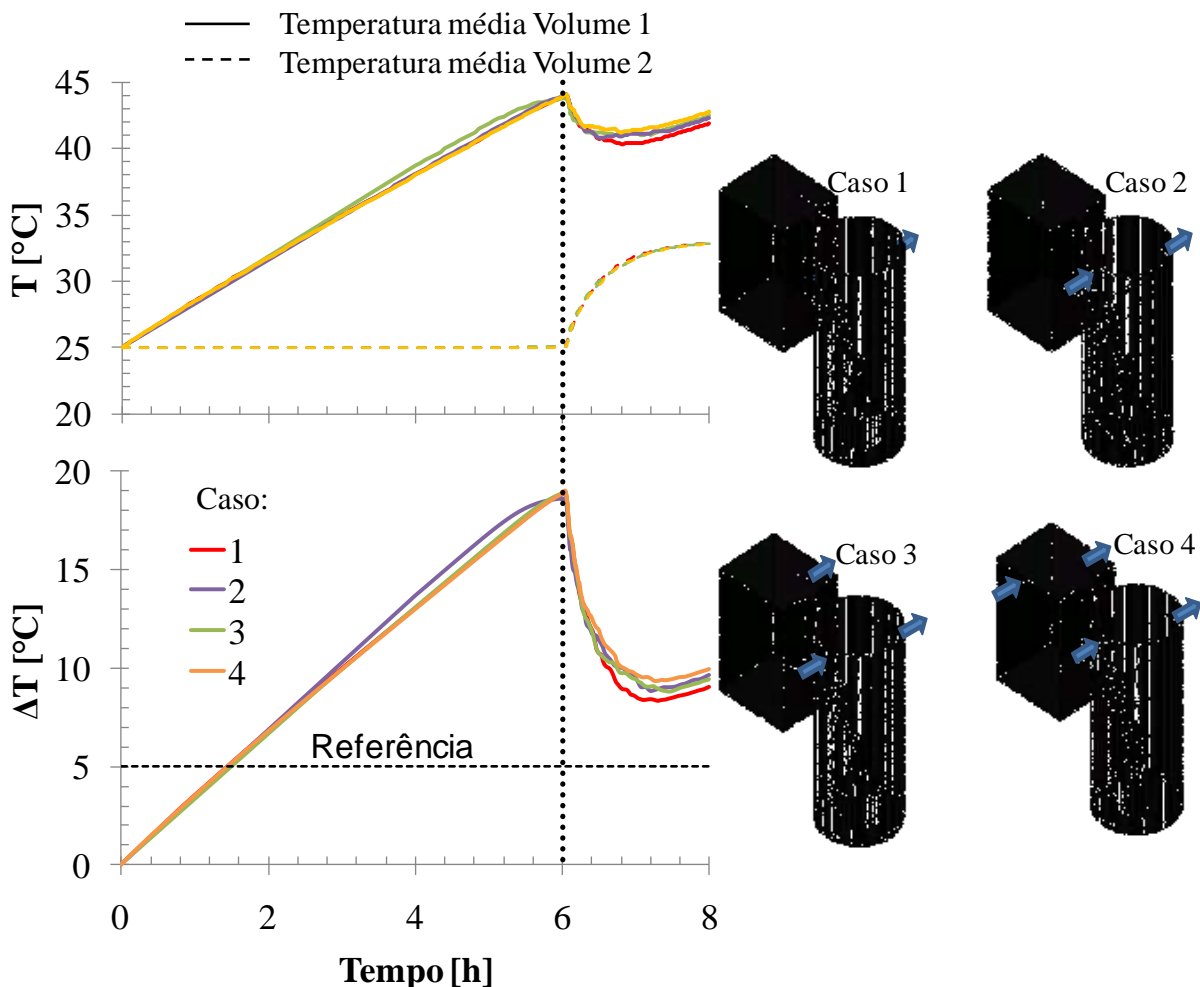


Figura 5. Gráfico da variação de temperatura na Piscina e CAQ do RMB.

Observa-se que as 6 primeiras horas corresponde ao período de formação da CAQ em que o reator e seus sistemas de refrigeração encontram-se desligados. A Figura 6 apresenta a espessura da CAQ durante a operação do reator.

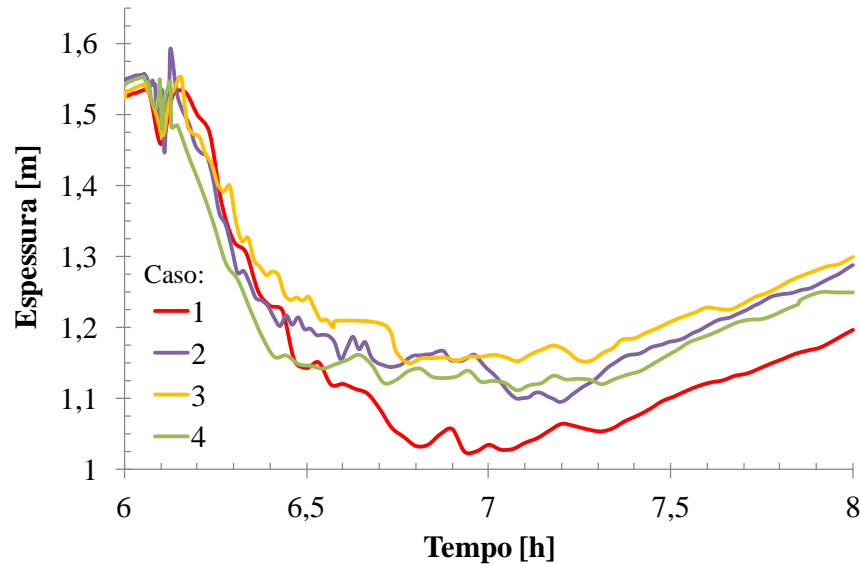


Figura 6. Espessura média da CAQ durante a operação do reator.

O Caso 3 apresentou maior espessura média dentre os casos estudados. Como qualquer posição testada satisfaz as condições de operação da CAQ, a recomendação é que a configuração do caso 3 seja adotada. Esta configuração apresenta uma única região de injeção na piscina do reator, o que simplifica a tubulação e garante o aquecimento da região que sofre maior perturbação, e duas retiradas, uma em cada piscina, o que possibilita uma boa captação para purificação da água em ambas as piscinas.

A Figura 7 apresenta a distribuição de temperatura e a direção dos vetores de velocidade na região superior da piscina do reator extraída do plano transversal xz. Observa-se neste plano para cada caso a influência da velocidade de injeção na CAQ.

No Caso 1, a velocidade de injeção foi de 0,0185 m/s e a velocidade média no plano transversal xz após 2 horas do início de operação 0,0065 m/s e no Caso 2 a velocidade de injeção foi de 0,2951 m/s e a velocidade média no plano 0,023 m/s. A velocidade média na piscina na região inferior a CAQ em ambos os casos foi de 0,0015 m/s.

Analisando os vetores de velocidade, observou-se que no momento em que a camada está estabilizada o escoamento da piscina não se comunica com o escoamento da CAQ sendo-os barrados na sua interface. Porém, a maior velocidade de injeção acarretou em uma maior mistura na CAQ que pôde ser observada pela menor temperatura no Caso 2. Desta forma adotou-se a janela de maior área para evitar esta mistura preservando a CAQ estratificada e purificada.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

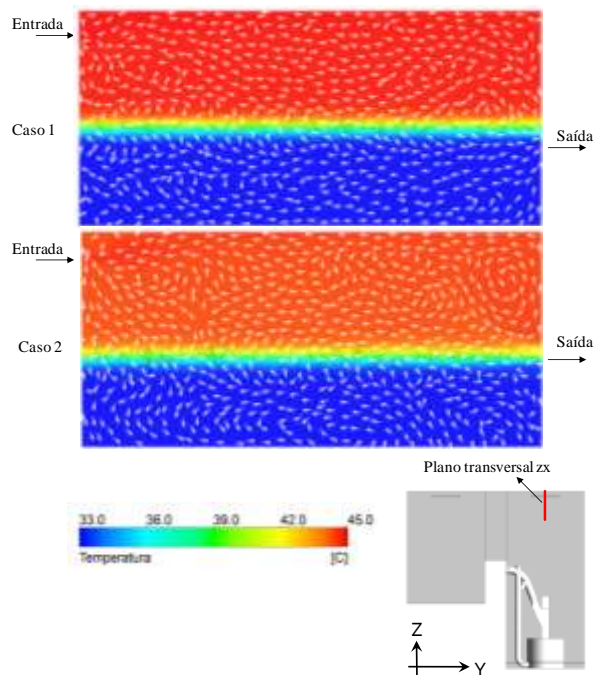


Figura 7. Vista do plano transversal da piscina do RMB após 2 horas de operação.

4.3. Avaliação da temperatura de injeção da CAQ

O gráfico da Figura 8 apresenta a altura média da CAQ durante o regime de operação do reator. Neste gráfico foi feito uma comparação do tempo de restabelecimento da CAQ inicialmente formada a 45°C, para diferentes valores de potência do aquecedor.

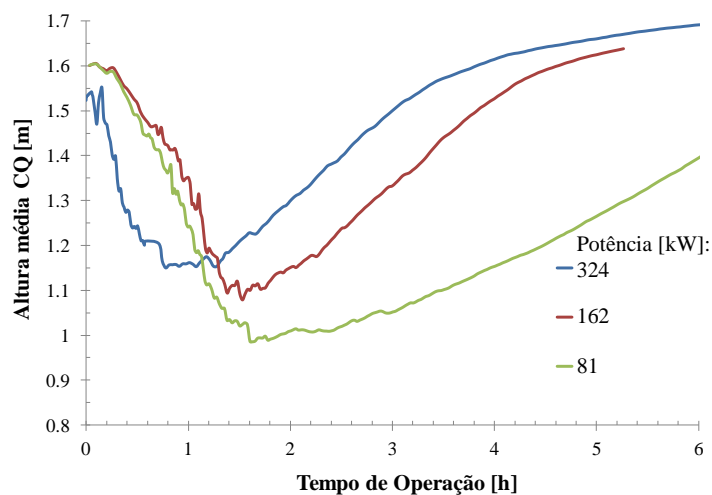


Figura 8. Altura média da CAQ, inicialmente a 45°C, durante a operação do reator para diferentes potências de aquecimento.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Observou-se que para esta situação, para os três valores de potência dos aquecedores, a CAQ manteve-se estabilizada acima de 1,0 m, retornando à altura inicial nos seguintes tempos:

324 kW em 3 horas; 162 kW em 5 horas e 81 kW superior a 9 horas (estimado).

Analisando o ponto de mínima altura observou-se que a curva para a potência de 324 kW estava defasada à esquerda. Esta diferença se deu pela condição de contorno, onde nas outras curvas foi implementada a função de potência que fez com que a temperatura de injeção da água no circuito da piscina variasse de 25 °C a 33 °C em uma hora, enquanto para a potência de 324 kW a temperatura inicial foi instantaneamente 33 °C, o que resultou em uma perturbação prematura.

No gráfico da Figura 9 foi analisada a influência da temperatura de formação da CAQ com um valor fixo de potência do aquecedor de 162 kW para avaliar o comportamento da CAQ e para a otimização do sistema de aquecimento de modo a demandar uma menor potência e tempo de formação da CAQ.

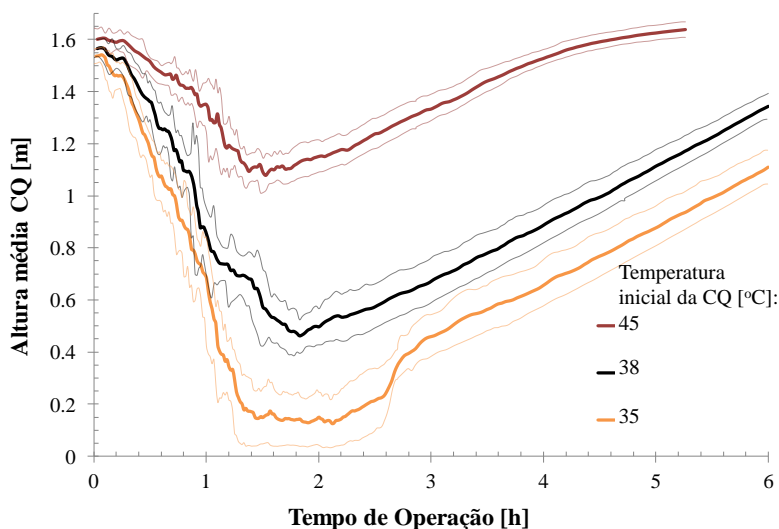


Figura 9. Altura média da CQ da Piscina do RMB durante a operação para aquecimento de 162 kW, variando a temperatura de formação da CAQ.

Observou-se que para a CAQ a 35 °C ocorreu a sua destruição após a primeira hora de operação, retornando a um valor superior a 1 metro de espessura após 6 horas de operação. Isto demonstra que para uma maior proteção é recomendado um aquecimento de 45 °C, que pode ser feito por um circuito de maior potência ou por um maior período de formação da CAQ. As linhas mais claras no gráfico representam o desvio padrão das medidas de altura da CAQ em cada nó, indicando a sua flutuação em cada instante da operação.



Na Figura 10 é mostrada a distribuição da temperatura no plano longitudinal do modelo após 2 horas de operação, instante em que a CAQ apresenta maior perturbação para as três situações propostas no gráfico da Figura 10. Como pôde ser observado para a situação em que a diferença de temperatura entre a CAQ e a piscina foi menor do que 5 °C, neste caso a camada a 35°C e a piscina a 33°C, a CAQ é destruída pelas perturbações na piscina.

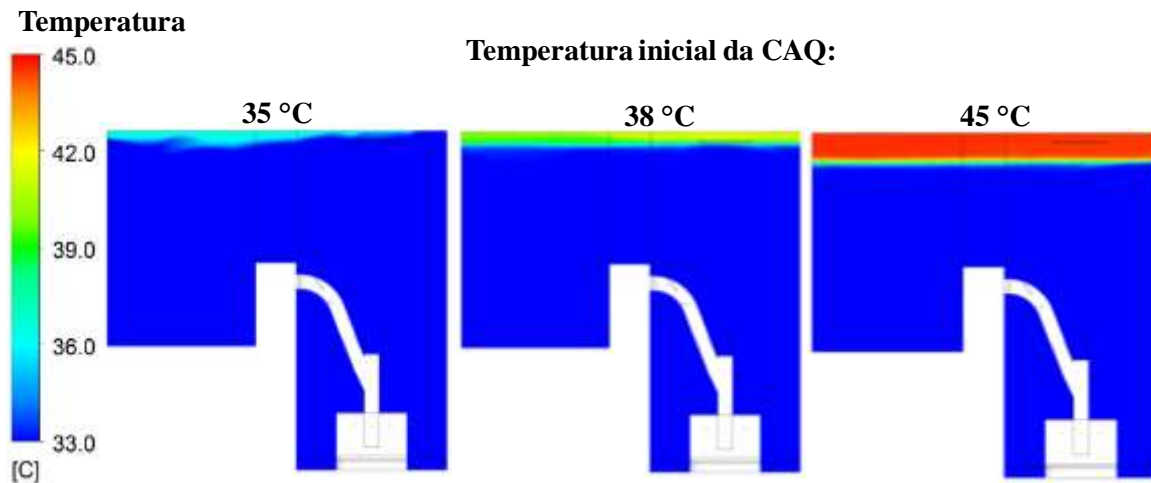


Figura 10. Distribuição de temperatura na piscina do RMB após 2 h de operação para a CAQ formada a 35, 38 e 45 °C.

Analisando o comportamento na CAQ durante a operação do reator, verificou-se que a causa de perturbação na CAQ se deu pela água aquecida injetada na base da piscina, que acelerada pelo empuxo conseguiu misturar a água da piscina com a parte inferior da camada estratificada. Após a estabilização da temperatura da piscina, verificou-se que a CAQ se reestabelece, onde o escoamento ocasionado pelo circuito de refrigeração da piscina e a vazão induzida na chaminé do reator não foram suficientes para perturbá-la. O tempo de Formação da CAQ, considerando a piscina a uma temperatura inicial de 25 °C, para as situações propostas nas Figuras 8 e 9 foram calculadas a partir da Equação 1, obtendo os seguintes resultados, listados na Tabela 1.

$$t_{aquec} = \frac{V_{CAQ} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{P_{aquec}} \quad (1)$$

Onde V_{CAQ} é o volume ocupado pela CAQ, considerando a sua altura de 1,5 metros no topo da piscina; ΔT é a diferença de temperatura entre a injeção e a sucção do circuito da CAQ e P_{aquec} é a potência nominal do aquecedor do circuito da CAQ.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Considerando que o sistema da CAQ não será desligado, garantindo a blindagem e purificação da piscina para redução da taxa de dose mesmo com o reator desligado, o maior tempo para a formação da CAQ a 45 °C, mostrado na Tabela 1, não deverá comprometer a disponibilidade do RMB, já que a formação só ocorrerá durante a primeira operação do reator. Após a água atingir a temperatura configurada, os aquecedores são desligados, sendo acionados apenas para a manutenção da temperatura da CAQ devido às perdas térmicas para a atmosfera e para a piscina.

Tabela 1: Tempo de Formação da CAQ

Temperatura CAQ [°C]	Potência Aquecedor [kW]	Tempo de Formação [h]
45	324	5,6
	162	11,2
	81	22,4
38	162	7,2
35	162	5,6

4.4. Avaliação da taxa de radiação na superfície da piscina

O gráfico da Figura 11 mostra a variação da taxa de dose de radiação teórica na superfície da piscina do reator durante a operação para as de potências de aquecimento e temperatura inicial da piscina simulada [8]. Observa-se que a maior emissão de radiação na superfície da piscina corresponde ao período entre a primeira e segunda hora de operação. Neste período a água injetada pelo circuito de refrigeração da piscina a uma temperatura superior à piscina atinge a CAQ causando uma mistura em sua parte inferior, reduzindo a sua espessura. Após este período as temperaturas da piscina e da água injetada pelo seu circuito de refrigeração se estabilizam, permitindo que a CAQ volte a se desenvolver reduzindo a taxa de dose de radiação na superfície da piscina. A Figura 11 revela uma variação de 28 vezes entre o valor para CAQ formada a 45°C com o aquecedor de 324 kW e a formada a 35 °C com o aquecedor de 162 kW. A Tabela 2 apresenta a taxa de dose média no intervalo de 6 horas desde o início da operação do RMB. Esta situação de ligamento do reator apresenta a situação de maior emissão por parte da piscina do reator.

Tabela 2: Taxa de dose média durante ligamento do RMB.

Temperatura CAQ [°C]	Potência Aquecedor [kW]	Taxa de dose de radiação média [mSv/h]
45	324	0,00352
	162	0,00414
	81	0,00714
38	162	0,02813
35	162	0,08004



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

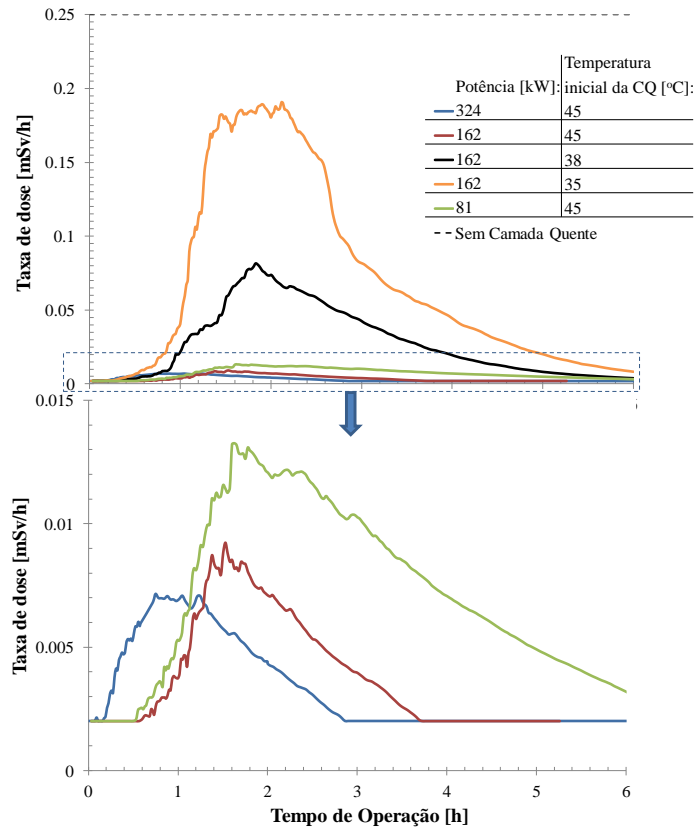


Figura 11. Taxa de dose de radiação na superfície da piscina do RMB.

Baseado no reator *OPAL* que opera em ciclos de 30 a 35 dias, 8 vezes ao ano [9], estimou-se a dose anual para cada configuração da CAQ, utilizando a Equação 2 (Tabela 3).

$$S_{anual} = \bar{S}_{inicial} \cdot 6[h] \cdot 8[acionamentos] + 0,002[mSv/h] \cdot (210 * -8)[dias] \cdot 6*[h/dia] \quad (2)$$

*Valores estimados

Estes valores estimados levaram em conta uma aproximação do número de dias trabalhados e o tempo em que o operador se expôs à piscina do reator, destes, oito foram durante o acionamento do reator.

Analisando a dose anual para as configurações propostas na Tabela 3, em todas as situações a CAQ foi suficiente para abaixar a dose a níveis adequados abaixo do máximo permitido por norma equivalente a 20 mSv/ano. Porém, nesta simulação a metodologia de cálculo da blindagem promovida pela CAQ se deve pela diferença de temperatura desta camada o que não reproduz a mistura de água contaminada na piscina com a água da CAQ, como pôde ser observado na Fig. 10, onde pela imagem observou-se que a CAQ pode ser destruída.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Tabela 3: Estimativa da dose anual na superfície da piscina do RMB.

Temperatura CAQ [°C]	Potência aquecedor [kW]	Dose anual [mSv/ano]
45	324	2,593
	162	2,623
	81	2,767
38	162	3,774
35	162	6,266

Apesar da CAQ a 35 °C teoricamente garantir uma dose adequada, recomenda-se adotar uma temperatura inicial da CAQ de 45°C para evitar a mistura da camada com a água da piscina. Quanto a potência do aquecedor do sistema da CAQ, o aquecedor de 81 kW foi capaz de produzir e manter a CAQ, verificando que não há necessidade de uma maior potência de aquecimento, sendo o fator determinante para a estratificação a temperatura de formação da camada.

O sistema da CAQ é um circuito de proteção do ambiente externo ao reator, devendo ser dimensionado com redundância, utilizando duas bombas e dois aquecedores. Recomenda-se pois, a utilização de dois aquecedores de 81 kW que podem ser utilizados em conjunto para a formação da CAQ com 162 kW de potência térmica [10] [11]. Desta forma é garantido que na falha de um aquecedor o outro é capaz de gerar e manter a CAQ.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo do sistema da camada de água quente (CAQ) no topo da piscina do reator de pesquisa RMB. Foram realizadas simulações numéricas por meio de cálculos de mecânica dos fluidos computacional para avaliar a influência do escoamento na piscina do reator na CAQ. Foram analisados diferentes modelos de turbulência, o posicionamento e velocidade de injeção e remoção da água do circuito, a potência dos aquecedores do sistema da CAQ, a temperatura de formação da camada e a taxa de dose de radiação teórica no topo da piscina durante a operação do reator.

Dos modelos de turbulência testados, o modelo k- ϵ foi adotado por este resultar em uma menor espessura da CAQ durante as simulações. Foram testadas quatro diferentes posicionamentos para a injeção e remoção da água da CAQ. Adotou-se a configuração de uma única entrada na piscina do reator com injeção de água a baixa velocidade. Esta configuração apresentou baixa mistura na região da CAQ e maior aquecimento na piscina do reator. Saídas foram posicionadas na piscina de serviço e do reator a 1,5 metros de profundidade para garantir a purificação da água da CAQ.

Foram testados três potências de aquecedores, 324 kW, 162 kW e 81 kW. As três potências foram suficientes para a manutenção da CAQ. Por se tratar de um sistema de proteção, recomenda-se

dois aquecedores de 81 kW, atuando em conjunto na formação da CAQ e em redundância durante a operação do reator.

REFERÊNCIAS

- [1] CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Geração de Seções de Choque para o Primeiro Núcleo do Reator Multipropósito Brasileiro, Relatório RMB-10100-RD-003.00. 2010.
- [2] CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <http://www.cnem.gov.br/noticias/noticia.asp?id=1430> , Acessado em 30.04.2014.
- [3] ANSTO. Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for ANSTO Replacement Research Reactor Facility. 2001.
- [4] ANSTO. Safety Analysis Report (SAR) for ANSTO Replacement Research Reactor Facility. 2004.
- [5] ANSYS CFX-14.0, User manual, ANSYS-CFX. 2012.
- [6] Navarro, M. A. Descrição de sistema – Camada quente e purificação. CNEN. Relatório Técnico: RMB-11200-MS-001. 2010.
- [7] Metcalf, P., Distributed Control system: Linear design options and analysis for a reactor hot layer system, IEEE International Conference on Control applications, p. 2421-2425. 2010.
- [8] British Standard 4094. “Recommendation for data on shielding from ionizing radiation. Part 1. Shielding from gamma radiation”. British Standards Institution. 1966.
- [9] ANSTO, Disponível em: <http://www.ansto.gov.au> . Acessado em 02.03.2014.
- [10] Shokr, A. M., Performance analyses of the pool-top radiation level reduction system at the ETRR-2 research reactor. Kerntechnik, vol. 71, p. 130-133. 2006.
- [11] Lee, S. et al. Reduction of the pool-top radiation level in HANAR”, JAERI –conf, p. 124 – 129. 1999)

Agradecimentos

Esta pesquisa é apoiada pelas seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).