

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**CARLOS ALBERTO DE FREITAS**

**SIMULAÇÃO DA RETIRADA DE CALOR EM UMA PISCINA ATRAVÉS DA  
CONVECÇÃO NATURAL**

**Rio de Janeiro**

**2014**

Carlos Alberto de Freitas

**SIMULAÇÃO DA RETIRADA DE CALOR EM UMA PISCINA ATRAVÉS DA  
CONVEÇÃO NATURAL**

Dissertação submetida ao programa  
de Pós Graduação em Ciência e  
Tecnologia Nucleares do Instituto de  
Engenharia Nuclear da Comissão  
Nacional de Energia Nuclear como  
parte dos requisitos necessários para  
a obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências em Engenharia Nuclear –  
ênfase Acadêmica em Engenharia de  
Reatores.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Maria de Lourdes Moreira

Co-Orientador: Prof. João Jachic

Rio de Janeiro

2014

FREI Freitas, Carlos Alberto.

Simulação da retirada de calor em uma piscina através da convecção natural / Carlos Alberto de Freitas – Rio de Janeiro: CNEN / IEN, 2014.

xvi, 75 f.: il.. ; 31 cm

Orientadores: João Jachic e Maria de Lourdes Moreira

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2014.

1. Evolução temporal.
2. Região Motora.
3. Formação do tubo de Corrente.
4. Retirada de calor.
5. Evaporação na superfície da piscina.

kkk  
kkk

**SIMULAÇÃO DA RETIRADA DE CALOR EM UMA PISCINA ATRAVÉS DA  
CONVEÇÃO NATURAL**

Carlos Alberto de Freitas

**“DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA  
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE  
ACADÊMICA EM ENGENHARIA DE REATORES”**

Aprovada por:

Prof<sup>a</sup>. Maria de Lourdes Moreira – IEN/CNEN

Prof. João Jachic – IEN/CNEN

Prof. Zelmo R. Lima – IEN/CNEN

Prof. Wallace Vallory Nunes – IFRJ

D. Sc. Alzira Abrantes Madeira – CNEN - Sede

É sinal de uma mente instruída se satisfazer com o grau de precisão que a natureza do objeto permite e não perseguir uma exatidão quando apenas uma aproximação da verdade é possível.  
(Aristóteles)

Aos meus pais, Rubem  
e Aniceta, que sempre  
estimularam em seus filhos  
(Paulo e Carlos) e filha  
(Ana) a vontade de saber.

Aos meus filhos, Sérgio  
e Sílvia que sempre tiveram  
orgulho de serem meus  
filhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus irmãos (Paulo e Ana), meus filhos (Sérgio e Sílvia) e minha sobrinha (Tatiana) por todo o apoio recebido durante o tempo em que fiz este mestrado.

Aos meus alunos, aos professores e funcionários, de todos os níveis do Instituto Federal do Rio de Janeiro, que me incentivaram a concluir este trabalho.

Aos meus professores de todos os tempos: desde o pré-escolar, Sra. Marlene, às professoras da Escola Municipal Professor Carneiro Felipe, Prof<sup>a</sup> Helena Lacerda, Prof<sup>a</sup> Layse, Prof<sup>a</sup> Marília e Prof<sup>a</sup> Nelma, aos professores do Colégio Pedro II do antigo ginásial no Engenho Novo, do antigo Científico no Centro e aos meus professores da Universidade Federal Fluminense, em Niterói, dentre os quais cito: José Antônio, Glória Maria e Wilson Lagalhardi entre outros tantos, que me possibilitaram chegar até aqui e, quem sabe, ir adiante e pelos quais, ter sido aluno dos mesmos, é motivo de enorme orgulho.

Aos meus professores do mestrado que muito me ajudaram a compreender melhor as estruturas e relações da física e da matemática e suas aplicações nos reatores nucleares e, a confiar nos reatores nucleares em atividade no mundo, assim como a expansão dos estudos em reatores nucleares.

E finalmente agradeço muito aos meus orientadores Prof<sup>a</sup> Maria de Lourdes Moreira e Prof. João Jachic que muito me auxiliaram e deram condições de chegar neste momento de suma importância para mim.

## RESUMO

Um dos modos de resfriamento de uma fonte de calor, tal como um reator nuclear desligado é a convecção natural. As especificações e o formato de uma piscina de resfriamento só podem ser feitas quando a taxa de remoção de calor e a taxa de fluxo de massa correspondente são razoavelmente estabelecidas.

Em nosso trabalho de simulação, foi assumido que as forças que atuam no corpo, que é uma célula cúbica de água, são: o peso, a força de arrasto, as forças de pressão integradas nas superfícies horizontais, as forças de cisalhamento de viscosidade, nas superfícies verticais. Adicionalmente admitimos uma força de arrasto especial de viscosidade devido ao deslocamento da massa ao longo da piscina formando um tubo, como se fosse um tubo de corrente de Bernoulli, fora da região motora. Para um intervalo de tempo adequado, a velocidade de ascensão devido à convecção é determinada por um algoritmo cuja solução é calculada de duas formas: uma implícita e outra explícita. A equação diferencial resultante depende da atualização da massa específica, da viscosidade dinâmica e do coeficiente de calor específico à pressão constante, calculada com a última temperatura conhecida na célula que absorveu calor. Um software de cálculo numérico foi desenvolvido utilizando a linguagem de computação técnica do MATLAB e, então aplicado a uma placa geradora de calor que tem o intuito de simular o núcleo de um reator, cujo combustível ainda está irradiando, como no caso de uma central nuclear desligada. Nossa sistema de refrigeração é composto de uma piscina e de um sistema exaustor, de forma que o calor retirado junto ao vapor de água não fique aprisionado, o que causaria um aumento da pressão e consequente queda na retirada de calor devido ao aumento da umidade do ar.

Os resultados mostram a evolução temporal da convecção, da distribuição de temperatura da água e da velocidade de ascensão a qual tende para valores constantes ao longo do tempo de operação. As dimensões da piscina, bem como a quantidade de água que efetivamente evaporou dessa piscina, também são determinadas para várias condições do sistema de

exaustão de ar e a taxa de retirada de calor da placa geradora de calor que está sendo resfriada localmente.

## ABSTRACT

One of the cooling modes for any source of heat such as in a shutdown nuclear core is the natural convection. The design specifications of any cooling pool can only be done when the removal heat rate and the corresponding mass flow rate is reasonably well established. In our simulation scheme, we assumed that the body forces acting in the cubic water cell are: the weight, the drag force and the integrated pressure forces on the horizontal surfaces, the viscosity shear forces on the vertical surfaces and also a special viscosity drag force due to the mass dislocation along a Bernoulli type current tube outside the motive region.

For a suitable time step, the uprising convection velocity is determined by an implicit and also by an explicit solution algorithm. The resulting differential equation depends on updating specific mass, dynamic viscosity and constant pressure heat coefficient with the last known temperature in the cell that absorbed heat. A numerical calculation software was devised using MATLAB's technical computing language and then applied for a heat generation plate simulating a spent fuel assembly from a shutdown nuclear core.

The results show time evolution of convection, water temperature distribution and terminal velocity. Pool dimensions as well as pool level decrement are also determined for various air exhausting system conditions and heat rate of the spent fuel plate being cooled.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1. $\mathbf{L}_{pr}$ – vetor que nos dá as dimensões x, y e z da piscina de refrigeração por convecção natural com água leve .....	22
2. $\mathbf{L}_{pg}$ . – vetor que nos fornece as dimensões x, y e z da placa geradora de calor imersa na piscina. $\mathbf{L}_{pg} = [\mathbf{L}_{pgx} \mathbf{L}_{pgy} \mathbf{L}_{pgz}]$ .....	22
3. $h_{apg}$ – altura do apoio da placa geradora .....	22
4. $V_c$ = volume de controle da célula .....	23
5. $S_c$ = superfície de controle da célula .....	23
6. $r$ = posição da célula no sistema de referência da piscina .....	23
7. $v$ = velocidade linear da célula no sistema de referência da piscina .....	23
8. $\omega$ = velocidade angular da célula.....	23
9. $T$ = temperatura média da água no volume $V_c$ da célula .....	23
10. $\mu$ - viscosidade dinâmica da água .....	23
11. $\rho$ - massa específica da água .....	23
12. $c_p$ – calor específico à pressão constante .....	23
13. RM – região motora.....	25
14. $\beta$ - fator de compressibilidade da água.....	27
15. TC – tubo de corrente.....	29
16. $\mathbf{F}_g$ – forças gravitacionais .....	30
17. $\mathbf{F}_p$ – forças integradas de pressão .....	30
18. $\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_d$ – forças resistentes de arrasto .....	30
19. $\mathbf{F}_v$ – forças de viscosidade.....	30
20. $v_{ar} = v_{Ar}$ – velocidade do ar na superfície da piscina.....	38
21. $x$ – umidade média no ar .....	38
22. $p_w$ – pressão parcial da água .....	38
23. $p_a$ – pressão atmosférica .....	38
24. $x_s$ – umidade média no ar saturado.....	38
25. $p_{ws}$ – pressão de saturação do vapor d’água .....	38
26. $g$ – taxa de evaporação .....	39
27. $\theta$ - coeficiente de evaporação.....	39
28. $A$ – área da superfície da piscina .....	39
29. $q$ – quantidade de umidade aquecida por segundo .....	39

<b>30.</b> $h_{we}$ – quantidade de calor retirada por evaporação da água .....	39
<b>31.</b> $T_o$ – temperatura de bulbo .....	39
<b>32.</b> $T_u$ – temperatura de bulbo úmido.....	39
<b>33.</b> $v$ – volume específico .....	40
<b>34.</b> $\Phi = UR$ – umidade relativa .....	40
<b>35.</b> $p_v$ – pressão de vapor.....	40
<b>36.</b> $p_g$ – pressão de vapor saturado.....	40
<b>37.</b> $W = UE$ – umidade específica ou absoluta .....	41
<b>38.</b> $UR$ – umidade relativa da mistura ar-vapor no local do experimento ..	41
<b>39.</b> $h$ – entalpia específica.....	42
<b>40.</b> $h_a$ – entalpia específica do ar seco .....	42
<b>41.</b> $h_w$ – entalpia específica da mistura água-vapor .....	42
<b>42.</b> $P_{pg}$ – Potência térmica gerada pela placa geradora de calor. ....	47
<b>43.</b> $\text{del}$ – corresponde ao vetor delta com dimensões x, y e z e parâmetro deltat [delx, dely, delz, deltat] das malhas espaciais em metros. ....	47
<b>44.</b> $T_{wi}$ – temperatura da água no instante em que se inicia a operação do reator. ....	47
<b>45.</b> $\text{fat}$ – fator de amortecimento temporal.....	47
<b>46.</b> $\text{nvf}$ – é um vetor formado pelos parâmetros: [nvny nfig1 nfig2 nfigc favi Nt] .....	47
<b>47.</b> $\text{nvny}$ – número ny adjacente à placa geradora (exp: 1) .....	47
<b>48.</b> $\text{nfig1}$ – número que indica fazer gráficos desde nt=nfig1 até nt=nfig (Ex=nfig1=4; nfig2=5) .....	47
<b>49.</b> $\text{nfigc}$ – número que indica fazer gráficos quanto nt=nfigc (Ex: 21) .....	47
<b>50.</b> $\text{favi}$ – fator de ampliação inicial dos vetores nas figuras (fav=favi-nt) (Ex: 15) .....	47
<b>51.</b> $\text{Nt}$ – último passo de tempo (nt) .....	47
<b>52.</b> $\text{iout}$ - é um vetor formado pelos parâmetros: [io,ig,igrid,iaxis,itest] .....	47
<b>53.</b> $\text{fTs}$ – fator para a temperatura da água de forma vetorial.....	48
<b>54.</b> $\text{fam}$ – fator de amortecimento.....	48
<b>55.</b> $\text{qcpg}$ – fluxo relativo a um quarto da metade da piscina.....	50
<b>56.</b> $\text{Sqcpg}$ – soma dos fluxos relativos a 1/4 da metade da piscina .....	50
<b>57.</b> $\text{qabs}$ – calor absorvido.....	50
<b>58.</b> $\text{qabst}$ – calor transferido .....	51

<b>59.</b> io – índice de opção de saída (io=1; imprimir saída) .....	51
<b>60.</b> igrd – índice de opção para usar grade nos gráficos do MatLab .....	52
<b>61.</b> iaxis – índice de opção para usar eixos nos gráficos do MatLab.....	53
<b>62.</b> VolRM – volume de água na região motora .....	53
<b>63.</b> VolQpisc – volume de água no quarto da piscina .....	53
<b>64.</b> VolTC – volume de água no tubo de corrente .....	53
<b>65.</b> VolBd – volume de água na região inferior direita .....	53
<b>66.</b> VolBe – volume de água na região inferior esquerda.....	53
<b>67.</b> VolVo – volume de água na região em vórtice .....	53
<b>68.</b> dzm – deslocamento ascendente médio no topo da RM .....	53
<b>69.</b> Twa1zy – temperatura na RM no tempo anterior .....	55
<b>70.</b> Twa2zy – temperatura na RM no tempo atual.....	55
<b>71.</b> Temp1cr – temperatura na TC no tempo anterior .....	55
<b>72.</b> Temp2cr – temperatura na TC no tempo atual.....	55
<b>73.</b> he – é o deslocamento médio corrigido pela largura efetiva da célula curvilínea .....	59

## LISTA DE FIGURAS

1. Figura 1: Piscina de refrigeração .....	22
2. Figura 2: Massa específica da água .....	23
3. Figura 3: Viscosidade dinâmica da água .....	24
4. Figura 4: Calor específico à pressão constante .....	24
5. Figura 5: Distribuição de potência .....	25
6. Figura 6: Esboço de exaustão da piscina de refrigeração .....	38
7. Figura 7: Esboço do ponto de orvalho e temperatura de bulbo úmido .	39
8. Figura 8: Alguns formatos de recipientes utilizados nos experimentos .	61
9. Figura 9: Primeiros perfis de velocidade .....	63
10. Figura 10: Velocidade de convecção .....	64
11. Figura 11: Velocidade de convecção .....	64
12. Figura 12: Velocidade de convecção .....	65
13. Figura 13: Distribuição de temperatura na superfície da piscina .....	65
14. Figura 14: Distribuição de temperatura média próximo à RM.....	66
15. Figura 15: Distribuição de velocidade e sua variação acima da RM .....	66
16. Figura 16: Dimensão requerida da área da piscina .....	67
17. Figura 17: Velocidade final da água da piscina .....	67

## LISTA DE TABELAS

1. Valores obtidos com as rotinas apresentadas .....	44
2. Resultados obtidos nas simulações.....	46
3. Soluções implícita e explícita da velocidade.....	62
4. Resultados obtidos em simulações com a sub-rotina PTD.....	68
5. Resultados obtidos em simulações com a sub-rotina PTD .....	68
6. Resultados obtidos em simulações com a sub-rotina PTD .....	69
7. Resultados obtidos em simulações com a sub-rotina PTD .....	69
8. Resultados obtidos em simulações com a sub-rotina PTD .....	70

## SUMÁRIO

1. Capa .....	1
2. Folha de rosto .....	2
3. Ficha catalográfica.....	3
4. Folha de aprovação.....	4
5. Prefácio .....	5
6. Dedicatória .....	6
7. Agradecimentos.....	7
8. Resumo .....	8
9. Abstract .....	10
10.Lista de siglas e abreviaturas .....	11
11.Lista de Figuras .....	14
12.Lista de tabelas .....	15
13.Sumário .....	16
14.Introdução.....	17
15.Objetivos.....	21
16.Desenvolvimento .....	22
17.Modelo de simulação de Convecção Natural .....	27
18.Estratégia de cálculo .....	30
19.Algoritmo de cálculo .....	35
20.Evaporação .....	39
21. Desenvolvimento do mapa do código .....	47
22.Resultados .....	61
23.Conclusões.....	71
24.Referências .....	73
25.Apêndice A .....	75

## 1. INTRODUÇÃO

Com a descoberta da fissão nuclear por volta de 1940, muitos efeitos foram desencadeados e aquele que mais tem sido utilizado é a energia liberada pelo núcleo que é em média de 205 MeV por fissão. Como na fissão ocorre a liberação de alguns poucos nêutrons, isto proporciona um processo que conhecemos como reação em cadeia, pois outros núcleos são fissionados por esses nêutrons, liberando subsequentemente ainda mais energia. Num reator nuclear, os elementos físseis e aqueles não físseis são arranjados de tal forma que esta reação em cadeia possa ser controlada, já que não ocorrendo uma reação controlada, todo o sistema seria danificado assim como as instalações onde se desenvolvem estas reações. Para que este sistema seja controlado de forma satisfatória e para que a potência do reator tenha praticamente o mesmo valor durante todo o tempo em que o sistema esteja funcionando, é necessário que exista uma forma de retirada de calor que está sendo produzido nas fissões e também do calor residual devido ao decaimento radioativo dos elementos de fissão. Nos reatores de pesquisa ou nos reatores de potência desligados, a potência devido ao decaimento radioativo é baixa, mas mesmo assim, é necessário que esse calor residual produzido também seja retirado.

Ultimamente, esse é um dos problemas que vem merecendo muitas pesquisas. Sabe-se que após o desligamento do reator, ele continua produzindo calor em seu núcleo e este calor precisa ser retirado para que os elementos combustíveis que compõem o núcleo do reator não sofram aquecimento excessivo e consequentemente não sejam danificadas.

Como o reator está desligado, o calor residual tende a diminuir lentamente com o tempo devido ao fato de que o decaimento radioativo é decrescente com o tempo segundo a expressão:

$$Q = Q_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

onde  $Q_0$  é a potência inicial do reator. O tempo  $t$  da expressão acima é dado em meses. A nossa simulação de convecção ocorre para tempos da ordem de minutos. Assim, se pode considerar que a potência do simulador seja constante. Desta forma, pode ser considerada que, após o desligamento do reator e nos minutos iniciais do decaimento, a potência do reator devido aos produtos de fissão, continua gerando

calor a uma taxa constante com o tempo e por esta razão, a geração de calor foi simulada para uma potência total constante de 50 kW, para a piscina de 125 m<sup>3</sup> de volume.

Vários outros trabalhos vêm sendo realizados na pesquisa da convecção natural, entre estes, posso citar o de Veloso, Maria Auxiliadora Fortini, intitulado “*Análise termo fluidodinâmica de reatores nucleares de pesquisa refrigerados a água em regime de convecção natural*” que utiliza os princípios da técnica de sub-canais e tem a capacidade de simular, em condições estacionárias e transitórias, os fenômenos térmicos e hidráulicos que ocorrem no núcleo de um reator de pesquisa refrigerado a água em regime de convecção natural. Para este fim, foi utilizado o programa computacional STHIRP-1 (Simulação Termo Hidráulica de Reatores de Pesquisa). Neste trabalho, a autora tem enfatizado o fato de que a convecção natural pode ser estudada e que seus resultados em reatores de pesquisa do tipo TRIGA foram satisfatórios neste estudo da convecção natural em sub-canais.

Na secção 2 deste trabalho, foram abordados os objetivos do mesmo. É importante salientar que foi necessário ter um objetivo principal que é o desenvolvimento de um software que simulasse a convecção natural e a retirada de calor residual através da convecção natural. No entanto, devem-se ter ainda vários objetivos secundários entre eles, saber a quantidade de calor que é transferida para o ar, através da evaporação, as dimensões e condições da piscina de refrigeração e quanto será necessário repor de água na piscina para que o sistema permaneça funcionando sem problemas. Adicionalmente é desejável que essa simulação forneça resultados que tornarão possíveis estudos futuros que impliquem em alguma melhoria e avanços em termo hidráulica dos reatores nucleares de potência e de pesquisa.

Na secção 3, se inicia o desenvolvimento do trabalho em que foi destacado o protótipo da piscina de arrefecimento utilizada e a linguagem de computação utilizada. O software de programação utilizado foi o “MATLAB - The Language of Technical Computing” of MathWorks. Todo o desenvolvimento da programação e material utilizado foi trabalhado nesta secção. Como ocorreram trocas de calor na região motora e no tubo de corrente, o tipo de célula em cada região da piscina de arrefecimento, o comportamento da placa geradora de calor e o comportamento da água, foram aqui estudados de forma detalhada e minuciosamente observados os

seus comportamentos através de tabelas e gráficos correspondentes. Nesta secção foi mostrado também o comportamento da água em seus aspectos mais importantes que são a incompressibilidade, sua massa específica, sua viscosidade e seu calor específico à pressão constante. Foi mostrado também detalhes da distribuição de potência simulando a placa geradora de calor.

Na secção 4, foi estudado um modelo de simulador de convecção natural. Para este fim, foi utilizada uma estratégia de cálculo numérico que fosse adequada, e que pudesse ser aplicada à região motora onde as células são consideradas cúbicas e na região do tubo de corrente onde elas são consideradas curvilíneas. As propriedades termodinâmicas do fluido de resfriamento são determinadas por dados de referência. Aqui também foi comentado sobre o alto valor do coeficiente beta da água resultando na sua incompressibilidade com a consequente formação de um tubo de corrente semelhante a um tubo de Bernoulli.

Na secção 5, explicitou-se a estratégia de cálculo e as equações algébricas resultantes utilizadas. Foi também evidenciada a razão de alguns procedimentos usados e que auxiliam no entendimento do processo de convecção dentro da piscina na refrigeração.

Na secção 6, foi apresentado o algoritmo de cálculo que é, basicamente a estrutura do código e como o software foi utilizado na simulação da convecção natural. Também foram apresentados argumentos para sua utilização no código computacional através da resolução de sistemas de equações numéricas apresentadas na secção anterior, de acordo com os parâmetros inseridos nas rotinas e sub-rotinas que fornecem atualizações dos dados e parâmetros do estado termodinâmico utilizados em cada passo de tempo.

Na secção 7, faz-se um estudo do que aproximadamente acontece na interface água-ar. Na superfície superior da piscina de refrigeração ocorre a evaporação de parte da água da piscina e esta carrega calor para o ar. Para este fim utilizamos três sub-rotinas, a saber: PressaoVaporEntalpiaEnlivreH2O, PressaoVaporURefUEsp H2OudBS e SubPTDArVapor. Nestas sub-rotinas, simula-se a evolução do ponto de orvalho, do ponto de bulbo úmido, da umidade relativa da

mistura ar-vapor, da umidade específica, da umidade média além da pressão de vapor em condições limites. Assim, as sub-rotinas simulam os resultados de uma carta psicrométrica porém de forma analítica e prontamente disponíveis para utilização no simulador.

Na secção 8, foi feito o desenvolvimento do código com as explicações do que fazem a rotina principal e cada uma das sub-rotinas. O Número de linhas da rotina principal e de cada uma das sub-rotinas é apresentado ao lado de cada uma delas.

Na secção 9, foram apresentados alguns resultados obtidos quando o código é utilizado para parâmetros desejados da piscina de refrigeração e os gráficos por ele fornecidos. Com isto pode ser feita uma análise de seu comportamento e o que pode ser feito para cada vez mais melhorar o seu desempenho. Fica claro que quanto mais se trabalhar no código, melhores resultados serão encontrados. Para que se possam melhorar os resultados obtidos, é necessário ter condições de utilização de uma piscina com as características desejadas, procurando aperfeiçoala de acordo com os valores encontrados, para que se possa verificar se estes resultados se aproximam de dados experimentais. O simulador é parametrizado e estes parâmetros podem ser calibrados para fornecer, com alguma aproximação resultados significativos para o tipo de piscina de refrigeração em estudo.

Na secção 10, foram relatadas as conclusões que se chegou de acordo com as condições e parâmetros utilizados e como deverá ser utilizado o código. Com os resultados simulados obtidos, principalmente em relação ao tipo de piscina, fica claro que os estudos podem futuramente avançar mais na compreensão da convecção natural.

Na secção 11 estão as referências bibliográficas utilizadas.

No apêndice A temos o mapa com os nomes das rotinas e sub-rotinas utilizadas no código.

## 2. OBJETIVOS

As pastilhas dos elementos combustíveis produzem calor por decaimento radioativo em qualquer tempo de sua vida e para que os componentes destes elementos combustíveis não sejam danificados devido ao calor, é necessário retirar adequadamente esse excesso de calor gerado.

Esse calor gerado no núcleo de um reator nuclear desligado é retirado com o auxílio de um refrigerante que, neste trabalho é a água.

Por esta razão, foi desenvolvido neste trabalho um programa computacional, contendo vários parâmetros de entrada e dados do sistema, placa geradora de calor e piscina de refrigeração. Adicionalmente foram utilizados parâmetros que definem o estado termodinâmico da água, de tal forma que simulem de maneira simples, porém adequada, a retirada de calor, por convecção natural.

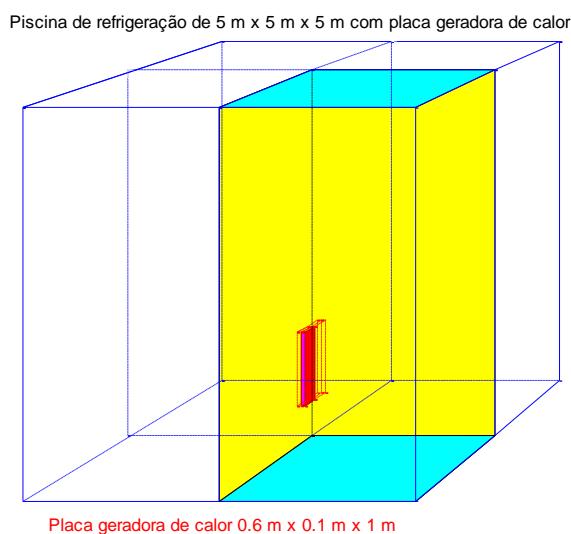
Procura-se também determinar a taxa de evaporação e a consequente quantidade de água que deve ser reposta na piscina de refrigeração em um determinado intervalo de tempo. Analisa-se também a dependência das dimensões da piscina em termos do resfriamento da água e do sistema de exaustão.

Por fim, avalia-se a dependência das dimensões da piscina em relação à proteção radiológica eficiente versus retirada de calor adequada, porém economicamente viável.

### 3. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do código começou com a escolha do software de programação e foi escolhida a linguagem de computação técnica científica do MATLAB devido a sua facilidade de resolver sistemas de equações e grafar resultados. Após esse passo começou-se a estruturar a piscina de refrigeração, a placa geradora de calor e os parâmetros aos quais seriam utilizados durante todo o processo de desenvolvimento do código.

O núcleo de geração de calor do reator está sendo simulado por uma fina placa metálica retangular, cujas dimensões estão sendo chamadas de  $L_{pg}$  (*comprimento da placa geradora*), imersa dentro de uma piscina de dimensões designadas de  $L_{pr}$  (*comprimento da piscina de refrigeração*) e colocada verticalmente no centro e próxima ao fundo de uma pequena piscina, a uma altura  $h_{apg}$  (*altura em relação ao fundo da placa geradora*), no eixo z, contendo água que irá assim resfriá-la. Com o intuito de simular uma distribuição similar àquela que acontece no núcleo de um reator nuclear desligado com decaimento radioativo, a taxa de calor emitida pela placa terá dependência espacial de acordo com a posição x, y e z da célula na interface com a placa e, temporal com o intervalo de tempo  $\Delta t$ . A baixa potência do calor residual deste núcleo deverá ser retirada pela água num processo de convecção natural.



**Figura 1: Piscina de refrigeração com a placa geradora em seu interior**

Adotamos como estado termodinâmico de controle do processo de convecção da água os seguintes parâmetros:

$V_c$  = volume de controle da célula de dimensões  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ .  $V_c = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

$S_c$  = superfície de controle da célula.  $S_c = 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y + 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta z + 2 \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

$r$  = posição da célula no sistema de referência da piscina

$v$  = velocidade linear da célula no sistema de referência da piscina

$\omega$  = velocidade angular da célula

$T$  = temperatura média da água no volume  $V_c$  da célula.

Sem perda de generalidade, foi optado por considerar  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  iguais resultando uma célula de forma cúbica para efeito simplificador de cálculo.

Os parâmetros do estado termodinâmico são  $\rho$ ,  $\mu$  e  $c_p$  determinados através de sub-rotina de interpolação matemática spline, usando banco de dados de cada um destes parâmetros com  $T$ , para  $T$  entre 0 °C e 90 °C quando calculados para a massa específica ( $\rho$ ) e para a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e entre 10 °C e 90 °C quando é feito o cálculo para a capacidade térmica à pressão constante ( $c_p$ ).

O primeiro parâmetro é  $\rho$  e para utilizá-lo foi elaborada uma rotina de  $\rho$  em função de  $T$ , chamada de “roAguaT” que utiliza o intervalo de temperatura acima apresentado. O gráfico correspondente a esta interpolação matemática spline é:

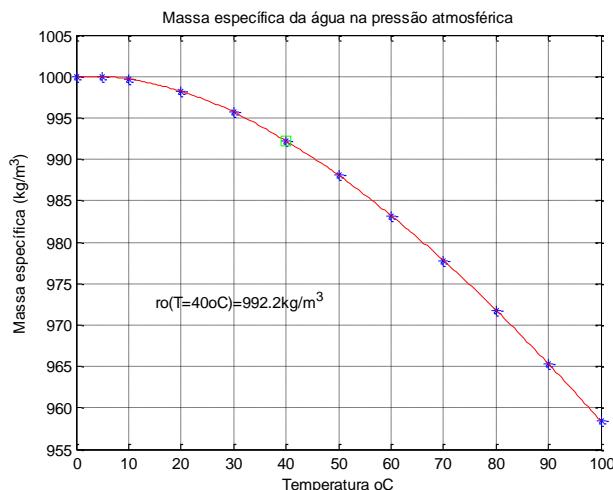
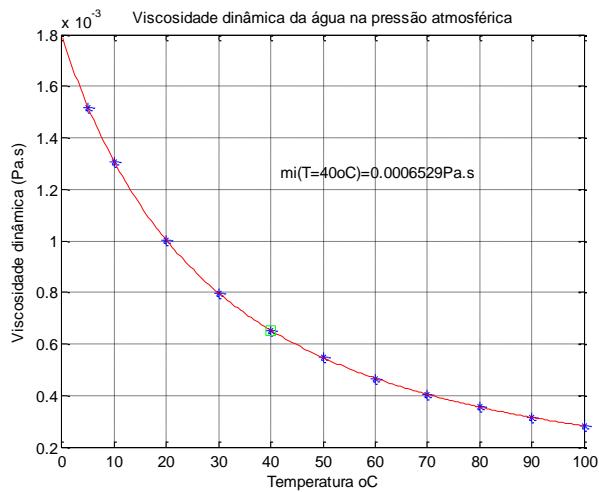


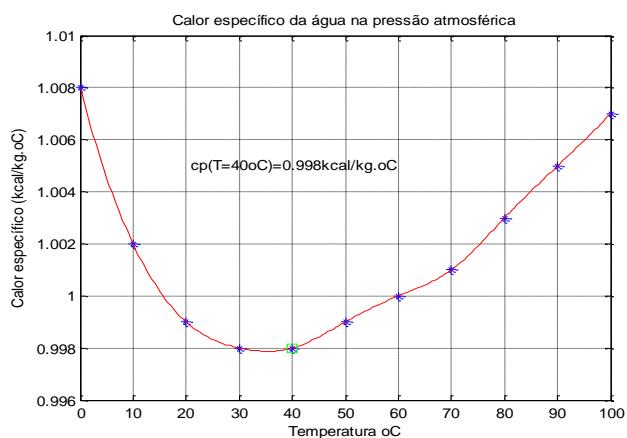
Figura 2: Interpolação matemática spline para a massa específica.

O próximo parâmetro é  $\mu$ , e para utilizá-lo foi elaborada uma rotina de  $\mu$  em função de  $T$ , chamada de “miAguaT” que utiliza o intervalo de temperatura acima. O gráfico correspondente a esta interpolação matemática spline é:



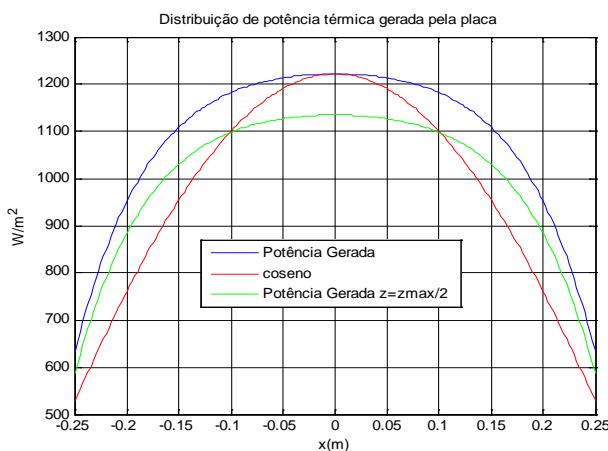
**Figura 3: Interpolação matemática spline para a viscosidade dinâmica da água.**

Outro parâmetro importante de cálculo é  $c_p$  e para utilizá-lo foi elaborada uma rotina específica. A determinação da temperatura final média da célula após o mecanismo de transporte térmico, exigiu uma sub-rotina de  $c_p$  em função de  $T$ , chamada de “cpAguaT” que utiliza o intervalo de temperatura especificado acima. O gráfico desta interpolação matemática spline é:



**Figura 4: Interpolação matemática spline para o calor específico à pressão constante.**

Foi assumido que a distribuição da potência dos elementos combustíveis de um reator nuclear possui uma distribuição aproximadamente cossenoidal. Também foi verificado que a placa em questão irradia horizontalmente e que a potência irradiada, portanto, possui distribuição cossenoidal com máximos nos seus quatro cantos. O gráfico seguinte nos mostra esta distribuição. Usando o sistema cartesiano x, y e z de referencial e assumindo que a placa retangular esteja no plano xz então a irradiação de calor se dá na direção horizontal y.



**Figura 5: Distribuição no eixo x de potência gerada pela placa**

O calor irradiado ao longo do eixo y, é então absorvido por uma camada de água adjacente à placa. A absorção é maior nas regiões mais próximas da placa geradora de calor. A largura ao longo do eixo y da camada que absorve algum calor depende da altura nas três direções da placa, pois o deslocamento da água devido à convecção natural ocorre assim que a água começa a absorver calor da placa. O deslocamento é causado devido ao desequilíbrio das forças que atuam sobre a célula de água que absorveu o calor. Isso acontece porque a massa específica da água ( $\rho$ ) diminui com o incremento positivo de temperatura. Devido a este deslocamento, a distribuição do calor absorvido ao longo do eixo y, torna-se quase linear, mas diminui com a distância horizontal em relação à placa geradora de calor. A região de água adjacente à fonte de calor e que absorve parte deste calor foi denominada de região motora ( $RM$ ), pois se pressupõe que o desequilíbrio de forças das células de água de volume  $V_c$  ocorre apenas nesta região. Uma vez que a água aquecida é submetida a movimento vertical, ao longo do eixo z na  $RM$ , então esta

região é quase triangular no plano  $yz$ . O volume de água na região motora é pequeno em comparação com o volume de água da piscina.

Em muitas aplicações, a água é considerada como sendo um fluido não viscoso e incompressível, tal como nas derivações do teorema de Bernoulli [1], [2] e [3]. Embora a água seja incompressível, no nosso modelo de simulação, ela é considerada viscosa, e também que a sua viscosidade e densidade variam de acordo com a última temperatura real calculada para o volume da célula que, na região motora, é cúbica e fora dela é curvilínea devido ao transporte de água de uma célula para outra.

#### 4. MODELO DE SIMULADOR DA CONVECÇÃO NATURAL

Com o objetivo de aplicar uma estratégia adequada de cálculo numérico, a região motora foi dividida em algumas células cúbicas, razoavelmente pequenas, na qual cada volume é definido pelo produto  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$  e chamado de volume de controle ( $V_c = \Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ ). A absorção de calor nestas células conduz a uma pequena variação na massa específica da água ( $\rho$ ), o que em termos, leva a uma força resultante atuante sobre a célula líquida, em um processo lento, mas contínuo de aceleração ascendente. Para um passo de tempo  $\Delta t$  escolhido, suficientemente pequeno, cada uma das forças que atuam sobre a referida célula de água é expressa em termos da velocidade, ainda desconhecida, da água que tem movimento ascendente ( $v$ ) e alguns parâmetros de ajuste. Todas as propriedades termodinâmicas do fluido de resfriamento são determinadas por dados de referência [4], [5], [6] e atualizados continuamente com a temperatura real, utilizando a interpolação matemática spline. A convecção natural ocorre mesmo para uma pequena diferença na densidade do fluido. Assim, é importante e decisivo, que a simulação de convecção natural considere a variação com a temperatura da massa específica,  $\rho(T)$ , do calor específico a pressão constante,  $c_p(T)$ , e da viscosidade dinâmica  $\mu(T)$ . Uma vez que a densidade da água não é constante, então a flutuação é calculada integrando a pressão sobre as superfícies das células. Nossa estratégia de cálculo numérico para a convecção natural é baseada na variação temporal da velocidade de subida devido às forças: peso, empuxo, força de arrasto e as forças resistentes de fricção aplicadas às células na região motora (RM). Embora a condução de calor pela água líquida seja muito pequena comparada com a convecção, nosso modelo também considera uma pequena difusão de massa ao longo da direção perpendicular ao principal deslocamento do fluido. Foi assumido que a difusibilidade de massa e calor, ocorre apenas fora da região motora.

Uma vez que o coeficiente de compressibilidade ( $\beta$ ), [1], [2], [3] da água é muito alto, então, para cada pequeno movimento de subida da água na região motora deve haver um deslocamento de água correspondente em todos os pontos fora desta região, estabelecendo-se assim um tubo de corrente. É perceptível que se certa quantidade de água começa um movimento ascendente dentro da região motora, toda a água da piscina de refrigeração começa também a se mover.

Isto porque não se pode formar vácuo na água. Desta forma, quando uma porção de água ascende, outra porção que está abaixo dela tende a ocupar o lugar que vagou.

O fator de compressibilidade beta da água vale 21000 atm e é calculado através da expressão:

$$\beta = \rho \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (2)$$

para a temperatura constante no processo.

Isto quer dizer que o valor de  $\rho$  (massa específica) não vai mudar com a baixa pressão dentro da piscina. Analisando a expressão anterior, pode ser escrito:

$$\beta \cdot \frac{\partial \rho}{\rho} = \partial p \quad (3)$$

Sendo assim, a variação da pressão correspondente a 1% de beta multiplicado pela variação da massa específica dividida pela própria massa específica corresponde a 210 atm. Assim, podemos dizer que seria necessário uma pressão de 210 atm para reduzir a massa específica de 1%. Desta forma, pode-se garantir que no caso da convecção natural em piscina de refrigeração, o volume só pode mudar com a variação da temperatura.

A força que impediria de aumentar o volume com a temperatura seria fornecida pelo módulo de Young. Como esta força é muito grande então a água vai dilatar-se com a temperatura. Se forem usadas células de volume constante então certa massa de água é expulsa desta célula com o aumento da temperatura e essa água que é expulsa leva calor com ela para a célula vizinha. Existe a conservação de massa no sistema de controle, mas mudança de massa no volume de controle.

$$\frac{DM}{Dt} = 0 \quad (4)$$

Nesta simulação o volume de controle,  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  é constante. No entanto, as massas são diferentes, pois o volume que entra está numa temperatura e certo calor

específico que são diferentes daqueles da porção que sai. Para calcular o valor de  $\rho$  nesta célula, não se pode utilizar a relação da calorimetria que diz que a quantidade de calor cedido é igual à quantidade de calor recebido, pois o volume permanece constante e assim, temos de utilizar uma relação que envolve a massa inicial, a massa que entra e a massa que sai para determinar o valor de  $\rho$ .

Isto conduz a um tipo de tubo de corrente (TC) semelhante ao tubo de Bernoulli, do fluido da piscina de refrigeração. As forças de cisalhamento devido à convecção criam alguns pequenos vórtices. Porém um verdadeiro tubo de corrente (TC) não é facilmente observado, especialmente em grandes piscinas. Mas, por causa da simulação da distribuição da temperatura da água na superfície superior da piscina, pode ser assumido o deslocamento do líquido através de um tubo de corrente. Pode também ser observado que a quantidade de calor efetivamente removido da piscina pelo sistema de exaustão de ar depende apenas da distribuição de temperatura da fina camada de água na interface água-ar na superfície da piscina. Este modelo de simulação de convecção é calibrado de forma a proporcionar a distribuição de temperatura e a taxa de remoção de calor observada experimentalmente na superfície da piscina. Existem, no entanto, algumas regiões, como por exemplo, nos cantos inferiores, que o deslocamento da água líquida é praticamente nulo. Mas mesmo assim, haverá alguma dissipação de calor para essas regiões do tubo de corrente (TC), principalmente devido à difusibilidade de massa e de calor.

## 5. ESTRATÉGIA DE CÁLCULO

Seja  $m$  a massa de água do volume de controle  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  na região motora. Logo que esta célula absorve algum calor, sua densidade diminui. Seja  $v$  a ainda desconhecida velocidade de ascensão que resulta do desequilíbrio das forças que atuam nesta célula. Desta forma ficará:

$$\frac{d(mv)}{dt} = \sum F = F_g + F_p + F_a + F_v \quad (5)$$

onde:

$F_g$  = forças gravitacionais

$F_p$  = forças integradas de pressão

$F_a$  = forças resistentes de arrasto

$F_v$  = forças de viscosidade.

Pode ser notado que estas forças dependem da elevação da temperatura, da massa específica  $\rho(T)$ , da viscosidade dinâmica da água  $\mu(T)$  e do calor específico a pressão constante  $c_p(T)$ . As forças de resistência  $F_j$  e  $F_\omega$  também dependem da velocidade relativa,  $v - v_o$ , da célula considerada com sua vizinhança, sendo  $v_o$  a velocidade em um instante do passo de tempo anterior.

A análise dos valores experimentais da distribuição de temperatura  $T$  da água dentro da camada limite e a dependência não linear de  $c_p(T)$  evidenciam que a taxa de calor absorvida pelas células diminui ao longo da camada limite. A distribuição da taxa de calor absorvido  $Q_a(x,y,z,t)$  foi simulada por uma função linear  $f(x,y,z,t)$  normalizada tal que a integral de  $F$  dentro da região da camada limite é um, garantindo que todo o calor gerado pelo núcleo acaba sendo absorvido pelas células que tem cada uma o volume  $V_c$ . Inicia-se assim, por um acréscimo de tempo  $\Delta t$  que, deve ser suficientemente pequeno para permitir uma simulação adequada do processo não linear de evolução temporal das componentes do estado termodinâmico. O calor absorvido ao longo do intervalo de tempo  $\Delta t$  ocasiona um correspondente aumento de temperatura  $\Delta T$ . Esse aumento de temperatura  $\Delta T$  numa célula na posição  $x, y, z$ , será expressa por:

$$\Delta T = \frac{f(x, y, z, t) \times q(x, 1, z, t) \times \Delta x \Delta z \Delta t}{\rho(T_o) V_c c_p(T_o)} \quad (6)$$

onde  $q(x,1,z,t)$  é o fluxo de calor emitido da superfície da placa, na direção y, simulando a metade do núcleo do reator, já que existe simetria espacial no conjunto piscina de refrigeração e placa geradora de calor.

O acréscimo de temperatura provoca uma diminuição da massa específica da água, cujo valor passa de  $\rho_0(T_0)$  para  $\rho(T_0 + \Delta T)$ , determinado pela sub-rotina de interpolação matemática *spline* acoplada ao simulador computacional. Na célula em análise a massa específica diminui e provoca um desequilíbrio de forças que culmina com um deslocamento vertical, originando a *convecção natural*. As principais forças que atuam na célula de volume  $V_c = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ , são:

*A força devido à aceleração da gravidade,*

$$F_g = \rho V_c g \quad (7)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,

$V_c$  é o volume de controle e

$g$  a aceleração gravitacional.

*A força devido ao arrasto,*

$$F_a = \frac{1}{2} C A_n \rho v_r^2 \quad (8)$$

onde  $v_r$  é a velocidade relativa entre a célula em análise e a vizinha superior,

$A_n$  é a área da superfície normal ( $\Delta x \Delta y$ ) e

$C$  é um coeficiente determinado experimentalmente.

*A força devido ao atrito de viscosidade,*

$$F_{v_y} = \mu A_{ty} \nabla_y v_{zy} \quad (9)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água na temperatura  $T$ ,

$v_{zy}$  é a velocidade relativa na direção z (oposta de g) com a célula vizinha na direção y e

$A_{ty}$  é a área tangente cujo vetor normal está na direção y.

*A força devido ao atrito de viscosidade,*

$$F_{vx} = \mu A_{tx} \nabla_x v_{zx} \quad (10)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água na temperatura  $T$   $v_{zx}$  é a velocidade relativa na direção  $z$  (oposta de  $g$ ) e com a célula vizinha na direção  $x$  e

$A_{tx}$  é a área tangente cujo vetor normal está na direção  $x$ .

*A força devido a pressão na superfície superior,*

$$F_{ps} = -(P_o - \rho_s g \Delta z / 2) \Delta x \Delta y \quad (11)$$

onde  $P_o$  é a pressão da água no centro da célula de coordenadas  $x,y,z$  e  $\rho_s$  é o valor da massa específica da água na superfície superior da célula de altura  $\Delta z$ .

*A força devido à pressão na superfície inferior,*

$$F_{pi} = (P_o + \rho_i g \Delta z / 2) \Delta x \Delta y \quad (12)$$

onde  $\rho_i$  é o valor da massa específica da água na superfície inferior da célula de altura  $\Delta z$ .

Como  $\rho_s$  é menor do que  $\rho_i$ , na região que absorveu calor denominada região motora, então a força de empuxo não pode ser determinada pelo peso do fluido deslocado e sim pela soma (vetorial) de  $F_{pi}$  com  $F_{ps}$ , onde ambas as forças estão na direção  $z$ .

As forças de viscosidade  $F_{vx}$  nas duas faces paralelas com normal no eixo  $x$ , em geral, não são iguais. Isto acarreta a aparecimento de um torque  $\tau_y$  na direção  $y$ . Analogamente, aparecerá um torque  $\tau_x$  na direção  $x$  devido as forças de viscosidade nas faces com normal na direção  $y$ .

$$\tau_y = (F_{vx}(x - \frac{\Delta x}{2}) - F_{vx}(x + \frac{\Delta x}{2})) \frac{\Delta x}{2} \quad (13)$$

$$\tau_x = (F_{vy}(y + \frac{\Delta y}{2}) - F_{vy}(y - \frac{\Delta y}{2})) \frac{\Delta y}{2} \quad (14)$$

As componentes das forças ao longo do eixo z produzem um aumento da velocidade linear  $v_z$  da célula na direção z.

As componentes do torque  $\tau_y$  produzem um aumento da velocidade angular  $\omega_y$  da célula na direção y.

As componentes do torque  $\tau_x$  produzem um aumento da velocidade angular  $\omega_x$  da célula na direção x.

O volume da célula  $V_c$  é chamado de volume de controle, cujo valor é sempre constante. A absorção de calor pela célula produz um aumento de temperatura e consequente diminuição da massa específica, no intervalo de temperatura entre 10 °C e 90 °C de nosso interesse, neste processo de resfriamento do núcleo ou combustível irradiado. Isto significa que uma pequena porção de água sai do volume de controle ficando, no entanto, contida dentro da superfície de controle (SC), regido pela conservação de massa como dita pelo Teorema de Transporte de Reynolds.

$$\left( \frac{Dm}{Dt} \right)_{sis} = \int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \oint_{SC} \rho \vec{v}_e \cdot \hat{n} dA \quad (15)$$

Na equação acima,  $v_e$  é a velocidade de expansão e o versor  $\hat{n}$  é normal à superfície. A conservação de massa no sistema é traduzida pela derivada substantiva  $Dm/Dt$  que é nula.

O algoritmo numérico para resolver a equação (1) também depende da discretização espacial e do intervalo de tempo. A formulação explicita destas forças, portanto, está mostrada com mais detalhes em nosso software de cálculo numérico utilizando a linguagem de computação técnica do MATLAB. Para um intervalo de tempo  $\Delta t$  razoavelmente pequeno, uma solução numérica da equação diferencial (1) pode ser expressa por:

$$v - v_o + \frac{\Delta t}{m} \sum F(v_o) = 0 \quad (16)$$

$$v - v_o + \frac{\Delta t}{m} \sum F(v) = 0 \quad (17)$$

A solução apresentada na Equação (16) é chamada solução explícita porque  $v$  é calculado usando apenas o último valor conhecido  $v_o$  da velocidade ascendente.

A solução apresentada na equação (17) é chamada solução implícita porque cada uma das forças que atuam na célula  $F_g$ ,  $F_p$ ,  $F_d$ ,  $F_\omega$  devem ser avaliadas para a velocidade  $v$ , pois ela ainda é desconhecida. Como a dependência destas forças em  $v$  não é linear, então a solução da Equação (17) só pode ser realizada por uma rotina de computação numérica apropriada, tal como a sub-rotina “solve” do MATLAB. Como  $F_d$  e  $F_\omega$  dependem explicitamente de  $v$ , então a solução explícita é certamente superestimada para os primeiros intervalos de tempo  $\Delta t$ . Nossa rotina de simulação usa preferencialmente a solução implícita, que é a mais exata. No entanto, estas velocidades convergem para a velocidade terminal quando  $\Sigma F$  tende para zero. Neste caso, ambas as soluções explícita e implícita são iguais e também são iguais a esta velocidade terminal.

## 6. ALGORITMO DE CÁLCULO

Para resolver a equação diferencial da 2<sup>a</sup> lei de Newton, estipula-se um acréscimo infinitesimal de tempo. Ao se optar pela comodidade do computador, pode-se resolver as equações diferenciais impondo um acréscimo de tempo,  $\Delta t$ , suficientemente pequeno, porém com valor adequado para garantir um tempo de computação razoável.

Da equação da variação temporal do momento, com passo de tempo  $\Delta t$ , resulta:

$$v_z - v_{zo} - \frac{F_g + F_a + F_v + F_p}{m} \Delta t = 0 \quad (18)$$

onde  $m$  é a massa ( $\rho \times V_c$ ) da água na célula de volume  $V_c$ ,

$F_v$  é a soma das forças de viscosidade nas 4 faces da célula cúbica cujos vetores normais são ortogonais ao eixo  $z$ ,

$F_p$  é a soma vetorial das forças de pressão nas duas faces planas  $xy$ .

Observa-se que  $F$ , a soma das forças, depende da velocidade  $v_z$ , ainda incógnita. No método explícito de resolução da equação acima, admite-se que  $F$  depende apenas da velocidade  $v_{zo}$  já conhecida no passo de tempo anterior. A solução por este método explícito resulta em  $v_z$  muito superior ao valor experimental e também superior a velocidade limite  $v_L$ , determinada para a soma das forças igual a zero, ( $F(v_z)=0$ ). Isto implica que se deve usar o método implícito, onde  $F$  depende de  $v_z$  ainda não conhecido. A solução computacional da equação não linear acima é numericamente obtida pelo uso da sub-rotina *solve* do *MATLAB (The Language of Technical Computing)* da *MathWorks*. Usamos este método para determinar  $v_z$ , atualizando a massa específica ( $\rho$ ), a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), o calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) e a massa ( $m$ ), em cada passo de tempo  $\Delta t$ .

Analogamente, o torque produz uma variação da velocidade angular. Quando se usa um passo de tempo  $\Delta t$ , as equações não lineares em  $\omega_x$  e  $\omega_y$ , ainda incógnitas, serão:

$$\begin{aligned} \omega_x - \omega_{xo} - \frac{\tau_x}{I} \Delta t &= 0 \\ \omega_y - \omega_{yo} - \frac{\tau_y}{I} \Delta t &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

onde  $I$  é o momento de inércia da esfera equivalente ao cubo de volume  $V_c$ , ou seja,

$$I = \frac{2}{5} m R^2 ,$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3\Delta x \Delta y \Delta z}{4\pi}} e \quad (20)$$

$$\tau_x = \Delta F_{vz}$$

onde  $F_{vz}$  é a força tangencial de viscosidade na face  $\Delta x \Delta y$  ao longo do eixo  $z$ . A resolução computacional dessas duas equações não lineares em  $\omega_x$  e  $\omega_y$  possibilita a determinação das velocidades  $v_{rx}$  e  $v_{ry}$  que resultam dessas rotações, que são:

$$\mathbf{v}_{rx} = \mathbf{v}_{r xo} + \boldsymbol{\omega}_y \mathbf{R} \quad (21)$$

$$\mathbf{v}_{ry} = \mathbf{v}_{r yo} + \boldsymbol{\omega}_x \mathbf{R}$$

Isto deixa claro que as forças não equilibradas de viscosidade produzem uma rotação e um consequente deslocamento da célula em direção ortogonal ao eixo  $z$ . Desta forma temos como resultado um mecanismo, embora pouco eficiente, de transporte de calor para células não alinhadas com o eixo  $z$ , como normalmente ocorre com a ascensão devido às forças na direção da aceleração da gravidade.

A aplicação do teorema de transporte de *Reynolds* resulta na determinação da velocidade de expansão  $v_e$  na superfície de controle, a saber:

$$0 = \frac{\Delta \rho}{\Delta t} V_c + \rho v_e S_c \quad (22)$$

resolvendo para  $v_e$ , temos:

$$v_e = -\frac{\Delta \rho}{\rho S_c \Delta t} V_c \quad (23)$$

$$\text{onde } \Delta \rho = \rho - \rho_0 \text{ e } S_c = 2(\Delta x \Delta y + \Delta x \Delta z + \Delta y \Delta z) \quad (24)$$

Como  $\rho$  é menor do que  $\rho_0$ , a velocidade de expansão  $v_e$  é positiva, embora muito pequena. Isto conduz a um mecanismo adicional de transporte de calor para as seis células adjacentes à célula analisada de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Este transporte de calor deve necessariamente ser traduzido em um aumento de temperatura dessas células vizinhas. Por outro lado, o fator de compressibilidade da água é

$\beta = 21.000 \text{ atm}$ . Pode-se então inferir que só a expansão térmica consegue aumentar o volume. Assim deve-se considerar que esta variação  $\Delta V$  de volume é uma variável de controle conservada no processo de transporte de massa para as células vizinhas. O balanço de massa na célula vizinha, na direção y positivo será:

$$m_o = \rho(y + \Delta y)V_c \quad (25)$$

$$m_e = \rho(y)\Delta V \quad (26)$$

$$m_s = \rho(y + \Delta y)\Delta V \quad (27)$$

$$m = m_o + m_e - m_s \quad (28)$$

onde  $\Delta V = V_c \times \Delta t \times \Delta x \times \Delta z$ ,  $m_o$  é a massa inicial no volume  $V_c$ ,  $m_e$  é a massa que entra com o volume  $\Delta V$  e  $m_s$  é a massa que sai com o volume  $\Delta V$ .

A massa específica atualizada nesta célula é, portanto:

$$\rho = m / V_c \quad (29)$$

A temperatura final nesta célula é determinada numericamente pela sub-rotina de interpolação usando *spline* em banco de dados de T com  $\rho$ , representado por  $T = T(\rho)$ . Esta sub-rotina é inversa daquela usada para determinar  $\rho$  com T conhecido, representada por  $\rho = \rho(T)$ .

Procedimento análogo é feito para a obtenção da massa específica final nas células que sofreram transporte de massa como a causada pela velocidade  $v_z$ , resultante da equação do momento linear e  $v_r$ , devido a resolução da equação do momento angular, já descritas acima.

## 7. EVAPORAÇÃO

Como já foi dito anteriormente, a piscina de refrigeração em questão, possui um sistema exaustor de forma que a evaporação não venha a causar aumento de pressão no interior do núcleo onde se encontra a piscina de refrigeração. Este sistema exaustor possui duas aberturas, uma delas com sistema regulador de velocidade do ar de entrada e a outra de saída da mistura ar-vapor. Assim sendo, a regulagem da quantidade de vapor no ar e a velocidade do ar, assim como a retirada de calor estão satisfeitas o que proporciona menor nível de aquecimento da água da piscina de refrigeração. O esquema abaixo nos mostra como o sistema de exaustão funciona.

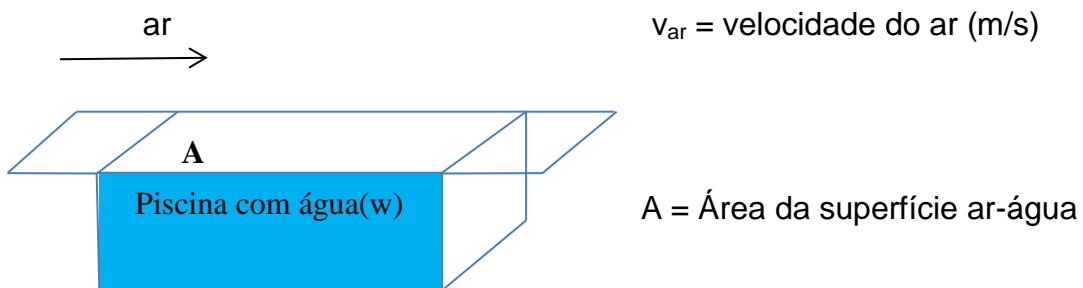


Figura 6: Esboço de exaustão com ar fluindo paralelamente à superfície da piscina de refrigeração.

Os índices que aparecerão abaixo nas equações estão mostrados a seguir: **w** representa a água (water), **a** é o ar seco e **v** representa a quantidade de vapor no ar ( $H_2O$  no ar).

Para iniciar nosso trabalho da área de exaustão, devemos definir algumas grandezas. A primeira a ser definida, é  $x$  que é a umidade média no ar em kg de água / kg de ar seco.

$$x = \frac{m_w}{m_a} = 0.622 \frac{p_w}{p_a - p_w} \quad (30)$$

onde  $p_w$  é a pressão parcial da água presente no ar e  $p_a$  é a pressão atmosférica.

Na condição de saturação, temos  $x_s$  que é a umidade média no ar saturado à mesma temperatura que a superfície da água medida em kg de água / kg de ar seco.

$$x_s = 0.622 \frac{p_{ws}}{p_a - p_{ws}} \quad (31)$$

onde  $p_{ws}$  é a pressão de saturação do vapor d'água.

$$g = \theta A(x_s - x) \quad (32)$$

onde  $g$  é a taxa de evaporação, de acordo com a literatura, em kg/h. É bom frisar que anteriormente  $g$  já aparece na fórmula do peso do corpo como campo gravitacional terrestre (aceleração da gravidade), só que neste momento, não se deve fazer nenhum tipo de confusão com o utilizado anteriormente.

$$\theta = 25 + 19 v_{ar} \quad (33)$$

onde  $\theta$  é o “coeficiente de evaporação” em  $\text{kg/m}^2$ ,

$v_{ar}$  é a velocidade do ar acima da superfície da água em m/s,

$A$  é a área da parte superior da piscina em  $\text{m}^2$  e

$q$  é a quantidade de umidade aquecida por segundo retirada pela evaporação.

$$q = h_{we} x g \quad (34)$$

onde  $h_{we} = 2270 \text{ kJ / kg} = 542 \text{ cal/g}$  é a quantidade de calor retirada por evaporação da água por massa de água (Engineering Tool Box).

$$c_{p,ar} = 1004 \text{ kJ / kg*K}$$

Ponto de orvalho  $T_0$  é a temperatura na qual o vapor condensa quando resfriado à pressão constante. Ele está representado pelo ponto 2 na figura. A temperatura de bulbo úmido  $T_u$  acontece quando o ar em contato com o bulbo úmido não está saturado. Ocorre vaporização da água contida no bulbo úmido e esta vaporização faz baixar a temperatura do bulbo úmido até o ponto de equilíbrio. (Ponto 4 na figura)

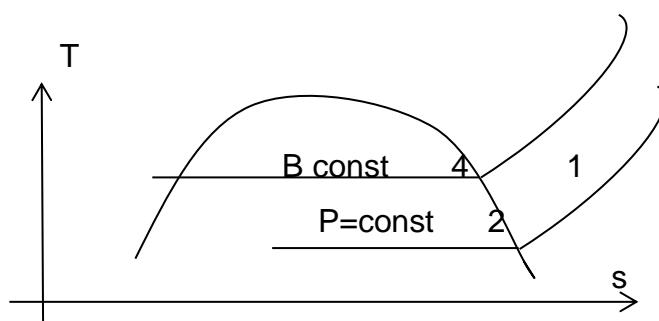


Figura 7: Esboço para o Ponto de orvalho e temperatura de bulbo úmido

O ponto de orvalho é também a temperatura abaixo da qual começa a condensação do vapor de água contido no ar. Pode-se também definir a temperatura de ponto de orvalho  $T_o$  como a temperatura na qual o ar torna-se saturado. Em outras palavras é dito ponto de orvalho quando o vapor de água começa a condensar através de um resfriamento, enquanto se mantém constantes a pressão e a razão da mistura.

$$\rho = \text{massa específica} = m / V$$

$$v = \text{volume específico} = V / m = 1/\rho$$

$\Phi = UR$  que é a umidade relativa que é a razão entre a fração molar de vapor na mistura e a fração molar de vapor saturado à mesma temperatura e pressão total.

$$\Phi = p_v / p_g = \rho_1 / \rho_4 \quad (35)$$

mas

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (36)$$

$$p = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \rho \frac{RT}{M} \quad (37)$$

para a transformação isotérmica temos que  $p$  é proporcional a  $\rho$  e:

$$\Phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{\rho_v}{\rho_g} = \frac{v_g}{v_v} \quad (38)$$

onde  $p_v$  é a pressão de vapor parcial na mistura e  $p_g$  é a pressão de vapor saturado.

A literatura ainda apresenta  $W$  sendo igual à umidade específica ou umidade absoluta (UE). Não podemos confundir com  $w$  que representa a água.

$W=UE$  é a razão entre a massa de vapor de água  $m_v$  e a massa de ar seco  $m_a$ . Desta forma pode ser dito que:

$$x = W = UE = \frac{m_v}{m_a} \quad (39)$$

devido ao fato que:

$$x = \frac{m_w}{m_a} \quad (40)$$

A umidade específica (W=UE) é a quantidade de vapor presente na mistura ar-vapor em kg de vapor d'água por kg de ar seco.

A umidade relativa (UR) é a razão entre as umidades máxima e a específica para uma dada temperatura.

$$pV = nRT = \frac{m}{M} RT \rightarrow m = \frac{pVM}{RT} \quad (41)$$

Temos então, as seguintes massas:

$$\text{vapor} \rightarrow m_v = \frac{p_v VM_v}{RT} \quad (42)$$

$$\text{ar} \rightarrow m_a = \frac{p_a VM_a}{RT} \quad (43)$$

$$W = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v M_v}{p_a M_a} \quad (44)$$

onde W é a umidade específica (UE).

Para exemplificar, façamos o caso da mistura ar vapor, onde temos:

$M_v$  = Mol de vapor de água = 18 g,

$M_a$  = Mol de ar (79%  $N_2$  + 20,8%  $O_2$  +  $H_2O$ ) = 28,93 g, isto porque o ar é composto, aproximadamente de 79,08%  $N_2$ , 20,95% de  $O_2$  + 0,93% de  $H_2O$  + 0,033% de  $CO_2$  + 0,005% de outros.

Pressão total ( $p_t$ ) = pressão de ar ( $p_a$ ) + pressão de vapor ( $p_v$ )

$$p_t = p_a + p_v \rightarrow p_a = p_t - p_v \quad (45)$$

mas,

$$\Phi = p_v / p_g \rightarrow p_v = \Phi p_g \quad (46)$$

logo, teremos:

$$W = \frac{M_v}{M_a} \frac{p_v}{p_a} = \frac{18}{28,93} x \frac{\Phi p_g}{p_t - \Phi p_g} \quad (47)$$

$$W = 0,622 x \frac{\Phi p_g}{p_t - \Phi p_g} \quad (48)$$

A humidade relativa máxima,  $UE_{\max} = W_{\max}$ , ocorre na condição de saturação ( $p_v = p_g$ ).

Neste caso  $\Phi = 1$

$$W_m = UE_{\max} = 0,622 x \frac{\Phi p_g}{p_t - \Phi p_g} \quad (49)$$

A literatura algumas vezes usa  $W$  outras vezes  $x$ , e, portanto,  $W_{\max} = x_{\max}$  que representa a umidade específica (UE) para a condição de saturação. A razão da umidade  $x$  pode assim ser utilizada para calcular a entalpia específica  $h$  da maior parte das misturas de ar.

$$h = h_a + x h_w \quad (50)$$

onde  $h_a$  é a entalpia específica do ar seco em (kJ/kg) e  $h_w$  é a entalpia específica da mistura água-vapor em (kJ/kg).

Assume-se que:

$$h_a = 0 \quad \text{para } T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ e então,}$$

$$h_a = c_{pa} T \quad (51)$$

onde  $c_{pa}$  é o calor específico do ar

$$c_{pa} = 1,006 \text{ kJ/kg/}^{\circ}\text{C} = 0,24 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C} \text{ e}$$

$T$  é a temperatura do ar.

Desta forma, temos:

$$h_w = h_{we} + c_{pw} T \quad (52)$$

onde os índices  $w$  e  $we$  são relativos a água e água evaporada, respectivamente.

$h_{we}$  é o calor evaporado da água para 0°C = 2501 kJ/kg = 597.5 cal/g,

$c_{pw}$  é o calor específico da água a pressão constante

$$c_{pw} = 1.84 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} = 0.44 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

E assim pode ser escrito:

$$h = c_{pa}T + x (c_{pw}T + h_{we}) \quad (53)$$

Aplicando a fórmula acima, a qual também está incorporada na simulação em nosso programa computacional, a entalpia da umidade do ar, por exemplo, para a temperatura  $T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$  e com mistura específica constante  $x = 20,3 \text{ g/kg}$  (saturação), encontramos  $h = 77,8 \text{ kJ/kg}$ .

A umidade relativa é calculada por:

$$UR = \exp \left[ 5417 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (54)$$

onde  $T_0$  é a temperatura de orvalho

$$p_{vs} = 6,1078 \times 10^{7.5 \frac{\text{Tu}}{(237.3 + \text{Tu})}} \text{ (m bar)} \quad (55)$$

onde:

$T_u$  é a temperatura de bulbo úmido

$$p_v = p_{vs} - [A \times P(T - T_u)] \text{ (mmHg)} \quad (56)$$

onde  $T$  é a temperatura do ar  $T_a$ .

$$A = 6.7 \times 10^{-4} \text{ e } P = 760$$

Estas correlações semi-empíricas estão incorporadas no simulador computacional na sub-rotina SubPTDArVapor na linguagem computacional do MatLab e foram usadas para a determinação da UR, a UE e a correspondente remoção de calor do ar no processo de evaporação na interface ar-água na piscina de refrigeração por convecção natural.

Desta forma foram elaborados e utilizados três programas computacionais utilizando o MatLab para os cálculos numéricos da quantidade de água evaporada e a correspondente média de calor removido da mistura ar-água a saber:

- PressaoVaporEntalpiaEnlivreH2O,
- PressaoVaporURefUEspH2OudBS e
- SubPTDARVapor.

Foi feito uso de banco de dados experimentais disponíveis na literatura para a variação da pressão de vapor de saturação com a temperatura. Foi observado que enquanto a temperatura da água aumenta a umidade relativa da mistura ar-vapor também aumenta.

Estes programas reproduzem satisfatoriamente os dados da carta psicrométrica, fornecendo inclusive valores da entalpia de vaporização. É óbvio que as cartas psicrométricas não são práticas em simuladores computacionais porque devem ser lidas e interpretadas através de seu gráfico.

Agora será feito um exemplo de aplicação do nosso simulador computacional. Será suposto que a temperatura da água  $T = 20^\circ\text{C}$  e será utilizado o programa que usa interpolação spline em duas dimensões, determina-se a pressão de vapor correspondente,  $p_v = 2333 \text{ Pa}$ . A pressão atmosférica é 1 atm = 760 mmHg = 101.3 kPa

$$\text{Deste modo, } x_m = \frac{0,622 \times 2333}{101,3 - 2333} = 0,0147 \frac{\text{kg de água}}{\text{kg de ar}}$$

Da mesma forma foi determinado,  $\rho_v$  e  $x$  para outras temperaturas, cujos resultados estão expressos na tabela abaixo.

**Tabela 1. Alguns valores obtidos com as rotinas apresentadas.**

$T = \text{Temperatura}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P_v = \text{Pressão de vapor}$ de água saturado (Pa)	$x_m = \text{Taxa de}$ umidade máxima ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{air}}$ )
5	870	0,005357
10	1225	0,007612
15	1701	0,0162
20	2333	0,0147
25	3130	0,0198
30	4234	0,0271

Entretanto, se o ar não estiver saturado, então  $x < x_m$ . Assim, se  $x = \text{UR} = 50\%$  então:

$$p_w = \Phi p_{ws} = 0.5 \times 3130 \text{ Pa}$$

Desta forma:

$$x_w = 0,622 \times \frac{0,5 \times 3130}{101 \times 10^3 - 0,5 \times 3130} = 0,0098 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de ar}}$$

Para o caso de nossa piscina cujas dimensões são:  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$  e ar fluindo em sua superfície com velocidade tangencial de 50 cm/s encontraremos:

$$g = (25 + 19v)A(x_s - x) = (25 + 19 \times 0,5) \times 5 \times 5 (0,0198 - 0,0098)$$

$$g = 8,63 \text{ gramas de água evaporada / segundo}$$

A média de calor removido nesta evaporação é:

$$q = h_{we} g = 2270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,00863 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 19,6 \text{ kW} = 19600 \text{ J/s}$$

$$q = 19600 \text{ J/s}$$

Em geral, a temperatura do ponto de orvalho  $T_0$  ou a temperatura do bulbo úmido  $T_u$  não é conhecida. Neste caso, deve-se entrar no simulador computacional com valores negativos de  $T_0$  e  $T_u$ . O simulador calculará então os valores de  $T_0$  e  $T_u$  utilizando as correlações termodinâmicas pertinentes. O mesmo acontece com a umidade específica (UE) a qual, em geral, não é conhecida e, portanto, deverá ser introduzida com algum valor negativo no simulador. Dados sobre a umidade relativa são encontrados, acessando: [www.cptec.inpe.br/cidade/tempo/241](http://www.cptec.inpe.br/cidade/tempo/241). Pode-se também acessar através do Google, procurando por INPE, a seguir procurar umidade relativa e, finalmente Rio.

No Rio de Janeiro, a umidade relativa do ar quase sempre está em torno de 70 %.

No entanto, em 22/07/2013, às 8h 14 min, a umidade relativa no Rio de Janeiro era de 100%, com a temperatura de 23 °C.

Na tabela a seguir, temos alguns resultados obtidos a partir do uso destas sub-rotinas na qual também foi possível determinar a altura, em relação à superfície, que a água havia baixado devido à evaporação, que foi chamada de  $h_{eva}$ , medida em cm/mês. Não pode ser esquecido que  $v_{ar}$  é a velocidade do fluxo de ar sobre a área livre na superfície da piscina de refrigeração, já que este componente é de suma importância em nosso estudo.

**Tabela 2: Resultados obtidos através de simulações**

<b><i>UR (%)</i></b>	<b><i>v<sub>ar</sub> (cm/s)</i></b>	<b><i>Massa evaporada (kg/mês)</i></b>	<b><i>h<sub>eva</sub> (cm/mês)</i></b>
<b>70</b>	80	3566	14,3
<b>97</b>	5	232	0,93
<b>97</b>	0	223	0,895
<b>100</b>	0	0	0

## 8. DESENVOLVIMENTO DO MAPA DO CÓDIGO

Nosso código foi elaborado a partir de uma rotina principal com vários parâmetros e várias sub-rotinas também parametrizadas de forma a poder adaptar-se à situação desejada.

Nossa rotina principal se chama: **SimConvePisIEN**. É claro que para se chegar onde estamos várias tentativas foram feitas e podemos afirmar que mais de cem tentativas foi realizado até se chegar ao ponto que foi considerado o melhor, incluindo além da rotina principal, as sub-rotinas e as suas sub-rotinas.

Este algoritmo de programa foi desenvolvido pelos Professores Carlos Alberto de Freitas do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro – IFRJ/Nilópolis e pelo Prof. João Jachic, Ph.D. do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN/CNEN.

Na rotina principal temos o total de 1062 linhas de comandos. Ela que é a base do código e na qual as outras rotinas estão apoiadas para poder chegar aos resultados. Para que através dela os resultados possam começar a ser gerados, os parâmetros devem ser entrados no código conforme representado abaixo.

**SimConvePisIEN(Lpr,Lpg,hapg,Ppg,del,Twi,fat,nvf,iout,fTs,fam,fsq,UR,vAr)**

Onde Lpr, Lpg, hapg, Ppg, del, Twi, fat, nvf, iout, fTs, fam, fsq, UR, vAr são os parâmetros utilizados. A seguir, é mostrada uma entrada com os valores dos parâmetros. Veja a entrada abaixo:

*SimConvePisIEN([10 10 10],[.6 .1 1],.5,40000,[.1 .1 .1 3.5],20,[45 45 25 .5 .5 .1 .2 .3 2.9 3.7 1 .5],[1 4 5 167 5 240],[0 0 1 0 0],[2 .3],8.0,[.62 .2],.6,1)* Repare bem os valores:

Lpr = [10 10 10] (vetor)

Lpg = [.6 .1 1] (vetor)

hapg = .5

Ppg = 40000

del = [.1 .1 .1 3.5] (vetor)

Twi = 20

fat = [45 45 25 .5 .5 .1 .2 .3 2.9 3.7 1 .5] (vetor)

nvf = [1 4 5 167 5 240] (vetor)

iout = [0 0 1 0 0] (vetor)

```
fTs = [2 .3] (vetor)
fam = 8.0
fsq = [.62 .2] (vetor)
UR = .6
vAr = 1
```

Esta rotina simula a refrigeração de uma placa geradora de calor por convecção natural e possui uma nova biblioteca elaborada por C. A. Freitas e foi concebida para funcionar em uma piscina de refrigeração de um reator nuclear desligado ou de um reator de pesquisa.

No programa principal, foi utilizado um grupo de sub-rotinas para que os cálculos a serem desenvolvidos se tornassem mais rápidos e aumentassem a capacidade de resolução do programa. Dentro destas sub-rotinas, são encontradas várias outras que normalmente são utilizadas para uma grafia de elementos. Ao começar o desenvolvimento a “*SimConvePisIEN*” encontra a primeira sub-rotina que é chamada de:

***SubPiscinaTriDimSim(Lpr,Lpg,hapg,55,'bkRW',3,1,Ppg)* (1)**

*Total de linhas de comandos: 106*

Esta sub-rotina simula uma representação tridimensional da piscina de dimensões Lpg com placa geradora de calor, de dimensões Lpg, colocada a uma altura hapg no eixo z, no centro da piscina de refrigeração.

teta = ângulo medido em graus, entre o eixo x e o eixo z, na vertical.

fi = ângulo que coloca a piscina em perspectiva.

É dado início à evolução temporal t entre  $(nt - 1) \times \text{deltat}$  e  $nt \times \text{deltat}$ . Logo a seguir é feita a determinação da camada limite da região motora (RM). Nesta etapa do trabalho, a matriz NxNy será gerada com nt = 1, através de outra sub-rotina que é chamada de:

***NxNy=CelulasNxNyReMo(Lpr,Lpg,hapg,del,1,io,fat)* (2)**

*Total de linhas de comandos: 52*

Esta sub-rotina nos fornece o número de células Nx e Ny na região motora da piscina de resfriamento do reator nuclear. A saída nesta sub-rotina é uma matriz NxNy de duas linhas onde a 1<sup>a</sup> linha é o vetor Nx com Nz para o correspondente nt dado e a 2<sup>a</sup> linha é o vetor Ny com Nz para o seu respectivo nt. Pode-se ainda optar por outras distribuições das células na RM na qual esta região pode ter Ny=2 ou 3 ou 4 para nz=6, etc. O fluxo de energia é emanado na direção y pela placa geradora de calor. É importante perceber que esta sub-rotina só gera a matriz a ser utilizada na RM. A determinação do número de malhas na direção y da região motora é calculada pela expressão:

$$LNyz = dely \times round(Nyo + (nt - 1) \times \tan(tetaNt) + (Nzpgf - Nhapg - 1) \times \tan(tetaNyz)) \quad (57)$$

onde  $Nyo=1$

A determinação do número de malhas na direção x da região motora é calculada pela expressão:

$$LNxz = delz \times round(Nxo + (nt - 1) \times \tan(tetaNt) + (Nzpgf - Nhapg - 1) \times \tan(tetaNxz)) \quad (58)$$

onde  $Nxo=0$ .

$$\text{teta } Nt = \frac{45 \times \pi}{180} . \quad \text{teta } Nyz = \frac{45 \times \pi}{180} \quad \text{teta } Nxz = \frac{25 \times \pi}{180} \quad (59)$$

Logo após terminar de gerar a matriz a rotina principal encontra a sub-rotina a seguir que é a responsável em regular o fluxo de calor gerado pela placa.

### ***PlacaGeradoraCalorR(Lpg,hapg,del,Ppg,fat) (3)***

*Total de linhas de comandos: 40*

Esta sub-rotina nos fornece o fluxo de calor liberado pela placa geradora de calor na RM. Este foi chamado de qpg e, é medido em (Watts por célula, sendo esta igual a  $[delx] \times [delz]$ ) incidindo sobre a água na direção y. Nesta sub-rotina será preciso eleger alguns parâmetros que irão ajudar a obter as respostas ao nosso fluxo de calor.

Nxpg é o número de malhas da placa geradora na direção x e é dado pela expressão: inteiro de (.5\*Lpgx/delx).

Este fluxo de calor gerado,  $q_o$ , é calculado então através da expressão:

$$qcpg(ncx,ncz) = \cos(\pi \times xcnx/Lpgxe) \times \cos(\pi \times zcnz/Lpgze) \times delx \times delz; \quad (60)$$

A soma dos fluxos relativos à  $\frac{1}{4}$  da metade da potência da placa será expressa por:

$$Sqcpq = Sqcpq + qcpg(ncx,ncz) \quad (61)$$

Para garantir o fluxo de calor igual a potência da placa geradora Ppg, devemos calcular o novo qcpg que será:

$$qcpg = qcpg \times \frac{Ppg}{8 \times Sqcpq} \quad (62)$$

O valor atual da potência gerada pela placa Ppg depende do tempo porque ocorre um processo de decaimento radioativo apesar de que Pgc vai diminuir seu valor muito lentamente com o tempo, de acordo com a escala que estamos trabalhando para simular a convecção. A saída desta sub-rotina é qpg.

#### **CalorAbsorvidoReMo(qpg,NxNy,Lpr,Lpg,hapg,del,1,io,fat,fsq) (4)**

*Total de linhas de comandos: 84*

Nesta sub-rotina é fornecida a quantidade de calor que é absorvido pela água em toda região motora (RM). Repare que à medida que a água está subindo em seu movimento aleatório, toda a água desta região vai se aquecendo sem, no entanto ter a mesma temperatura em suas células, que apresentam forma cúbica, para efeito de cálculo, e volume constante.

A saída desta sub-rotina é a matriz qabs. Ela calcula o calor absorvido na região motora da piscina de refrigeração no código referente a este protótipo de reator nuclear.

#### **CalorTransferidoReMo(qabs,NxNy,Lpr,Lpg,hapg,del,1,io,fat) (5)**

*Total de linhas de comandos: 84*

Nesta sub-rotina é mostrado o comportamento do calor transferido dentro da região motora, delimitada pela irradiação de calor da placa geradora ao longo do eixo y para a extensão da região motora ao longo do eixo x, paralela ao plano da

placa geradora. A saída desta sub-rotina é a matriz **qabst** que é a distribuição espacial do calor absorvido e depois transferido para toda a extensão da região motora.

Ainda dentro desta sub-rotina é introduzido o conceito de região motora estendida. Como nossa fonte de calor é constante no tempo, então o cálculo é válido para o primeiro passo de tempo ( $nt=1$ ), e então é feita a inicialização da temperatura, da massa específica através das sub-rotina “*roAguaT(Twi,0)*”, do calor específico a pressão constante através da sub-rotina “*cpAguaT(Twi,0)*” e da velocidade axial no fluido. Como pode ser visto esta sub-rotina é de suma importância para o estudo da convecção natural, já que possibilita analisar as trocas de calor que ocorrem ainda dentro da RM.

#### ***roAguaT(Twi, io) (6)***

*Total de linhas de comandos: 26*

Esta sub-rotina nos pode fornecer a massa específica da água em função da temperatura  $T$  em  $^{\circ}\text{C}$ . É fácil de ser verificado que, conforme a temperatura vai se alterando devido ao calor fornecido pela placa geradora de calor, o volume das moléculas de água tem seu valor alterado e consequentemente a massa específica desta também será alterada. Assim, precisamos desta sub-rotina para calcular os novos valores da massa específica da água.

#### ***cpAguaT(Twi,io) (7)***

*Total de linhas de comandos: 27*

Esta sub-rotina fornece o calor específico da água em função da temperatura  $T$  em  $^{\circ}\text{C}$ . Como no caso da massa específica, o calor específico também tem seu valor alterado quando ocorre variação na temperatura da água e assim pode ser utilizada esta sub-rotina para calculá-lo.

A próxima sub-rotina contém várias sub-rotinas inseridas. Desta forma, ela será chamada de “Primeira Grande Sub-rotina”.

***bTC=SubBernoulliBaseTC(Twi,VolRM,Lpr,del,igrid,iaxis,fus,io) (8)***

*Total de linhas de comandos: 549*

Nesta sub-rotina, foram introduzidas as bases que nos ajudarão a entender o funcionamento do Tubo de Corrente que se formará quando se iniciar o aquecimento da água. Colocaremos bases de perfil por nós idealizadas, sem que se julgue a veracidade dessas bases, pois as rotinas seguintes adequarão os perfis para novas bases interpoladas que serão calculadas pelo código e assim, estarão mais próximas da realidade, de acordo com o código.

Ela tem como parâmetros as grandezas já utilizadas anteriormente e, portanto não será preciso redefinir-las. Esta sub-rotina fará a chamada de oito sub-rotinas que a ajudarão a fazer todas as suas demandas internas.

***SubTempSen(Ny,fTbTC(nb,1),fTbTC(nb,2),fTbTC(nb,3),XTs,dTs,'r',io) (8-a)***

Esta sub-rotina, desenvolve os perfis de temperatura com média um. Estes perfis se fazem necessários para que se possam formar os novos perfis. Esta sub-rotina possui 24 linhas de comando.

***SubPerfilCosRet(hpc,fvzbTC(nb,1),fvzbTC(nb,2),fvzbTC(nb,3),10,hpc,0) (8-b)***

Esta sub-rotina forma os perfis de velocidade e temperatura utilizando o formato assimétrico com cosseno e reta. Esta sub-rotina possui 23 linhas de comando.

***LinhaP1P2(PE1,PE2,'b',1) (8-c)***

Aqui é utilizada somente para a criação de linhas entre dois pontos. Esta sub-rotina possui 6 linhas de comando.

***AreaP11P12P21P22(P1,P2,P3,P4) (8-d)***

Todas as vezes que se fazem necessárias, esta sub-rotina calcula a área entre os pontos indicados. Esta sub-rotina possui 13 linhas de comando.

### ***AngulogPx(xbMTC,ybMTC,'m',1) (8-e)***

As sub-rotinas do tipo tetapmx, tetapex e tetapix, denotam os ângulos formados pelos vetores velocidade nas linhas exterior, média e interna, no TC.

O deslocamento ascendente médio no topo da região motora utilizando mvzt(nt) é igual a dzm. O vetor vdzm(nt) = dzm e para nt-1 até 1, deve vir como parâmetro nesta sub-rotina .

Devemos normalizar todos os perfis fvzbTC para delatam=deltat=1. Esta sub-rotina possui 39 linhas de comando.

### ***SetaBiCsAv3(PE,[1 1], fus\*fvzbTC(nb,1),alfa,.2,15,1,1,'yb',1) (8-f)***

Nas sub-rotinas do tipo SetaBICA3, são mostrados os vetores velocidade do perfil de velocidade fvzpTC desde as extremidades até os pontos internos do Tubo de Corrente (TC). São mostrados, portanto todos os dez vetores velocidade do perfil, em todo o TC. Esta sub-rotina possui 32 linhas de comando.

### ***fvb=SubNormfvzbTC(delx, pvzbTC, dvzbTC, angbTC) (8-g)***

Esta sub-rotina que possui 22 linhas de comando, normaliza os perfis básicos “***pvzbTC***” impondo deltam=deltat=1. As bases são então normalizadas para deltat=deltam=1 e as distâncias “***dvzbTC***” atualizadas para curvas externa (E) e interna (I). Desta forma é criada a matriz bTC que é uma matriz com os componentes estendidos que possui um total de 11 colunas e 58 linhas armazenando as matrizes normalizadas fvzbTC, dvzbTC, xbEIn, ybEIn, angbn, e os vetores coluna (nc=Nvz, distb1, xMbTC,yMbTC). Assim pode ser escrito:

bTC= [efvzbTC; edvzbTC; exbEIn; eybEIn; exbElv; eybElv; eangbv; eVolPisc] onde a matriz eVolpisc possui uma parte real e outra imaginária. A parte real dela tem os volumes das 6 regiões (VolQPisc, VolRM, VolTC, VolBe, VolBd, VolVo) em que VolQPisc corresponde ao volume da quarta parte da piscina, VolRM é o volume da região motora, VolTC é o volume do tubo de corrente, VolBe é o volume fora do tubo de corrente na região inferior da piscina do lado esquerdo deste quarto de piscina, VolBd é o volume fora do tubo de corrente na região inferior da piscina do lado

direito deste quarto de piscina e VolVo é o volume em vórtice no interior deste quarto de piscina, e a parte imaginária de eVolPisc tem os comprimentos dos arcos das 2 regiões VolBd e VolBe: ccd, cvd, chd, cce, che, cve e os vetores colunas (nc=Ny+1; distb1, xbMTC, ybMTC).

O VolRM calculado, seria o de um trapezoide e foi substituído de forma estratégica no cálculo usando os volumes das células da região que são cúbicas(RM) e possuem volumes iguais a **[delx] x [dely] x [delz]**. É utilizada também a sub-rotina *SetaBiCsAv3* (8-f) que apresenta os vetores velocidade em cada posição no tubo de corrente. Outro fato importante é que ocorre o armazenamento do estado no tempo anterior “ $t_a = t - \text{deltat} = (nt - 1) \times \text{deltat}$ ”.

*qabst* tem o mesmo valor para todos os tempos nt já que a potência gerada pela placa geradora Ppg é constante no tempo, para t em minutos. É importante ressaltar neste ponto, que foi estipulada a hipótese de que todo calor emitido pela placa é então absorvido pelo fluido na RM. Alguns testes são realizados pela rotina para a verificação de alguns procedimentos. Desta forma é feita a saída desta grande sub-rotina SubBernoulli, e a rotina principal chama então mais uma sub-rotina.

#### ***Qplaca=SubCalorAguaRM(Nz2rm,Ny,Twa2yz(1,:,:),Twi,del) (9)***

Esta sub-rotina que possui 14 linhas de comando apresenta o modelo de coluna vertical que é então integrado. Foi trabalhado inicialmente na RM definida por nx=1 (placa delx). Foi então assumido que a placa aqueceria a água até uma temperatura bem inferior à 100°C, de tal modo que a 'bolha' d'água que sobe ainda é formada por líquido aquecido e não vapor.

Foi determinada a distribuição (em y) da velocidade ascendente da água no topo da RM. Para isto, a variação de velocidade “***delvzy***” foi determinada por balanço de forças na coluna nx,ny, homogeneizada em nz de nzb+1 a Nz2rm usando a sub-rotina “*SubConveccao1mo10*” e daí foi dada a distribuição de velocidade (em y) “***vz2y = vz1y + delvzy***”

As distribuições de velocidade axial não dependem de nz, já que são resultantes da homogeneização axial (em nz) da coluna nx,ny (área transversal **[delx x dely]**). Desta forma ela chama a nova sub-rotina já mencionada:

**[delvzy nzb]=SubConveccaoImo (Lpr, Nxrm, Nyrm, Nzrm, del, nxy, nt, Twai, Twa2yz, vz0y, vz1y, mato, fat, famy(ny), io) (10)**

Nesta sub-rotina é encontrado um total de 141 linhas de comando.

Ao iniciar esta sub-rotina, já é conhecida a temperatura atual da água na RM que é Twa2zy. No entanto nas células curvilíneas do TC, só se conhece a temperatura Temp1cr que é a temperatura anterior. É importante frisar que as temperaturas dentro da RM são chamadas de “Twa1zy” ou “Twa2zy” enquanto as temperaturas dentro do TC são chamadas “Temp1cr” ou “Temp2cr”, com os índices correspondentes 2 ou 1 conforme seja atual ou anterior, respectivamente. Foi adotado o modelo de coluna axial (nz) para dado nx, ny e colunas nx, ny com todos os nz da RM de nzb= 1 até Nz2rm da referida coluna.

Neste momento ela realiza o cálculo das forças envolvidas no deslocamento das células em toda a RM e em todo o TC. Na região motora se tem as forças:

- a) da gravidade,
- b) da pressão que é igual ao empuxo,
- c) as forças de viscosidade e,
- d) a força de arrasto ou drag force.

A *força da gravidade* é a força Peso, que é o produto da massa pela aceleração da gravidade, como já é sabido. No entanto a massa específica não é a mesma em toda a região motora já que há transferência de calor entre as células. Desta forma cada célula tem a sua massa específica própria. Para efeito de cálculo, foi adotada a massa específica média e com isso, a força gravitacional foi calculada como o produto desta massa específica média, do volume da célula e da aceleração gravitacional.

A *força devido a pressão* do fluido é igual à força de empuxo. Ao integrar o produto da pressão pela área, pode ser mostrado que a força de pressão é igual à força de empuxo e que a pressão é calculada pela Equação de Stevin e que a pressão na parte inferior da RM é causada pelo fluido que vem da parte lateral descendente dado pela Lei de Pascal para vasos comunicantes. Foi considerado aqui que a massa específica não é a mesma no fluido que causa a convecção dentro da RM.

A *força de viscosidade* aparece assim que a célula recebe calor e começa o seu movimento ascendente, pois esta célula sofre resistência em suas laterais de forma que as células vizinhas tendem a não deixar que ela se movimente. Isto vai causar rotação desta célula, pois as forças viscosas serão diferentes em cada lado desta célula.

Em razão da ação das células vizinhas, aparece a *força de arrasto* ou *drag force*, que é a força que tende a segurar a célula que ascende.

Pode ser reparado que a força devido à pressão está voltada para cima enquanto que as forças: gravitacional, de viscosidade e de arrasto, estão voltadas para baixo.

A velocidade de ascensão da célula pode ser enfim calculada, após terem sido realizados todos os cálculos das forças envolvidas. Como se sabe, da Segunda Lei de Newton, a resultante das forças que atuam num corpo é o produto de sua massa pela aceleração a ele imposta e que esta é a razão entre a variação de velocidade e o intervalo de tempo. Assim pode ser dito que a variação da velocidade é igual à força resultante multiplicada pelo intervalo de tempo e dividida pela massa. Portanto a velocidade final é calculada pela velocidade inicial mais a relação anterior. Esta equação não é linear, pois apresenta a velocidade  $v_z$  em ambos os membros dela, inclusive na forma exponencial, e assim, ela se torna difícil de ser resolvida.

Aqui foi alterada a hipótese em que era utilizado um deslocamento de massa de uma célula para outra desde o início da operação, ainda dentro da RM. Vamos considerar agora que dentro da RM não ocorre transferência de massa. É importante observar que esta transferência de massa vai acontecer dentro do TC nos sub-tubos que são num total de dez devido às células  $n_y$  da RM. Esta transferência de massa entre os sub-tubos, permite o cálculo da distribuição de temperatura que se altera durante todo o tempo ao longo do TC. Neste ponto pode ser calculada a temperatura média da água que se desloca para a primeira célula curvilínea através do deslocamento de massa e da temperatura na RM e a ascensão média da água na RM e no topo do TC.

Antes de se iniciar o cálculo das novas distribuições de massa e temperatura (índice 2) no tempo  $n_t$  vezes  $\Delta t$  seguinte, deve-se armazenar os resultados anteriores no tempo  $n_t-1$  vezes  $\Delta t$  (índice 1). Para serem interpolados os perfis de velocidade, devem ser utilizados os perfis básicos que foram por nós colocados anteriormente. O primeiro perfil de velocidade é atualizado pela velocidade média na

primeira célula curvilínea no TC, logo acima da RM. É importante observar que para  $nt=1$ , só existe a temperatura “Temp2cr”, pois é a temperatura atual dentro do TC para a primeira base interpolada. Em cada célula curvilínea nas bases interpoladas, tem-se a distribuição de massa delta2cr, cuja soma em todos os ny resulta na massa total deltam2 deslocada no intervalo de tempo deltat. Desta forma, a primeira célula do TC recebe a nova temperatura Temp2cr no intervalo de tempo entre  $t=nt \times deltat$  e  $(nt-1) \times deltat$ . As atualizações da temperatura que se seguem, são feitas já dentro da sub-rotina SubInterpolaPerfisTC. Este processo requer a distribuição de temperatura do instante anterior  $t - deltat$  armazenada como “Twa1zy” na RM e “Temp1cr” no TC. É também necessário guardar a distribuição de massa “deltam1cr” no intervalo anterior.

Está implícito que a coluna  $[deltax \times deltay]$  tem sempre a mesma área transversal e não ocorre transferência de massa de uma coluna para as demais dentro da região motora (RM). No entanto, observe que necessariamente “**ocorre**” transferência de massa entre sub-tubos no TC.

Esta transferência de massa entre sub-tubos faz com que a distribuição de temperatura se altere ao longo do tubo de corrente. É importante observar que o maior valor de “**deltaz**” não deve ser maior do que metade da coluna vertical da RM para o ny considerado. A temperatura média da água que se desloca para a 1<sup>a</sup> célula curvilínea é calculada usando o deslocamento “**dz2y(1,ny=1:Ny)**” e a “**Twa2yz**” da RM. A temperatura da água na RM é então atualizada devido a ascensão da água por convecção. Esta atualização é feita com a utilização da conhecida sub-rotina **roAguaT(vTemp2r,0)** e com **miAguaT(Twa2yz(1,Ny,nnz),0)** só que neste ponto levando a referida temperatura a outro ponto.

Pode-se também optar pelo uso da sub-rotina abaixo para o cálculo de “**dm12yt**”.

**Subvz12yDeltamiTC(vz1y,vz2y,rowa2cr,delx,dely,deltat,io) (11)**

Dadas as distribuições de velocidade  $vz1y(nx,ny)$  e  $vz2y(nx,ny)$  na 1<sup>a</sup> célula do TC. A sub-rotina acima, que possui 15 linhas de comando, fornece a distribuição de massa deltamy e a massa total deslocada, deltam, pela convecção durante o intervalo de tempo “ $nt \times deltat$ ” e “ $(nt-1) \times deltat$ ”.

Antes de iniciar o cálculo das novas distribuições no tempo “ $t = t2 = nt \times \text{deltat}$ ” e referenciadas por índice 2 (como em Twa2yz e Temp2cr), armazena-se aquelas já calculadas no tempo anterior, “ $t = t1 = (nt-1) \times \text{deltat}$ ” e referenciadas por índice 1 (como em Twa1yz e Temp1cr).

São interpolados perfis de velocidade usando os perfis básicos. O primeiro perfil de velocidade é atualizado pela velocidade média na primeira célula curvilínea do TC (logo acima da RM).

Quando  $nt = 1$ , só é conhecida Temp2cr(nc, nr) para nc = 1 (no TC). Em cada célula curvilínea, nc, tem-se a distribuição de massa delta2cr(nc, nr), cuja soma em nr = 1:Ny resulta na massa total deltam2, deslocada no intervalo de tempo deltat.

Assim, a 1<sup>a</sup> célula do TC é que recebe a nova temperatura Temp2cr(nc=1,:), no intervalo de tempo entre “ $t = nt \times \text{deltat}$ ” e “ $(nt-1) \times \text{deltat}$ ”. As demais atualizações da temperatura são feitas já dentro da SubInterpolaPerfisTC. Este processo requer a distribuição de temperatura do instante anterior “ $t - \text{deltat}$ ” armazenada como Twa1yz(nx, ny, nz) na RM e Temp1cr(nc, nr) no TC. Também é necessário manter a distribuição de massa deltam1cr no intervalo de tempo anterior.

Na sub-rotina SubInterpolaPerfisTCr, somente a temperatura da água no TC (Temp2cr) é calculada e atualizada. A temperatura da água na RM (Twa2yz) já foi atualizada na rotina principal.

***pTC=SubInterpolaPerfisTCr(Nt,nt,vz1y,vz2y,pvzbTC,pTbTC,dvzbTC,xbElv,ybElv,xbElv,ybElv,angbv,distb1,del,deltam1cr,vdeltam2r,Temp1cr,vTemp2r,Twi,nvf, itest, nfimTC)***  
(12)

Já foi mencionado anteriormente que haviam perfis que seriam interpolados aos perfis básicos por nós colocados que geraram o TC. Na sub-rotina citada acima, somente a temperatura da água no TC “Temp2cr” é calculada e atualizada já que a temperatura da água na RM “Twa2zy” já foi atualizada na rotina principal. Assim, todos os cálculos para interpolar novos perfis de velocidade e temperatura são desenvolvidos nesta sub-rotina. É importante salientar que esta sub-rotina interpola perfis de velocidade normalizados para  $\text{deltam}=\text{delta}=1$  utilizando as bases pvzbTC, que também estão normalizadas.

As bases utilizadas foram no total de 58 e a distância entre cada base e a primeira base é chamada de dmb1. As distribuições de velocidade, em m/s, no topo

da RM para os tempos anterior e atual são encontrados nos vetores  $vz1y$  e  $vz2y$ , respectivamente. Para testar a eficácia do código neste momento, foi verificado se para o  $deltam$  dado e a distribuição de velocidade, a “***SubDelmPerfil4c1***” fornece a distribuição de massa correta, pois é tido somente  $vTemp2r$  como  $Temp2cr$  já que estão sendo iniciadas as interpolações. Com tudo funcionando a contento, foi feita a distribuição de velocidade  $vz2cr$  ser igual a  $v12zy$ . Cabe aqui salientar que se  $deltam$  e  $deltat$  forem diferentes de um, o valor de  $vz2cr$  obtido na sub-rotina acima, é a distribuição de velocidade média de ascensão da célula e que a distribuição de massa é igual a  $deltam2cr$ . Outro termo importante calculado aqui é “ $he$ ” que é o deslocamento médio corrigido pela largura efetiva da célula curvilínea. Após todos os testes terem dado o resultado esperado e calculado tudo que é necessário, as interpolações continuam e chegamos com as bases interpoladas ao final do TC, que é a entrada da RM. Fazemos neste ponto a normalização do perfil de velocidade novamente e para determinar tanto o perfil de velocidade quanto o deslocamento médio  $he$  nesta região. Se neste retorno à RM o deslocamento médio sair na parte superior da RM, devemos então alterar  $deltat$  que o código pedirá para que seja diminuído. Após tudo resolvido, o código volta à rotina principal.

Na rotina principal, são realizados os cálculos e utilizados na sub-rotina que calcula a transferência de calor para o ar na superfície da piscina. Este calor é transferido na forma de vapor d'água e desta forma, o nível da piscina descerá certa altura a cada intervalo de tempo desejado e assim se pode ter uma estimativa de qual a quantidade de água deve ser repostada neste intervalo de tempo.

Com a “***SubDelmPerfil6n(deltam,1,delx,pv,xP,yP,ang,998.2)***” foram finalizados os testes com as bases e as sub-rotinas correspondentes demonstrando que as bases estão se comportando bem. Provavelmente devemos encontrar um número pequeno de células curvilíneas dentro do TC devido à velocidade das células aquecidas na RM que empurram as células fora desta região e dentro do TC. Com esta sub-rotina determinamos a distribuição de velocidade (em y)  $vz2zy$ . As distribuições de velocidade axial não dependem de  $nz$ , já que são resultantes da homogeneização axial (em  $nz$ ) da coluna  $nx$ ,  $ny$ .

Neste ponto foi iniciado o loop de tempo  $nt$ , e se torna importante frisar que a quantidade de calor absorvida e transferida ( $qabst$ ) para a água tem sempre o mesmo valor para todos os tempos  $nt$  já que a potência gerada pela placa geradora

é P<sub>pg</sub>, constante no tempo, para t medido em minutos. Fica claro que foi adotada a hipótese de que todo calor emitido pela placa é absorvido na Região Motora (RM) do fluido.

As sub-rotinas já utilizadas anteriormente cpAguaT, roAguaT são reutilizadas para calcular a temperatura da água no instante atual e as massas específicas da água nos instantes atual e anterior, respectivamente.

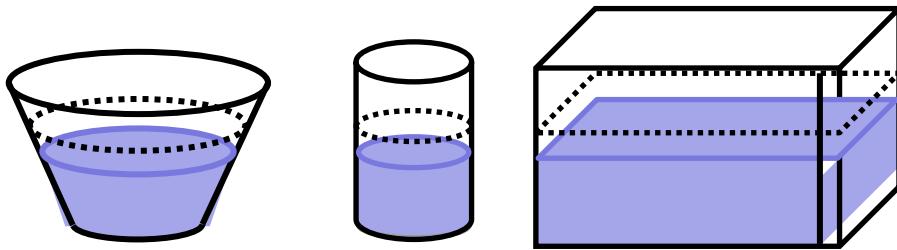
Está sendo utilizado um modelo de coluna vertical integrado dentro da região motora e utilizando o balanço de forças que lá ocorre. Por enquanto o trabalho se restringe a uma única placa e foi limitado também na região motora nas direções x e y. Na direção x foi colocado Nxrm = 7 e na direção y foi colocado Nyrm = 10. Por enquanto também está sendo desenvolvido para a primeira camada em x = 1.

Foi utilizada outra sub-rotina, na qual pode ser determinada a distribuição (em y) da velocidade ascendente da água no topo da RM. Para tal, a variação de velocidade delvzy será determinada pelo balanço de forças na coluna nx, ny, homogeneizada em nz de nzb+1 a Nz2rrm usando a sub-rotina a seguir e daí, a distribuição de velocidade em y,  $vz2zy = vz1zy + delvzy$  e  $vz2y = vz1y + delvzy$ . As distribuições de velocidade axiais não dependem de nz, já que são resultantes da homogeneização axial da coluna nx, ny.

A Sub-rotina “**PTD=SubPTDArVapor(T, Pt, UR, UE, vAr, Np, cor, LW, io)**” determina os valores reais de To e Tu fornecidos na matriz PTD. Estes valores são as temperaturas do ponto de orvalho e a temperatura de bulbo úmido, sendo que ambas já foram mencionadas anteriormente. Todas elas, incluindo a ambiente, foram colocadas no vetor T, que apresenta a notação seguinte: T=Temperatura do [ambiente; ponto de orvalho; bulbo úmido] o que implica no vetor T=[Ta To Tu]. Determina também a taxa de evaporação ( $e_r$ ), a taxa de calor de evaporação da água ( $q_n$ ), além de fornecer os valores positivos para à umidade relativa (UR), a umidade específica (UE), sendo que um deles já foi entrado, da pressão de vapor ( $p_v$ ), da pressão de vapor saturado ( $p_{vs}$ ) e da umidade específica máxima ( $UE_m$ ).

## 9. RESULTADOS

O simulador tem apresentado resultados satisfatórios de acordo com os experimentos realizados tendo nos deixado otimistas quanto a sua utilização e, também no futuro deverão ser realizados mais alguns experimentos para que se possa ter, cada vez mais, melhorados os seus resultados. Um dos experimentos foi realizado utilizando-se um galão onde foi colocado e uma mangueira foi conectada a uma torneira e foi introduzida no fundo de um galão em uma direção tangente à borda do galão, no interior deste. Desta forma quando a torneira foi aberta, a água que saia da mangueira fazia com que toda a água do galão entrasse em movimento instantaneamente. Com esse experimento simples ficou claro para nós que ao iniciar a convecção natural, toda a água da piscina entraria em movimento imediatamente. Outro experimento que pode ser exemplificado está ilustrado na figura 8 abaixo.



**Figura 8: Alguns formatos de recipientes utilizados nos experimentos**

Esta figura representa mais um experimento em que, foram utilizados vários tipos de reservatórios de água, cada um deles com formato diferente do outro. Nestes reservatórios foram colocados, em níveis diferentes, água. Os reservatórios ficaram em ambiente fechado com o ventilador ligado durante 28 dias, de forma que neste houvesse circulação de ar, durante todo o tempo, simulando um sistema exaustor. Após esse tempo, foi verificado que o nível da água nos reservatórios havia baixado o equivalente a 14,3 cm, medido de forma simples, sem muita precisão, com uma régua comum. Com isto foi mostrado então que o nível de água que abaixa por evaporação, independe da forma do recipiente e consequentemente para o nosso código, do formato da piscina e tão somente da área exposta na superfície da piscina de refrigeração na interface água-ar. Com os resultados experimentais, foram então elaboradas mais sub-rotinas em que pudesse ser

estudado o que ocorre na superfície de separação água-ar da piscina de refrigeração. Nestas sub-rotinas foram estudados o comportamento da água, do vapor e da energia liberada e, seus resultados serão apresentados adiante. Os resultados que foram encontrados com as sub-rotinas tem valores bem próximos aos experimentais. Estas sub-rotinas são:

- PressaoVaporEntalpiaEnlivreH2O,
- PressaoVaporURefUEspH2OudBS e
- SubPTDARVapor.

O software de simulação numérica foi concebido para funcionar durante vários intervalos de tempo ( $nt$ ) e para algumas entradas razoáveis da temperatura inicial da água da piscina. Explicita-se a utilização destes parâmetros de entrada na sub-rotina. O ar na exaustão foi mantido com velocidade constante ( $v_{ar}$ ) de 80 cm/s e o parâmetro de entrada da umidade relativa (UR) é de 70% e os valores de EU,  $T_0$  e  $T_u$  negativos. À placa de geração de calor, que simula o núcleo de um reator nuclear desligado, foi atribuída uma potência constante de 50 kW. Foi utilizado um passo de tempo,  $\Delta t$ , de 3,5 segundos. Como foi falado anteriormente, o simulador encontra duas soluções para a velocidade de subida. Desta forma, foram adotadas as notações  $v_i$  para a solução cuja velocidade é implícita e  $v_e$  para aquela em que a velocidade é explícita.

**Tabela 3 - Soluções implícita e explícita, com o número de nt**

<b><math>nt</math></b>	<b><math>t = nt \times \Delta t</math> (s)</b>	<b><math>v_i</math> (cm/s)</b>	<b><math>v_e</math> (cm/s)</b>
<b>01</b>	3,50	0,286	0,315
<b>02</b>	7,00	0,799	0,892
<b>03</b>	10,5	1,275	1,588
<b>04</b>	14,0	1,808	2,285
<b>50</b>	175,0	4,154	4,154

Nota-se pelos resultados apresentados na tabela 1 que a solução explícita  $v_e$  para a velocidade de ascensão é superestimada quando comparada com a solução implícita  $v_i$ , mais exata. Entretanto, ambas as velocidades  $v_i$  e  $v_e$  convergem para a velocidade terminal  $v_{lim}$  após cerca de dois minutos do processo computacional de remoção de calor.

A linha de comando para o código de simulação de convecção com parâmetros de entrada para este modelo de fonte de geração de calor, mostrado na figura 1, está registrado a seguir:

```
SimConvePisIEN ([5 5 5],[.6 .1 1],.5,50000,[.1 .1 .1 3.5],20,[45 45 25 .5 .5 .1 .2
.3 2.9 3.7 1 .5],[1 4 5 167 5 235],[0 0 1 0 0],[2 .3],8.0,[.65 .2],.7,.8);
```

O código gera uma sequencia temporal de dados entrados e computados alguns deles dispostos em gráficos e tabelas. Foram selecionados alguns destes gráficos e dados computados.

Na figura 9, o vetor velocidade do fluido deslocado é mostrado para os seis primeiros passos de tempo. Inicialmente o deslocamento devido à convecção é muito pequeno então o comprimento das setas foi aumentado de modo que se tornassem mais visíveis. É usado o subscrito  $z$  para o deslocamento de subida do fluido vertical ao longo do eixo  $z$ , o subscrito 1 para  $nx = 1$  e o subscrito  $y$  referindo-se à distribuição ao longo da direção  $y$ . A distribuição de velocidade inicial  $v_0$  fica então representada por  $vz1y$ .

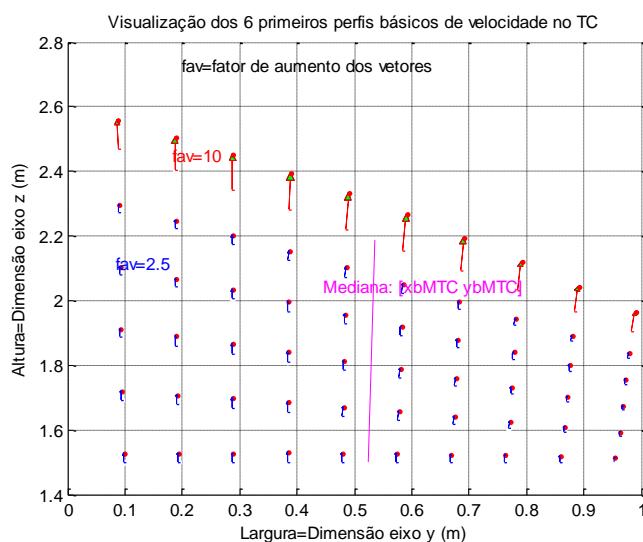
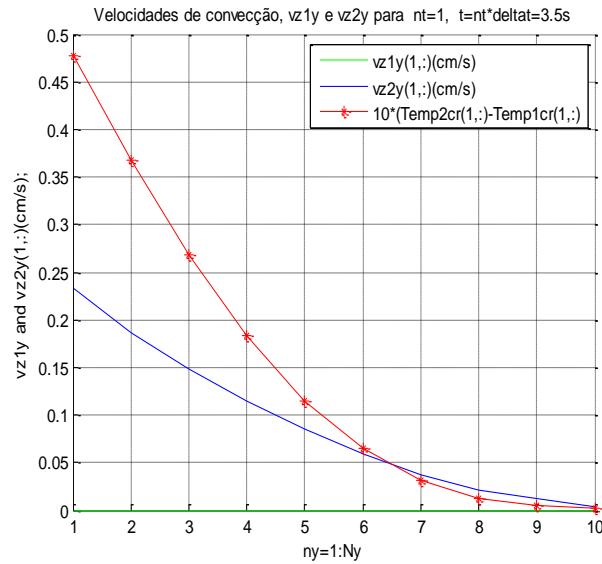


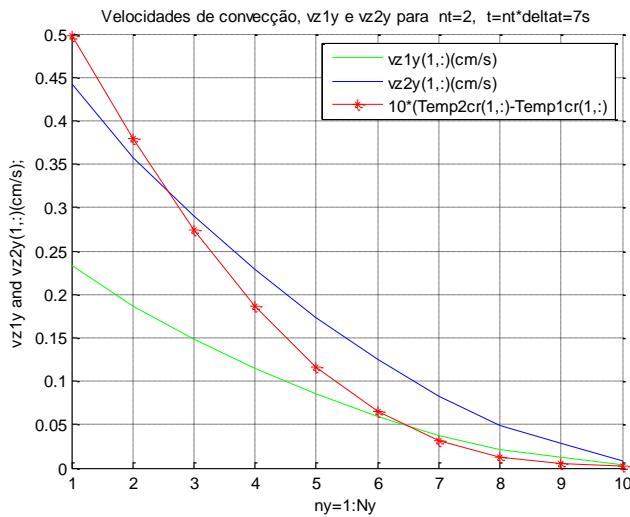
Figura 9 – 6 primeiros perfis de velocidade no tubo de corrente.

Na figura 10, é mostrada a primeira distribuição de velocidade de convecção quando a velocidade inicial é zero em todo lugar.



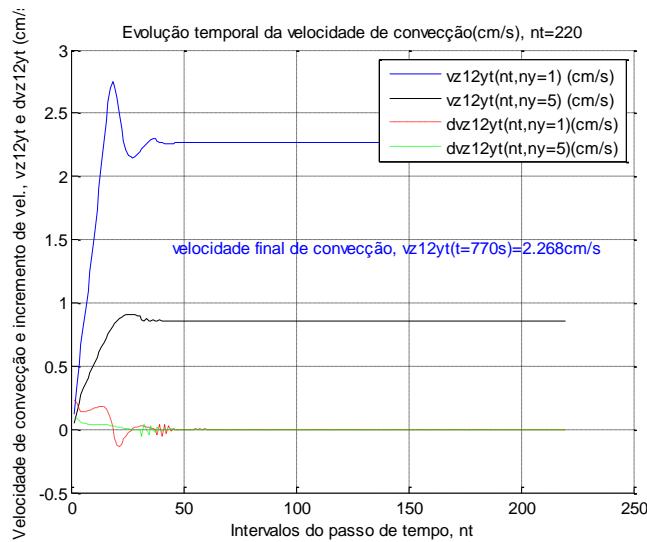
**Figure 10 – Velocidades de Convecção, nt=1, t=nt\*Δt=3.5 s**

A seguir, no segundo intervalo do passo de tempo, a distribuição de velocidade de convecção de subida vz2y é bem maior, como mostrado na figura 11, principalmente porque a velocidade no passo de tempo anterior agora não é zero, o que resulta em força de resistência mais baixa nas vizinhanças da célula. É notado que a velocidade de convecção é maior para o tubo de corrente próximo à placa de geração de calor.



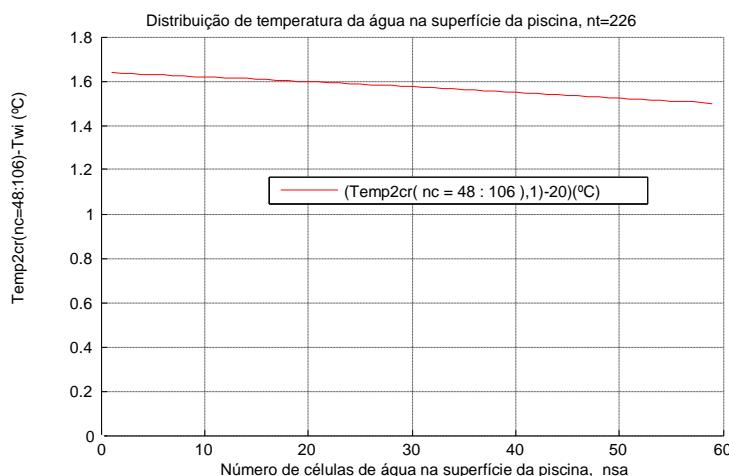
**Figura 11 – Velocidades de convecção, nt=2, t=nt\*Δt=7.0 s**

A evolução temporal da distribuição de velocidade, mostrada na figura 12, eventualmente converge para uma velocidade terminal, mas tem apresentado alguns valores acima do esperado (over shooting) maiores que o valor limite. Isto tem ocorrido devido somente ao algoritmo numérico para a solução da equação diferencial que rege a mudança no momento linear e o somatório das forças atuantes na célula do líquido aquecido.



**Figura 12 – Velocidades de convecção, nt=3, t=nt\*Δt=10.5 s**

A saída do código também transcreve listagem detalhando a distribuição de temperatura na superfície da piscina, mostrada na figura 13. A corrente que tem fluido da região central da piscina para a borda direita em um quarto do diagrama desta.



**Figura 13 – Distribuição de temperatura na superfície da água da piscina.**

Os resultados do simulador registram que são necessários 168 segundos para que a água aquecida alcançasse a superfície superior da piscina e 13,2 minutos para circular ao longo do tubo de corrente do tipo de Bernoulli (TC), como é mostrado na Figura 14. Também pode ser observado na Figura 14, que a distribuição da temperatura da água que entra na região motora (RM) foi suavizada devida principalmente à transferência de massa e alguma difusibilidade de calor enquanto estava transitando no tubo de corrente TC.

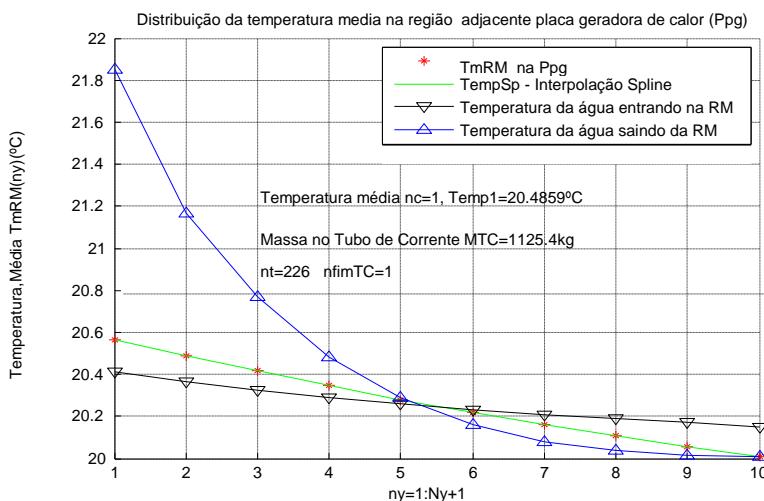


Figura 14 – Distribuição da temperatura média próxima à região motora RM.

Na figura 15 foi mostrada a distribuição da velocidade de convecção quando a água que entra na região motora RM já foi aquecida no primeiro ciclo, que levou 13,2 minutos depois de ter sido iniciado o processo de remoção de calor.

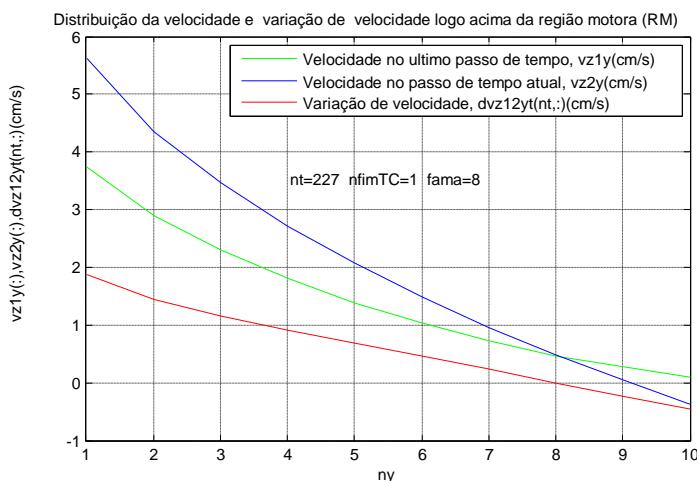
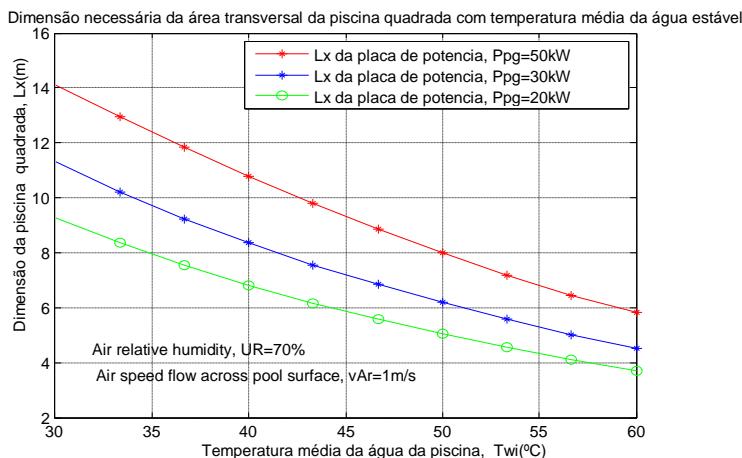


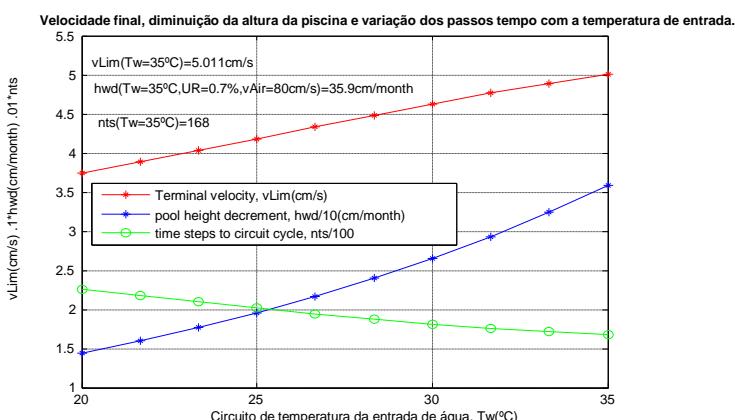
Figura 15 – Distribuição da Velocidade e variação da velocidade logo acima da RM.

Na Figura 16, foi mostrado que a dimensão desta piscina quadrada deve ser próxima de  $L_x = 11$  m se for necessário remover o calor do núcleo irradiador de 50 kW, ainda que seja permitido que a temperatura média da água seja aproximada de 40 ° C, mesmo quando o sistema de exaustão de ar esteja sendo operado com fluxo de ar de 1 m / s com uma entrada de humidade relativa de 70%. Haverá sempre uma quantidade de água e calor a ser removido da piscina para a atmosfera.



**Figura 16 – Dimensão requerida da área quadrada.**

Na Figura 17, é possível observar que o nível da piscina deve ter abaixado em torno de 36 cm por mês devido à evaporação e a situação do sistema de exaustão de ar, se a temperatura média da água da piscina permanecesse estabilizada em cerca de 35°C. Assim, a velocidade terminal média de convecção atinge cerca de 5 cm/s. Este nível pode ser reduzido se a temperatura média da água puder ser estabilizada em um valor menor.



**Figura 17 – Velocidade final com a temperatura de entrada.**

Os resultados obtidos na simulação ficam bem mais evidenciados quando, ao utilizar a sub-rotina PTD=SubPTDArVapor(T, Pt, UR, UE, vAr, Np, cor, Lw, io) para alguns valores dados de entrada especiais. Verificou-se que as simulações haviam fornecido resultados que se aproximam razoavelmente bem dos experimentos realizados de evaporação. As tabelas a seguir explicitam estas respostas, que são bastante significativas. A piscina investigativa neste trabalho possui área superficial de 25 m<sup>2</sup>. Assim, a quantidade de calor na superfície da piscina por m<sup>2</sup>, é igual à potência total dividida por essa área que é igual a 2 kW/m<sup>2</sup>. Ao ser utilizado o código para alguns valores de temperatura, umidade relativa, e velocidade do ar na superfície, foram montadas as tabelas a seguir. Os resultados encontrados estão mostrados na tabela 4 abaixo.

**Tabela 4 – Resultados obtidos ao rodar a sub-rotina PTD**

P <sub>t</sub> (kW)	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	Q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	T <sub>H2O</sub> (°C)	UR(%)	vAr(m/s)	q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
50	5	5	2	50,00	50	1	1,276
50	5	5	2	60,00	50	1	2,346
50	5	5	2	55,00	50	1	1,724
50	5	5	2	57,45	50	1	2,002

Aqui foi percebido que a temperatura da água para os dados de entrada e saída é muito alta em relação aquilo que foi desejado e que, portanto, esta piscina não tem as dimensões favoráveis para sua utilização, já que para se obter a potência ou fluxo de calor desejado de saída deve-se trabalhar com uma temperatura de 57,45 °C, considerada alta para fins de resfriamento de combustível nuclear.

**Tabela 5 – Resultados obtidos ao rodar a sub-rotina PTD**

P <sub>t</sub> (kW)	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	Q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	T <sub>H2O</sub> (°C)	UR(%)	vAr(m/s)	q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
50	10	10	.5	30,00	50	1	0,3851
50	10	10	.5	40,00	50	1	0,7041
50	10	10	.5	35,00	50	1	0,5220
50	10	10	.5	34,50	50	1	0,5060

Utilizando o código agora, com dados de entrada mais favoráveis, foi verificado que com o aumento da área da piscina, a temperatura da água da piscina atinge somente a temperatura de 34,5 °C, o que é bom, pois a água da piscina não deve ter temperatura muito alta para que a evaporação não seja muito grande e a reposição de água possa ser mais bem moderada.

**Tabela 6 – Resultados obtidos ao rodar a sub-rotina PTD**

P <sub>t</sub> (kW)	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	Q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	T <sub>H2O</sub> (°C)	UR(%)	vAr(m/s)	q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
50	10	10	0,5	30,00	70	0,8	0,2132
50	10	10	0,5	40,00	70	0,8	0,3919
50	10	10	0,5	50,00	70	0,8	0,7180
50	10	10	0,5	44,05	70	0,8	0,5000

Nesta nova execução do simulador, foi alterada a umidade relativa do ar para 70%, que é o valor médio da umidade do ar no Rio de Janeiro, e a velocidade do ar na superfície da piscina para 0,8 m/s. Neste caso, foi mantida a área da piscina em 100 m<sup>2</sup>. Foi concluído que a temperatura média da água ficará em torno de 44,05 °C, o que é alta para o que é proposto, já que a água deve ficar com temperatura inferior a 40 °C, pelos motivos expostos anteriormente.

**Tabela 7 – Resultados obtidos ao rodar a sub-rotina PTD**

P <sub>t</sub> (kW)	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	Q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	T <sub>H2O</sub> (°C)	UR(%)	vAr(m/s)	q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
40	10	10	0,4	34,20	70	1	0,400

Aqui foi exposta somente a parte que era de interesse, com a mesma umidade relativa média do Rio de Janeiro, com a velocidade do ar de 1 m/s e temperatura média terminal de 34,2 °C. Concluiu-se que o propósito de ter pouca evaporação e, consequentemente, pouca reposição de água na piscina, fica contemplado com esta configuração, uma vez que a temperatura terminal ficou em nível adequado de 34,2 °C.

**Tabela 8 – Resultados obtidos ao rodar a sub-rotina PTD**

A	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	Q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	T <sub>H2O</sub> (°C)	UR(%)	vAr(m/s)	q <sub>n</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
40	10	10	0,4	30,00	70	0,8	0,2132
40	10	10	0,4	40,00	70	0,8	0,3919
40	10	10	0,4	40,30	70	0,8	0,4000

Quando foi utilizado nível mais baixo da velocidade do ar no sistema de exaustão foi observado que a temperatura média ficou em torno de 40,30 °C.

A temperatura do corpo humano é em média de 37 °C e, por esta razão uma temperatura um pouco acima deste valor não nos traz nenhum risco, assim como não trará malefícios para o núcleo do reator nuclear, onde está o sistema contendo os elementos combustíveis e todo seu complexo nuclear.

## 9. CONCLUSÕES

O software de simulação de convecção depende de alguns parâmetros de entrada, mas que podem ser calibrados, confrontando os resultados simulados com os dados experimentais. A distribuição de velocidade terminal simulada, assim como a evolução temporal da distribuição de temperatura da água na região do TC, variando apenas acima da RM ( $nt = 1$ ) até à superfície da piscina ( $NC = 40$ ), concorda razoavelmente bem com os dados experimentais conhecidos (6).

A quantidade de água evaporada simulada evidencia o correspondente decréscimo no nível da água da piscina que também foram confrontados com os resultados experimentais feitos com alguns pequenos reservatórios de água. Os resultados simulados se aproximam suficientemente bem dos experimentos. Variando alguns parâmetros de entrada, os resultados obtidos pelo simulador mostram que ele pode ser útil para estimar as dimensões adequadas da piscina de arrefecimento, além de permitir maior conhecimento sobre a taxa de variação da temperatura e também da distribuição de velocidade de convecção.

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o código fornece bons resultados, tanto a respeito da distribuição de temperatura que a água atinge quanto as dimensões otimizadas da piscina. Pode-se observar também que se for permitido que a temperatura da piscina seja alta, então resulta que a superfície de separação água-ar pode ser pequena, com baixa velocidade do ar. No entanto, se for desejado que a temperatura da água, seja baixa então se deve aumentar a área da superfície da piscina de arrefecimento e aumentar a velocidade do ar. Os experimentos feitos para verificar a evaporação da água em recipientes são satisfatórios e evidenciam que o simulador reproduz alguns resultados adequadamente.

Adicionalmente sob o ponto de vista da retirada de calor, é melhor utilizar uma piscina em que  $L_x$  e  $L_y$  sejam muito maiores que  $L_z$ .

No entanto quando a proteção radiológica é importante então se deve optar por  $L_z$  muito maior que  $L_x$  e  $L_y$ .

Pode-se concluir que uma piscina otimizada deve ter dimensões comparáveis ( $L_x \approx L_y \approx L_z$ ) de tal forma que protegerá o público de radiações e retirará o calor residual, mesmo quando a temperatura terminal é razoavelmente baixa.

No entanto, novos trabalhos, devem ser feitos para que se possa validar a maioria dos resultados simulados encontrados e também, para que novas informações, melhor detalhamento e a introdução de novas sub-rotinas no código para que ele possa ser considerado um código de pesquisa acadêmica e com bons resultados.

## 10. REFERÊNCIAS

1. BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*. New York: John Wiley & Sons, Inc 1960.
2. DELHAYE, J.M.; GIOT, M.; RIETHMULLER, M.L. *Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering*. New York: McGraw- Hill Book Company 1981.
3. FOX, R.W.; McDONALD, A.T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA 1995.
4. POTTER, M.C.; WIGGERT, D.C. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Thomson 2004.
5. POTTER, M.C.; FOSS, J.F. *Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc 1975.
6. SILVA, R.B. *Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor*. São Paulo: DLP-Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico 1968.
7. SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.; NYLEN, G.J.V.; *Fundamentals of Thermodynamics*, New York-John Wiley & sons, Inc. 1988.
8. VELOSO, M. A. F.; *Análise Termofluidodinâmica de Reatores Nucleares de Pesquisa Refrigerados a Água em Regime de Convecção Natural*, Campinas, SP: [s.n.], 2004.
9. “MATLAB - The Language of Technical Computing” of MathWorks.
10. FOX, R. W.; Mcdonald, A.T.. *Introdução à /a Mecânica dos Fluidos*, LTC-Livros Técnicos e Científicos, Editora SA, Rio de Janeiro & Brasil (1996).
11. ROTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; *Mecânica dos Fluidos*, Thomson, São Paulo & Brasil (2004).
12. INTERNET, <http://www.engineering.com>, AirPsychrometrics.

13. Lopes, R.P.; Silva, J.S. e Rezende, R. C.; *internet psicometric.pdf*-Princípios Básicos de psicometria.

14. D. F. YOUNG; B. R. MUNDSON; T. H. OKIIHI. *Uma Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Edgard Blucher, São Paulo & Brasil (2005).

## Apêndice A

### Mapa do código

