

ISAQUE DE SOUZA RODRIGUES

“ESTUDOS DE LIMITES TERMO-HIDRÁULICOS PARA PROJETO  
DE VARETAS COMBUSTÍVEL DE REATORES NUCLEARES”

Dissertação apresentada 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 – Profissional em  
Engenharia de Reatores

Orientadores:

Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN) e  
Prof. Ph.D. Paulo Augusto Berquó de Sampaio (PPGIEN/CNEN)

Rio de Janeiro

2012

RODR Souza Rodrigues, Isaque

Estudos de limites termo-hidráulicos para projeto de varetas combustível de reatores nucleares / Isaque de Souza Rodrigues. -- Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2012.

xviii, 79f. :il. ; 31cm

1.1.1.1

1.1.1.2 Orientadores: Maria de Lourdes Moreira e Paulo Augusto Berquó de Sampaio

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2012.

1. Engenharia de Reatores. 2. Elementos Finitos.  
3. Vareta Combustível.

CDD

CDU

**“ESTUDOS DE LIMITES TERMO-HIDRÁULICOS PARA PROJETO DE VARETAS  
COMBUSTÍVEL DE REATORES NUCLEARES”**

Isaque de Souza Rodrigues

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 – PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE REATORES

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Maria de Lourdes Moreira, D. Sc.

---

Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, Ph.D.

---

---

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

## DEDICATÓRIA

À minha querida esposa Lorana pela paciência e honestidade. Esse trabalho não seria possível sem sua existência.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por possibilitar à humanidade estudar suas obras e deliciar-se, ainda que de maneira limitada, de sua perfeição.

À minha família pelo apoio irrestrito e carinho constante.

Aos meus orientadores, Prof<sup>a</sup>. Maria de Lourdes Moreira (Carinhosamente Prof<sup>a</sup>. Malú) e Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, pelo tempo dedicado e compreensão às minhas limitações.

Aos companheiros de mestrado que militaram junto comigo essa luta, dividindo tristezas e alegrias.

Aos professores do Programa de Pós Graduação de IEN pelo empenho e dedicação.

Às funcionárias da secretaria do curso que, por vezes, foram um refúgio quando momentaneamente as coisas não iam bem.

Ao amigo Sérgio Moraes. Esse curso deu-me mais que conhecimento e um diploma. Deu-me um grande amigo.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGIEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. SC.)

“ESTUDOS DE LIMITES TERMO-HIDRÁULICOS PARA PROJETO DE VARETAS COMBUSTÍVEL DE REATORES NUCLEARES”

Isaque de Souza Rodrigues  
Fevereiro de 2012

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN) e  
Prof. Ph.D. Paulo Augusto Berquó de Sampaio (PPGIEN/CNEN)

Programa: Ciência e Tecnologia Nucleares – IEN/CNEN

O presente trabalho propõe-se a apresentar um método de análise dos limites termo-hidráulicos de um reator PWR típico através da resolução numérica das equações de transferência de calor aplicado a varetas combustível. Os limites termo-hidráulicos estudados são a temperatura limite do combustível e o DNBR mínimo do projeto. A resolução numérica foi feita através do método de elementos finitos por um código computacional, escrito em linguagem Fortran, gerado especificamente para esse fim e que utiliza o programa GID para a geração da malha de entrada e as saídas gráficas. O Método de Newton-Raphson foi usado neste trabalho para encontrar o valor de parâmetros que otimizem o nível de potência, fazendo com que a temperatura do combustível e o DNBR mínimo alcancem os limites de projeto. A validação foi feita comparando-se os resultados gerados pelo código computacional com os resultados analíticos encontrados no livro de Todreas e Kazimi para varetas concêntricas ao revestimento e com os resultados analíticos encontrados por Nijssing para varetas excêntricas ao revestimento. Foram feitas simulações para estudos de casos onde houve variações na temperatura limite de projeto, na excentricidade das pastilhas combustível, no perfil de distribuição de potência, na vazão mássica e na correlação de DNBR. Esses estudos serviram para verificar a melhor condição de funcionamento do reator considerando as características analisadas.

Palavras chave: Vareta combustível, método dos elementos finitos, transferência de calor, combustível nuclear.

Abstract of the dissertation presented to PPGIEN/CNEN as part of the necessary requirements for obtaining of Master's degree Science (M. Sc.)

“STUDIES ON THE LIMITS OF THERMO-HYDRAULIC DESIGN OF FUEL RODS FOR NUCLEAR REACTORS”

Isaque de Souza Rodrigues  
February, 2012

Advisors: Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN) e  
Prof. Ph.D. Paulo Augusto Berquó de Sampaio (PPGIEN/CNEN)

Program: Nuclear Science and Technology – IEN/CNEN

This study aims to present a method of analysis of thermal hydraulic limits of a typical PWR reactor through numerical solution of the equations of heat transfer applied to the fuel rods. The limits thermo-hydraulic studied are the temperature limit of the fuel and the minimum DNBR project. The numerical solution was performed using the finite element method for a computer code written in Fortran, generated specifically for that purpose and that the program uses GID to mesh generation for input and graphical output. The Newton-Raphson method was used in this work to find the value of parameters that optimize the distribution of power, causing the fuel temperature and minimum DNBR reach the design limits. The validation was performed by comparing the results generated by the computer code with the analytical results found in the book of Todres Kazimi and sticks to the coating and concentric with the analytical results found by Nijsing eccentric rods to the finish. Simulations were made for case studies where there were variations in the temperature range of design, the eccentricity of the fuel pellets, the profile of power distribution, the mass flow rate and correlation of DNBR. These studies served to determine the best operating condition of the reactor considering the characteristics analyzed.

Keywords: Fuel rod, finite element method, heat transfer, nuclear fuel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Parte da estrutura da grade de um elemento combustível.....	20
Figura 2-2: Célula equivalente .....	21
Figura 2-3: Canal e célula equivalentes em uma distribuição discreta de $z$ .....	21
Figura 2-4: Distribuição axial de potência .....	22
Figura 2-5: Discretização de $q'''(z)$ .....	25
Figura 2-6: DNB .....	28
Figura 3-1 Figura 3-1: Distribuição de $q'''(z)$ ao longo da vareta combustível.....	31
Figura 3-2 Gráfico esquemático da distribuição de $q'''(z)$ ao longo da vareta combustível....	32
Figura 3-3: Domínios e fronteiras de um seção transversal.....	33
Figura 3-4: Distribuição de temperatura em pastilhas concêntrica e excêntrica.....	34
Figura 3-5: Malhas usadas pelo código computacional.....	35
Figura 4-1: Malha da pastilha combustível concêntrica ao revestimento.....	46
Figura 4-2: Gráfico de distribuição de temperatura em $z = 0$ .....	47
Figura 4-3: Malha da pastilha combustível com excentricidade de 10%.....	52
Figura 4-4: Gráfico de distribuição de temperatura em $z = 0$ .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Dados do problema.....	42
Tabela 4-2: Comparação de resultados.....	47
Tabela 4-3: Comparação de resultados.....	48
Tabela 4-4: Comparação de resultados.....	50
Tabela 4-5: Dados do problema apresentado por Nijsing (1966).....	51
Tabela 4-6: Comparação de resultados.....	55
Tabela 5-1: Tipos de malhas usadas.....	57
Tabela 5-2: Dados de simulação.....	59
Tabela 5-3: Resultados de simulação.....	59
Tabela 5-4: Resultados de simulação.....	60
Tabela 5-5: Dados de simulação.....	63
Tabela 5-6: Comparação de resultados.....	63
Tabela 5-7: Dados de simulação.....	64
Tabela 5-8: Comparação de resultados.....	66
Tabela 5-9: Dados de simulação.....	67
Tabela 5-10: Comparação de resultados.....	70
Tabela 5-11: Dados de simulação.....	70
Tabela 5-12: Comparação de resultados.....	75
Tabela 5-13: Comparação de resultados.....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1: Evolução de $q'''(z)$ .....	49
Gráfico 4-2: Comparação de dados de Nijsing(1966) e de resultados do programa .....	53
Gráfico 5-1: Evolução de $q'''(z)$ considerando a temperatura limite na pastilha combustível.....	60
Gráfico 5-2: $T_{bulk}$ considerando a temperatura limite na pastilha combustível .....	61
Gráfico 5-3: Distribuições de $q'''(z)$ considerando a temperatura limite na pastilha combustível.....	65
Gráfico 5-4: $T_{bulk}$ considerando a mudança de perfil de $q'''(z)$ .....	65
Gráfico 5-5: Distribuições de $q'''(z)$ considerando a excentricidade na pastilha combustível.....	67
Gráfico 5-6: $T_{bulk}$ considerando a excentricidade na pastilha combustível.....	68
Gráfico 5-7: $T_{bulk}$ de saída considerando diferentes taxas de vazão mássica.....	71
Gráfico 5-8: $T_{bulk}$ ao longo do canal considerando diferentes taxas de vazão mássica .....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A$  = Área da vareta em contato com o refrigerante.

$A_{canal}$  = Área do canal refrigerante.

$C_p$  = Calor específico à pressão constante.

$d_p$  = Diâmetro da pastilha combustível.

$\rho_f$  = Densidade líquido saturado.

$\rho_g$  = Densidade vapor saturado.

$d_e$  = Diâmetro externo do revestimento.

$D_h$  = Diâmetro hidráulico equivalente.

$\Delta z$  = Variação na coordenada Z.

DNB = Departure from Nucleated Boiling.

DNBR = Departure from Nucleated Boiling Rate.

$E_{in}$  = Energia de entrada no plano.

$E_{out}$  = Energia de saída no plano.

$g$  = Aceleração da gravidade.

$g_c$  = Fator de conversão.

GID = The personal pre and postprocessor.

$h_z$  = Entalpia do refrigerante na altura  $z$ .

$H$  = Altura da vareta.

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporização.

$\Delta h$  = Entalpia da localização  $z$  menos a entalpia de entrada.

$h_{(z+\Delta z)}$  = Entalpia do refrigerante na altura  $(z + \Delta z)$ .

$k$  = Condutividade térmica.

$k_{água}$  = Condutividade térmica da água.

$k_{TD}$  = Condutividade térmica teórica.

$L_e$  = Comprimento extrapolado de uma vareta combustível.

- 

$\dot{m}$  = Taxa de vazão mássica do refrigerante.

MATPRO = A Library of Materials Properties for Light-water-Reactor Accident analysis.

$Nu$  = Número de Nusselt.

NBSNRCE = Código computacional para avaliação propriedades da água.

$Pr$  = Número de Prandtl

$p'$  = Perímetro da vareta na seção transversal.

PWR = Pressurized Water Reactor.

$q'(z)$  = Taxa linear de calor na altura  $z$ .

$q''(z)$  = Fluxo axial de calor na altura  $z$ .

$q'''(z)$  = Taxa de geração volumétrica de calor na altura  $z$ .

$q''_{crit}$  = Fluxo crítico de calor nas condições de operação.

$q''_{local}$  = Fluxo de calor local.

$q'''_{max}$  = Taxa de geração volumétrica de calor máxima.

$Q$  = Energia recebida entre os planos.

$R_f$  = raio da pastilha combustível.

$Re$  = Número de Reynolds.

$T_{CL}$  = Temperatura máxima central do combustível.

$T$  = Temperatura.

$T_{bulk}$  = Temperatura média do refrigerante.

$T_{sat}$  = Temperatura de saturação.

$T_{CO}$  = Temperatura da parte externa do revestimento (cladding out).

$\mu$  = Viscosidade dinâmica.

$\mu_{\text{água}}$  = Viscosidade dinâmica da água.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
1.2. OBJETIVO.....	17
1.3. CONTRIBUIÇÃO.....	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
<b>2. MODELAGEM FÍSICA</b> .....	19
2.1. MODELO FÍSICO.....	19
2.2. MODELO DISCRETO.....	20
2.2.1. PELFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA TAXA VOLUMÉTRICA DE GERAÇÃO DE CALOR ( $q'''(z)$ ).....	22
2.2.2. BALANÇO DE ENERGIA.....	23
2.2.3. CALOR RECEBIDO.....	24
2.2.4. ENTALPIA.....	25
2.2.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO FLUIDO REFRIGERANTE ( $T_{bulk}$ ) A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO DISCRETA DA POTÊNCIA.....	26
2.2.6. CÁLCULO DO DNBR.....	27
2.2.6.1. MÉTODO DE ANÁLISE DE DNB.....	28
<b>3. MODELAGEM COMPUTACIONAL</b> .....	30
3.1. DESCRIÇÃO GERAL DO CÓDIGO.....	30
3.2. DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(Z)$ .....	30
3.3. DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA EM CADA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	32
3.4. OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA.....	35
3.4.1. O MÉTODO NEWTON-RAPHSON.....	36
3.5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DEPENDENTES DA TEMPERATURA.....	38
3.6. FLUXOGRAMA DO CÓDIGO VARETA_COMBUSTIVEL.....	40
<b>4. VALIDAÇÃO</b> .....	41
4.1. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(z)$ PARA PASTILHA CONCÊNTRICA AO REVESTIMENTO.....	41
4.1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	41
4.1.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	42
4.1.3. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA.....	45
4.1.4. DADOS DE DISCRETIZAÇÃO.....	46
4.1.5. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	46
4.2. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS AO REVESTIMENTO.....	48
4.2.1. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	48
4.2.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES TÉRMICAS COMO DEPENDENTES DA TEMPERATURA.....	49
4.2.3. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	50
4.3. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(z)$ PARA PASTILHA EXCÊNTRICA AO REVESTIMENTO.....	50
4.3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	51
4.3.2. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA.....	52
4.3.3. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	53
4.4. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS.....	54
4.4.1. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	55

<b>5. ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>56</b>
5.1. DADOS DE DISCRETIZAÇÃO.....	56
5.2. <u>CASO Nº1</u> : ESTUDO DE FATORES LIMITANTES DE PROJETO.....	58
5.2.1. OBJETIVO.....	58
5.2.2. DADOS DA SIMULAÇÃO.....	58
5.2.3. RESULTADOS.....	59
5.3. <u>CASO Nº2</u> : COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA DIFERENTES PERFIS DE $q'''(z)$ .....	62
5.3.1. OBJETIVO.....	62
5.3.2. DADOS DA SIMULAÇÃO.....	62
5.3.3. RESULTADOS.....	63
5.4. <u>CASO Nº3</u> : COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA PASTILHAS EXCÊNTRICAS AO REVESTIMENTO COM RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS.....	66
5.4.1. OBJETIVO.....	66
5.4.2. DADOS DA SIMULAÇÃO.....	66
5.4.3. RESULTADOS.....	67
5.5. <u>CASO Nº4</u> : COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA DIFERENTES VALORES DE VAZÃO MÁSSICA.....	69
5.5.1. OBJETIVO.....	69
5.5.2. DADOS DA SIMULAÇÃO.....	69
5.5.3. RESULTADOS.....	69
5.6. <u>CASO Nº5</u> : COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE DNBR PARA DIFERENTES CORRELAÇÕES .....	73
5.6.1. OBJETIVO.....	73
5.6.2. DADOS DA SIMULAÇÃO.....	73
5.6.3. RESULTADOS.....	76
 <b>6. RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	 <b>77</b>
6.1. RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	77
6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
 <b>REFERÊNCIAS.....</b>	 <b>79</b>
 <b>APÊNCICE.....</b>	 <b>81</b>

## CAPITULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o advento da revolução industrial no século XIX, a necessidade por fontes de energia tornou-se uma prioridade para o desenvolvimento de novas tecnologias e produção de bens de consumo. Desde então, os combustíveis fósseis foram o recurso mais utilizado para obtenção dessa energia. Porém, com o passar dos anos, essa fonte tem apresentado um problema de proporções mundiais. Segundo o Quarto Relatório de Avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, “A emissão de CO<sub>2</sub> tem aumentado em torno de 80% entre 1970 e 2004 (28% entre 1990 e 2004) e representa 77% do total de emissão de gases antropogênicos que contribuíram para o efeito estufa em 2004. O maior aumento nesse período se deve ao setor de fornecimento de energia (aumento de 145%)”. Esse mesmo relatório diz ainda que para níveis de estabilização mais baixos, os cenários colocam mais ênfase na utilização de fontes energéticas com baixo teor de carbono, tais como energia renovável e energia nuclear, e o uso do CO<sub>2</sub> capturado e armazenado.

Processos de produção eficientes e economicamente viáveis de energia além de serem fundamentais para o desenvolvimento industrial, também são necessários para o desenvolvimento social. São instrumentos para uma melhor qualidade de vida no contexto contemporâneo para toda a humanidade. Segundo World energy Outlook 2004, em 2002 quase 1,6 bilhão de pessoas em países em desenvolvimento não tinham acesso a energia elétrica em suas casas, representando pouco mais de um quarto da população mundial. Esse mesmo relatório indica ainda que os governos precisam agir de forma decisiva para acelerar a transição para combustíveis modernos e para romper o círculo vicioso da pobreza e do subdesenvolvimento humano de energia nos países mais pobres do mundo. Isto implicará a melhoria da disponibilidade e acessibilidade da energia comercial, particularmente em áreas rurais.

É nesse contexto que a energia nuclear tem se tornado uma necessária alternativa para a matriz energética mundial. Para Silva (2007), o programa INPRO (Internacional Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) que foi iniciado em 2000, baseado numa

resolução da Conferência Geral da Agência Internacional de Energia Atômica (Aiea), reconhece que o fornecimento de energia sustentável para a humanidade no século XXI irá requerer o fornecimento em grande escala da energia nuclear assim como de outras fontes. Ele também reconhece que a energia nuclear possui tecnologia capaz de oferecer uma fonte de energia inesgotável cujo fornecimento pode reduzir a poluição ambiental e os volumes de rejeitos que necessitam gerenciamento, incluindo as emissões de gases do efeito estufa.

No Brasil, há atualmente em operação duas usinas nucleares: Angra 1 e Angra 2. Ambas são equipadas com um reator nuclear tipo PWR (sigla em inglês para *pressurized water reactor*, reator refrigerado a água pressurizada), o tipo mais utilizado no mundo. Há também outra usina, Angra 3, cuja retomada da construção foi aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) no dia 25 de junho de 2007, sendo construída no mesmo sítio e será equipada também com um reator PWR. Ainda de acordo com Silva (2007), Angra 1 e Angra 2 em conjunto fornecem aproximadamente 45% da energia elétrica consumida atualmente no estado do Rio de Janeiro e respondem por 3,3% da energia elétrica produzida no Brasil. O Plano Nacional de Energia 2030 (PNE-2030) prevê a necessidade de pelo menos mais quatro usinas nucleares, além de Angra 3, mas existe a possibilidade de serem construídas até oito usinas adicionais, com capacidade de gerar 1.000 MW elétricos cada. De acordo com esse planejamento, a participação da energia nuclear na matriz energética nacional poderia saltar para até 5,6%. Todo esse aquecimento na demanda por energia gera também um aumento na demanda por conhecer cada vez melhor o funcionamento das centrais nucleares.

Uma das principais exigências das agências reguladoras e fiscalizadoras das usinas nucleares é garantir que nenhuma das limitações térmicas sobre o comportamento do núcleo sejam excedidas. Segundo Deuderstadt e Hamilton (1976), para que esse objetivo seja alcançado, primeiramente deve-se projetar o núcleo para que a temperatura central do combustível não exceda o ponto de fusão de combustível. Essa limitação é geralmente expressada como uma restrição à densidade de potência linear. Uma outra limitação relevante decorre da exigência de que o fluxo de calor na superfície das varetas deve permanecer sempre abaixo do seu limite de DNB. Para a observância desses limites, a abordagem mais comum é investigar como o "canal quente" no núcleo se comporta dentro das limitações operacionais. Deuderstadt e Hamilton (1976) dizem ainda que se forem garantidas as condições térmicas deste canal permanecendo abaixo dos limites do núcleo, os canais restantes no núcleo presumivelmente caem dentro das limitações de design. Geralmente define-se o canal quente no núcleo como canal de refrigeração em que

o fluxo de calor do núcleo e a entalpia são máximos. São associados a este canal vários fatores de desempenho para o comportamento médio do núcleo. Esses conhecimentos possibilitam a otimização de processos onde são consideradas questões como segurança, barateamento, constância no fornecimento de energia e utilização de recursos naturais disponíveis. Nesse sentido, instituições como o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), o Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN) e as Universidades têm desenvolvido novas tecnologias e pesquisas que tornem possíveis os avanços necessários para a ampliação desse meio de produção de energia de forma segura e sustentável. Este trabalho é um exemplo do investimento nessas pesquisas.

Uma ferramenta usada para análise das limitações de projeto nesse trabalho são os métodos numéricos. Os métodos numéricos surgiram a partir da necessidade de técnicas de resolução de equações, em especial, da resolução de equações diferenciais parciais. Para Ribeiro (2004, p.2), a essência desse método é a modelagem computacional de um fenômeno físico identificando fatores que influenciam de maneira relevante o problema. Isso implica na escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema, resultando em um modelo matemático constituído por um conjunto de equações diferenciais. Este trabalho utiliza um dos modelos numéricos mais usados em mecânica dos fluidos, o Método de Elementos Finitos (MEF). Ainda segundo Ribeiro (2004, p.2), o MEF teve sua origem no final da década de 1950 com o surgimento dos primeiros computadores digitais e foi criado com a finalidade específica de resolver sistemas de equações diferenciais. Já na década de 1970 o MEF iniciou suas aplicações a problemas de mecânica dos fluidos e, segundo o autor, desde então vem se consolidando como método mais geral de solução de equações diferenciais parciais. O método consiste na divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas 'elementos finitos'. O contínuo é transformado em discreto. A divisão do domínio é chamada de malha e é composta de elementos com faces (que podem ser triangulares, retangulares, pentagonal, etc.) e nós (pontos de intercessão das arestas). Para Amaral (2005), no MEF, as funções devem ser definidas em cada elemento ao invés de se buscar uma função que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio. Assim, para cada elemento é montado um funcional cuja soma sobre toda a malha produz o funcional do domínio completo. Com os recursos computacionais cada vez mais abundantes e a capacidade de processamento cada vez maior, o MEF é um excelente aliado no que diz respeito à análise do gradiente de temperatura em estruturas do núcleo de um reator nuclear.

## 1.2. OBJETIVO

Este trabalho tem como proposta estudar os limites termo-hidráulicos de um projeto típico para reatores PWR em estado estacionário. Para isso, um código computacional foi escrito em linguagem Fortran a partir de outros anteriores e validado através de comparações com resultados numéricos obtidos analiticamente. Esse estudo foi feito através do aumento do fluxo de calor até que a temperatura limite do combustível e o DNBR limite para o projeto sejam alcançados. Para esse objetivo foram contempladas a resolução das equações que regem a transferência de calor do combustível para o refrigerante através do método de elementos finitos bem como a análise gráfica da distribuição de calor em planos transversais à vareta com distribuição discreta da temperatura ao longo do seu comprimento.

Os limites termo-hidráulicos estudados neste trabalho foram feitos através de comparações do comportamento térmico do refrigerante e do combustível para diferentes perfis de distribuição da taxa volumétrica de geração de calor.

Outro objeto de estudo deste trabalho é a comparação da distribuição de temperatura em varetas combustível onde a excentricidade das pastilhas em relação ao revestimento é considerada e comparada a outras em varetas com pastilhas concêntricas ao revestimento e em condições termo-hidráulicas semelhantes. Como a ocorrência de excentricidade nessas varetas é bem provável em seu processo de produção, esse estudo se justifica e se faz necessário.

São também objetivos deste trabalho o estudo comparativo dos resultados gerados de simulações de operações em estado estacionário para diferentes valores de vazão mássica do refrigerante.

## 1.3. CONTRIBUIÇÃO

A primeira contribuição deste trabalho refere-se à otimização do nível de potência na vareta combustível de um reator nuclear tipo PWR. Esse estudo permite simular o aumento da potência do reator até que a temperatura máxima permitida nas pastilhas combustível seja

alcançada, mantendo a integridade do material. As simulações apontam as limitações do projeto e dão condição aos projetistas para melhorar o processo de retirada de calor do combustível nuclear.

A segunda contribuição é o estudo dos limites termo-hidráulicos de projeto considerando diferentes perfis de distribuição de potência. Normalmente a distribuição de potência é considerada na forma cossenoidal simples e sem perturbações. Este trabalho permite a variação desse perfil já que essa distribuição é discreta.

A terceira contribuição é o código computacional “vareta\_combustível.f90”, desenvolvido a partir dos códigos “Fuel\_rod\_v2” (Júnior, 2010) e “heat\_transfer\_2d\_cg” (Sampaio, 2007) com correlações para propriedades da água fornecidas pelo código “NBSNRCE” (Botelho e Moreira, 1990) usado para as simulações.

#### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização deste trabalho foi feita da seguinte maneira: O capítulo dois faz uma revisão bibliográfica sobre os temas usados na dissertação e modela o problema a ser tratado posteriormente. No capítulo três o funcionamento do código computacional produzido é descrito. Nesse capítulo também são apresentadas as equações usadas e suas fontes. O capítulo quatro foi dedicado a validação do código computacional através da comparação de seus resultados com resultados analíticos em literaturas científicas. No quinto capítulo são feitos estudos de casos usando o código validado no capítulo quatro. O capítulo seis apresenta as conclusões do trabalho e sugere recomendações para trabalhos futuros.

## CAPITULO 2

### 2. MODELAGEM FÍSICA

#### 2.1. MODELO FÍSICO

O modelo físico considerado neste trabalho tem características típicas de um reator PWR. De maneira simplificada, pode-se dizer que esse reator tem por objetivo extrair calor das fissões nucleares ocorridas em seu núcleo e transferi-lo para a água, chamada de líquido refrigerante, em um circuito primário fechado e pressurizado. Esse calor é transferido por convecção ou ebulição nucleada e em seguida transportado para um gerador de vapor. A taxa de calor transferido para a água depende de sua entalpia bem como o fluxo de calor.

Tong e Weisman (1979, p.251) afirmam que “Em um reator pressurizado com varetas combustível cilíndricas, o aumento de entalpia média para todo o canal pode ser obtido por um simples balanço de calor”. Segundo os autores, o calor absorvido pelo refrigerante na altura  $z$  da vareta pode ser tomado por um balanço de calor em torno de um elemento diferencial e integrado ao longo do núcleo. Quando a troca de calor com a região circundante pode ser ignorada, tem-se a equação:

$$(A / p') \dot{m}(\Delta h) = \int_{\frac{H}{2}}^{\kappa} q''(z) dz \quad (\text{eq. 2-1})$$

Onde,

$q''(z)$  = Fluxo axial de calor na altura  $z$ .

$A$  = Área da vareta em contato com o refrigerante.

$p'$  = Perímetro da vareta na seção transversal.

$\Delta h$  = Entalpia da localização  $z$  menos a entalpia de entrada.

•

$\dot{m}$  = Taxa de vazão mássica do refrigerante.

$H$  = Altura da vareta

## 2.2. MODELO DISCRETO

Todreas e Kazimi (1993, p.52) afirmam que a determinação da distribuição de calor em todo o reator nuclear é obtida através de sua análise neutrônica. O conhecimento exato da fonte de calor é um pré-requisito para análise do campo de temperatura, que por sua vez é necessária para a definição das propriedades termo-hidráulicas do combustível, do refrigerante e dos materiais estruturais. Esse trabalho não tem a finalidade de estudar o processo de retirada de calor a partir na análise neutrônica. Seu objeto de estudo começa na distribuição da taxa volumétrica de geração de calor  $q'''(z)$  em uma vareta mais reativa.

No caso de uma distribuição discreta de  $q''(z)$ , e conseqüentemente de  $q'''(z)$ , ao longo da vareta combustível esse fenômeno pode ser modelado como descrito abaixo.

Primeiro é preciso considerar o canal equivalente, também denominado subcanal, que pode ser do tipo aresta, canto, interno e interno especial.

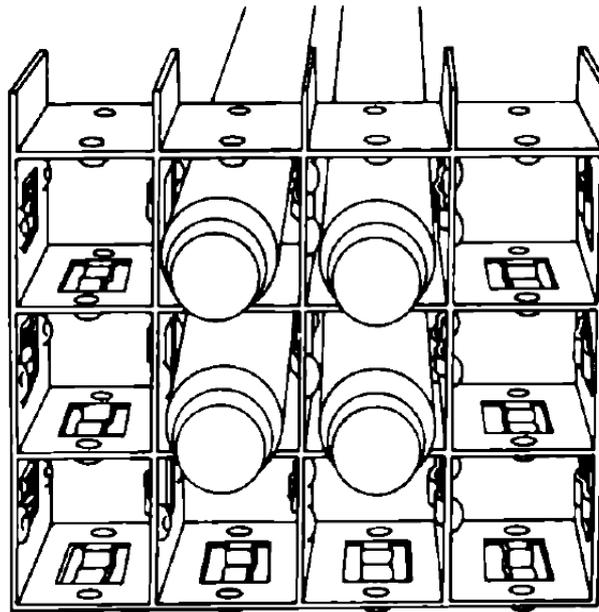


Figura 2-1: Parte da estrutura da grade de um elemento combustível (Todreas e Kazimi, 1993 p. 24).

A célula equivalente interna pode ser representada da forma ilustrada nas figuras 2-2 e 2-3.

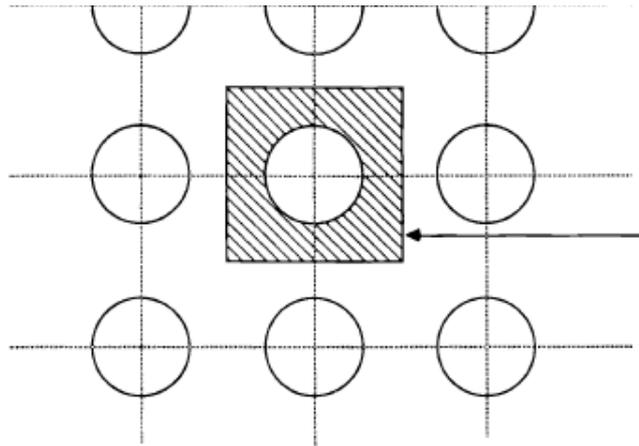


Figura 2-2: Célula equivalente (Todreas e Kazimi, 1993 p. 583).

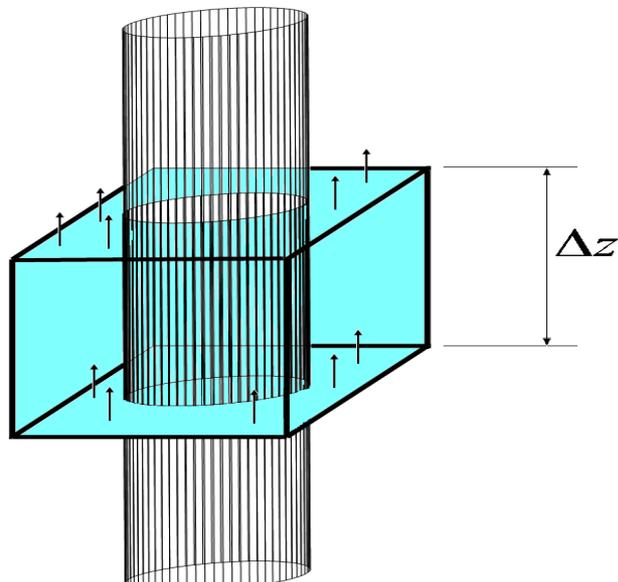


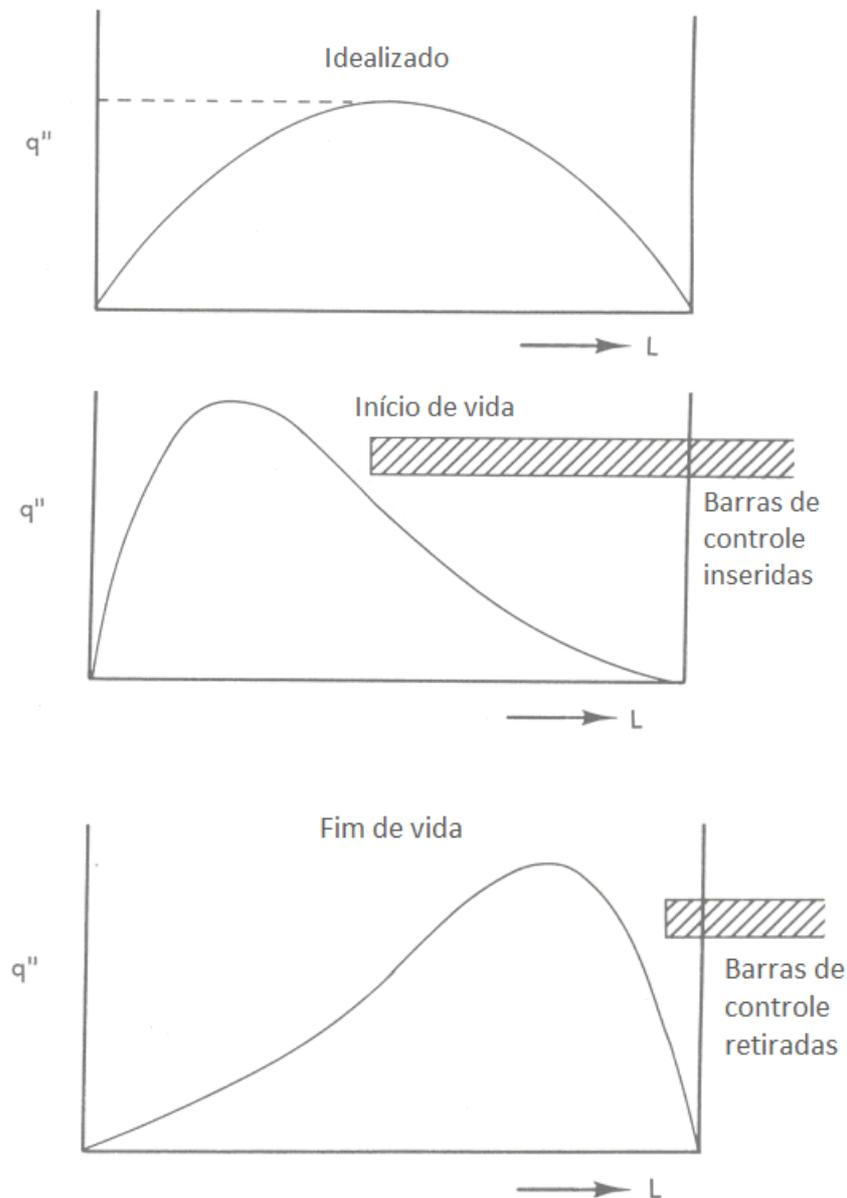
Figura 2-3: Canal e célula equivalentes em uma distribuição discreta de  $z$ .

### 2.2.1. PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA TAXA VOLUMÉTRICA DE GERAÇÃO DE CALOR ( $q'''(z)$ )

O controle da reatividade do núcleo do reator é um dos elementos fundamentais para seu bom funcionamento. Nos reatores tipo PWR, uma das formas de controle é feito através da inserção e retirada de materiais absorvedores de nêutrons nas barras de controle. A presença de materiais altamente absorvedores de neutrons perturba o fluxo tanto axial quanto radial. Esse fenômeno não deve ser considerado uma desvantagem. As astes podem ser usadas

para melhorar a distribuição do fluxo radial. Para Perrotta (1999, p.37), “[ as barras de controle] servem também para modificar a distribuição de potência do núcleo do reator...”.

Tong e Weisman (1979) ilustram, nas figuras abaixo, uma situação usual em um reator PWR, com as barras parcialmente inseridas pelo topo do núcleo distorcendo o fluxo em direção ao fundo.



**Figura 2-4: Distribuição axial de potência (Tong e Weisman , 1979 p. 26).**

Segundo os autores, o fluxo e o nível de energia na região exterior são aumentados concomitantemente com a diminuição na região central. A distribuição de potência do tipo mostrado na figura acima em geral pode ser representada, por modificar a distribuição cosseno usual representada por

$$q'''(z) = q'''_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{H} \cdot z\right), \quad (\text{eq. 2-2})$$

pela forma

$$q'''(z) = (A + B \cdot z) \cos\left(\frac{\pi}{H} \cdot z\right). \quad (\text{eq. 2-3})$$

Uma das propostas do trabalho é, dado um perfil de distribuição de potência, encontrar na eq. 2-3 valores para A e B que façam essa distribuição ser máxima dentro dos limites de projeto. Nesse contexto, pode-se estabelecer uma relação linear entre A e B do tipo

$$A = k \cdot B \quad (\text{eq. 2-4})$$

com  $k$  constante para cada  $A$ .

Assim, a eq. 2-3 passa para a forma

$$q'''(z) = A(1 + k \cdot z) \cos\left(\frac{\pi}{H} \cdot z\right). \quad (\text{eq. 2-5})$$

Nesse caso, o problema de otimização passa a ser: “Qual deve ser o valor do parâmetro “A” para que a distribuição de potência regida pela eq. 2-5 tenha a maior temperatura possível dentro dos limites de projeto?”. Para este trabalho, observar os limites de projeto significa que a temperatura máxima do combustível e o DNBR mínimo do projeto foram respeitados.

### 2.2.2. BALANÇO DE ENERGIA

Considerando a vazão mássica constante, a variação de pressão desprezível e assumindo-se que toda a energia gerada no combustível é transportada para o fluido refrigerante, o balanço de energia obedece à equação,

(Energia de Entrada) + (Calor Recebido) = (Energia de Saída)

$$E_{in} + Q = E_{out} \quad (\text{eq. 2-6})$$

### 2.2.3. CALOR RECEBIDO

A energia de entrada na altura  $z$  da vareta é:

$$E_{in} = \dot{m} h_z \quad (\text{eq. 2-7})$$

Onde:

$\dot{m}$  em  $kg/s$  é a vazão mássica.

$h_z$  em  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  é a entalpia do refrigerante na altura  $z$ .

A energia de saída na altura  $(z + \Delta z)$  da vareta é:

$$E_{out} = \dot{m} h_{(z+\Delta z)} \quad (\text{eq. 2-8})$$

Onde:

$h_{(z+\Delta z)}$  em  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  é a entalpia do refrigerante na altura  $(z + \Delta z)$ .

A partir da equação 2-1 pode-se admitir,

$$\dot{m} \Delta h = \int_{z_{in}}^{z_{out}} (p' / A) q''(z) dz \quad (\text{eq. 2-9})$$

Essa equação pode ser escrita em função de  $q'''(z)$  da seguinte maneira

$$\dot{m} \Delta h = A \int_{z_{in}}^{z_{out}} q'''(z) dz \quad (\text{eq. 2-10})$$

mas

$$\dot{m} \Delta h = Q \quad (\text{eq. 2-11})$$

então, o calor recebido em cada segmento da vareta combustível é

$$Q = A \int_{z_{in}}^{z_{out}} q'''(z) dz \quad (\text{eq. 2-12})$$

#### 2.2.4. ENTALPIA

Como os valores de  $q'''(z)$  são discretos,  $q'''_{in}$  e  $q'''_{out}$  são conhecidos e, portanto, podem ser interpolados linearmente.

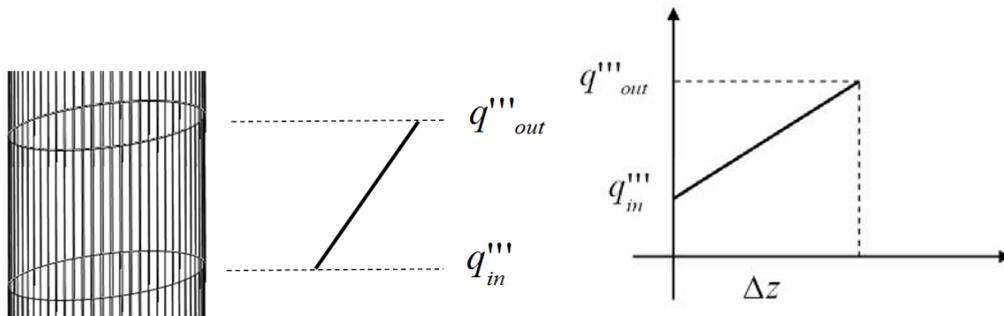


Figura 2-5: Discretização de  $q'''(z)$

Assim, integrando a equação 2-12 em  $z$  obtém-se

$$Q = q'''_{in} A \Delta z + \frac{(q'''_{in} + q'''_{out})}{2} \cdot A \Delta z \quad (\text{eq. 2-13})$$

e, portanto,

$$Q = \frac{(q'''_{in} + q'''_{out})}{2} \cdot A \Delta z \quad (\text{eq.2-14})$$

Substituindo a equação 2-14 na equação 2-6 de balanço de energia e fazendo  $z_{in} = z$  e  $z_{out} = z + \Delta z$  tem-se:

$$\dot{m} h_{(z+\Delta z)} = \dot{m} h_z + \frac{(q'''_z + q'''_{(z+\Delta z)})}{2} \cdot A \Delta z \quad (\text{eq.2-15})$$

logo,

$$h_{(z+\Delta z)} = h_z + \frac{(q_z'''' + q_{(z+\Delta z)}''')}{2} \cdot \frac{A \Delta z}{\dot{m}} \quad (\text{eq.2-16})$$

Considerando que, com exceção de  $h_{(z+\Delta z)}$ , todas as variáveis são conhecidas, essa equação permite encontrar  $h_z$  para qualquer cota  $z$ , múltiplo de  $\Delta z$ . Para isso, deve-se considerar  $z_{out}$  de um plano como  $z_{in}$  do plano imediatamente a cima.

### 2.2.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO FLUIDO REFRIGERANTE ( $T_{bulk}$ ) A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO DISCRETA DA POTÊNCIA

Admitindo a relação da variação de entalpia com a variação de temperatura

$$\Delta h = c_p \cdot \Delta T \quad (\text{eq.2-17})$$

Pode-se concluir que

$$h_{out} - h_{in} = c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{eq.2-18})$$

então,

$$T_{out} = T_{in} + \frac{h_{out} - h_{in}}{c_p} \quad (\text{eq.2-19})$$

Fazendo  $z_{in} = z$  e  $z_{out} = z + \Delta z$  e substituindo a equação 2-16 na equação 2-19 tem-se:

$$T_{(z+\Delta z)} = T_z + \frac{(q_z'''' + q_{(z+\Delta z)}''')}{2} \cdot \frac{A \Delta z}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (\text{eq.2-20})$$

Analogamente, pode-se considerar que, com exceção de  $T_{(z+\Delta z)}$ , todas as variáveis são conhecidas. Sendo assim, a equação 2-20 permite encontrar  $T_z$  para qualquer cota  $z$ , múltiplo

de  $\Delta z$ . Para isso, deve-se considerar o  $z_{out}$  de um plano como  $z_{in}$  do plano imediatamente a cima.

### 2.2.6. CÁLCULO DO DNBR

DNB (Departure from Nuclear Boiling - Partida de ebulição Nucleada) é o fenômeno que ocorre quando o fluxo de calor crítico, que é uma função da geometria e das condições de funcionamento no núcleo, é atingido. É caracterizado por um acentuado declínio no coeficiente de transferência de calor na interface refrigerante/revestimento devido a o isolamento promovido pela formação de “cobertores de vapor” sobre a vareta combustível causado pela nucleação intensa. Esse fenômeno é local e faz com que a temperatura na superfície da vareta se eleve muito. Gomes e Paulucci (2011) afirmam que esse fato pode causar danos na estrutura de várias varetas podendo até mesmo derretê-las, deixando materiais nucleares na água. A ocorrência de bolhas na parede externa da vareta não é necessariamente um problema para o funcionamento do reator mas, pelo contrário, essas bolhas transportam calor latente para o refrigerante. Por isso, o projeto de reatores nucleares PWR deve ser baseado na não ocorrência do fluxo de calor crítico nas varetas combustíveis.

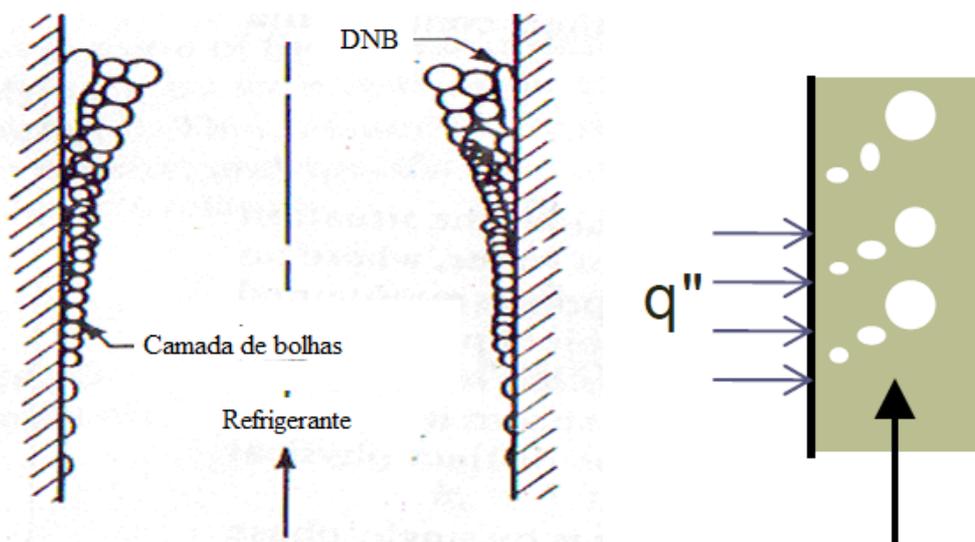


Figura 2-6: DNB (Todreas e Kazimi, 1993 p. 26 e Buongiorno, 2010 p.12)

O Departure from Nuclear Boiling Ratio – DNBR é medida de desempenho para o DNB. Embora seja difícil quantificar a magnitude desse fenômeno, existem códigos comerciais que tomam a geometria do núcleo e as condições de funcionamento como referência. Este parâmetro permite ao projetista saber o quão longe ocorre o fenômeno DNB em condições específicas.

### 2.2.6.1. MÉTODO DE ANÁLISE DE DNB

Por definição, o DNBR é calculado em cada ponto da vareta obedecendo à equação 2-21.

$$DNBR = \frac{q''_{crit}}{q''_{local}} \quad (\text{eq.2-21})$$

onde,

$q''_{crit}$  = Fluxo crítico de calor nas condições de operação.

$q''_{local}$  = Fluxo de calor local.

O fluxo de calor local ( $q''_{local}$ ) foi calculado em cada ponto através da equação 2-22.

$$q''_{local} = h(T - T_{bulk}(z)) \quad (\text{eq.2-22})$$

onde,

$h$  = Coeficiente de película [W/m<sup>2</sup>°C]

$T$  = Temperatura no ponto considerado [°C]

$T_{bulk}(z)$  = Temperatura do fluido refrigerante na cota  $z$  [°C]

O fluxo crítico de calor foi calculado pela equação 2-23 apresentada por El-Wakil (1971, p. 312). Para o autor, essa equação é usada pela companhia Westinghouse para reatores de potência em operação com alto coeficiente de transferência de calor.

$$\begin{aligned}
 q''_{crit} = & 10^6 [(2.002 - 0.0004302p) + (0.1722 - 0.0000984p)e^{(18.177 - 0.004129p)x}] \\
 & \times [(0.1484 - 1.596x + 0.1729|x|)G \cdot 10^{-6} + 1.037] \\
 & \times [1.157 - 0.869x] \times [0.2664 + 0.8357e^{-3.151D_e}] \\
 & \times [0.8258 + 0.000794(h_f - h_i)]
 \end{aligned}$$

(eq.2-23)

onde,

$p$  = pressão do sistema (psia)

$x$  = título de vapor

$G$  = vazão mássica (lb/hr ft<sup>2</sup>)

$D_e$  = diâmetro hidráulico (in.)

$h_f$  = entalpia do fluido na altura  $z$  (Btu/lb)

$h_i$  = entalpia de entrada no canal (Btu/lb)

O título de vapor ( $x$ ) é dado por Buongiorno (2010, p.21) através da correlação:

$$x = c_p \frac{(T_{sat} - T_{bulk})}{h_{fg}} \quad (\text{eq.2-24})$$

Onde,

$C_p$  = Calor específico à pressão constante.

$T_{bulk}$  = Temperatura média do refrigerante.

$T_{sat}$  = Temperatura de saturação.

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporização.

## CAPÍTULO 3

### 3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Neste capítulo demonstra-se como o código computacional gerado neste trabalho calcula a temperatura da vareta combustível em função de  $q'''(z)$  através do Método de Elementos Finitos – MEF. Também demonstra como esse código propõe um método para otimizar os níveis de potência para os limites de projeto estabelecidos.

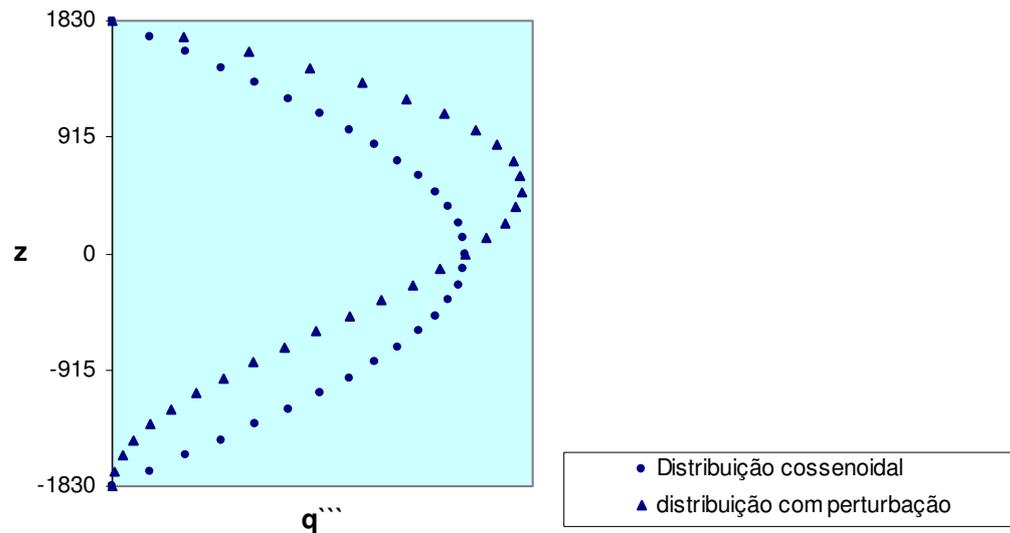
#### 3.1. DESCRIÇÃO GERAL DO CÓDIGO

O código computacional “VARETA\_COMBUSTÍVEL” foi desenvolvido a partir dos códigos “Fuel\_rod\_v2” (Júnior, 2010) e “heat\_transfer\_2d\_cg” (Sampaio, 2007). Escrito em linguagem FORTRAN, o referido programa é usado para análise de distribuição de temperatura em uma vareta combustível típica de reatores PWR. Também determina o nível máximo de potência para uma dada distribuição da taxa volumétrica de geração de calor ( $q'''$ ) ao longo da vareta para que a temperatura máxima do combustível e o DNBR mínimo estabelecidos como limites de projeto estejam contemplados e otimizados. Isso possibilita o apontamento das características limitantes do projeto.

#### 3.2. DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(Z)$

Uma das contribuições deste trabalho foi criar um código computacional que permita a distribuição *discreta* da taxa volumétrica de geração de calor ao longo do comprimento da vareta. Essa flexibilidade possibilita fazer com que  $q'''$  seja dependente apenas da posição axial da vareta, ou seja,  $q''' = q'''(z)$ , podendo ser feito através de um arquivo ou gerado por uma equação dentro do código. No caso desse trabalho, todas as distribuições foram feitas por uma equação descrita no próprio código. Os coeficientes dessa equação são parâmetros de entrada declarados no arquivo “vareta\_combustivel.dat” que, ao serem modificados, permitem

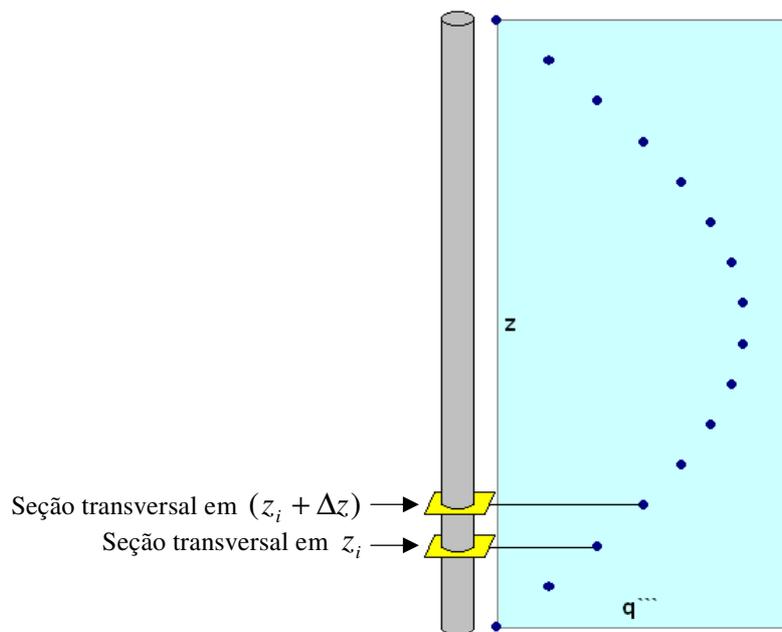
a alteração do perfil de distribuição de  $q'''$  sem alterar o código. A figura 3-1 exemplifica duas distribuições de  $q'''(z)$  ao longo da vareta.



**Figura 3-1: Distribuição de  $q'''(z)$  ao longo da vareta combustível**

Com os valores de  $q'''(z)$  distribuídos, o cálculo da entalpia do refrigerante em cada cota  $z$  é feito considerando-se o calor recebido em cada segmento formado por dois planos transversais e a entalpia de entrada. Esse procedimento é repetido no próximo segmento onde o plano de saída passa a ser o plano de entrada do segmento posterior. Com a entalpia calculada em uma cota  $z$  considerada, o código calcula então a temperatura  $T_{bulk}$  do refrigerante para essa cota  $z$ . Um arquivo de saída é gerado com o nome “tbulk.dat” contendo todas essas temperaturas  $T_{bulk}$ . Os cálculos desse procedimento estão apresentados no capítulo dois deste trabalho. Uma vez calculada a temperatura  $T_{bulk}$  do refrigerante no plano considerado, o código “VARETA\_COMBUSTÍVEL”, através do método de Gradientes Conjugados e do método de Elementos Finitos, passa a trabalhar na distribuição da temperatura plano transversal da vareta. A partir dessa distribuição, o calor recebido em cada segmento formado por duas seções planas é calculado e, através do somatório de todos os resultados, obtém-se a potência gerada pela vareta estudada.

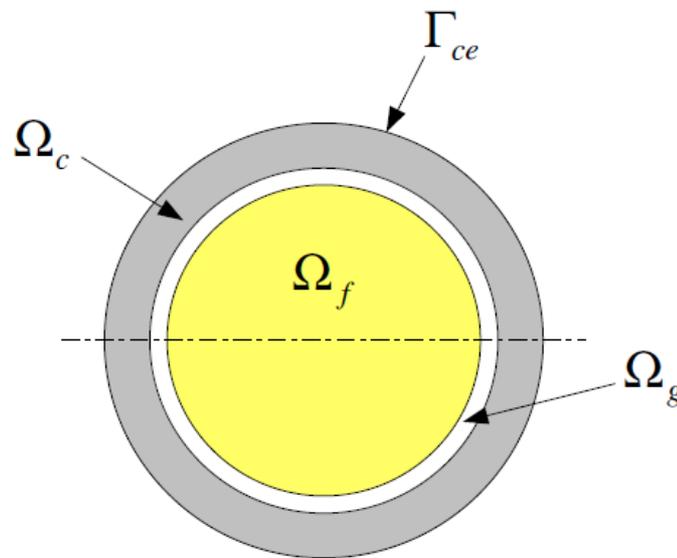
Com a distribuição de temperatura em cada plano, o código, através da subrotina “temperatura\_maxima”, verifica quais são as temperaturas máximas do combustível, do gap, do revestimento e da face externa do revestimento. Essa verificação também permite o conhecimento da localização (plano e ponto) em que ocorre cada temperatura máxima.



**Figura 3-2: Gráfico esquemático da distribuição de  $q'''(z)$  ao longo da vareta combustível.**

### 3.3. DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA EM CADA SEÇÃO TRANSVERSAL

O código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” usa o método de elementos finitos em duas dimensões para a distribuição de temperatura em cada plano perpendicular ao sentido longitudinal da vareta combustível. A partir do valor de  $q'''(z)$  dado para a seção considerada, o código calcula  $T_{bulk}(z)$  pelo processo descrito no capítulo dois deste trabalho. Nesse momento, o valor de  $T_{bulk}(z)$  passa a ser uma condição de contorno para a distribuição de temperatura na pastilha combustível. A figura 3-3 apresenta uma representação esquemática de uma seção transversal da vareta combustível com identificação de domínios e fronteiras.



- $\Omega_f$  - Domínio da pastilha combustível
- $\Omega_g$  - Domínio do gap
- $\Omega_c$  - Domínio do revestimento (cladding)
- $\Gamma_{fg}$  - Fronteira combustível/gap
- $\Gamma_{gc}$  - Fronteira gap/revestimento
- $\Gamma_{ce}$  - Fronteira revestimento/fluido refrigerante

**Figura 3-3: Domínios e fronteiras de um seção transversal (Júnior, 2010).**

Através da forma variacional apresentada por Jonhson (1987), descrita pela equação 3-1 abaixo, a conservação de energia pode ser satisfeita para cada material presente bem como na continuidade do fluxo de calor nas interfaces combustível/gap e gap/revestimento. Na superfície externa, a transferência de calor do revestimento para o fluido refrigerante também é satisfeita por essa formulação variacional. Isso é possível pela incorporação do coeficiente de película  $h$  e a temperatura do fluido refrigerante  $T_\infty$  ( $T_{bulk}(z)$ ).

Segundo Jonhson (1987), o problema variacional consiste em determinar o campo de temperatura  $T \in H^1(\Omega)$  que satisfaça a equação 3-1, onde  $H^1$  é o espaço de funções definidas em  $\Omega$  que são quadrado-integráveis.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} k \frac{\partial T}{\partial x_i} \partial \Omega + \int_{\Gamma_{ce}} \varphi h T \partial \Gamma = \int_{\Omega} \varphi Q \partial \Omega + \int_{\Gamma_{ce}} \varphi h T_\infty(z) \partial \Gamma \quad (\text{eq. 3-1})$$

Para qualquer  $\varphi \in H^1(\Omega)$ .

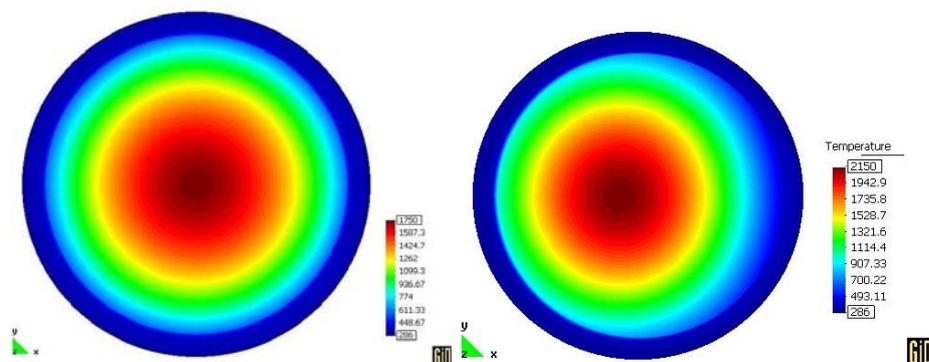
O método dos elementos finitos (método de Galerkin) é utilizado para discretizar a formulação variacional dada pela equação 3-1. São empregados elementos finitos triangulares com funções de interpolação lineares. O programa “VARETA\_COMBUSTÍVEL” foi desenvolvido neste trabalho utilizando as subrotinas dos programas fuel\_rod\_v2(Júnior 2010) e heat\_transfer\_2d\_cg (Sampaio, 2007) que empregam o método dos gradiente conjugados (com pré-condicionador de Jacobi) para solução do sistema de equações lineares resultantes da discretização.

As malhas utilizadas nesse trabalho foram construídas por Júnior (2010), possuem elementos triangulares e contemplam duas situações. Uma em que o combustível cilíndrico é concêntrico ao revestimento e outra onde é excêntrico.

O pré-processador do programa GID<sup>®</sup> foi usado para a construção da geometria do problema, aplicação das condições de contorno e da malha. A partir desses procedimentos, são gerados arquivos com dados de discretização do problema: número de nós, número de elementos, coordenadas cartesianas dos nós, nós da face externa do revestimento e material de cada nó. Esses dados são copiados e formatados no arquivo de entrada “vareta\_combustivel.dat” para serem lidos durante o processamento.

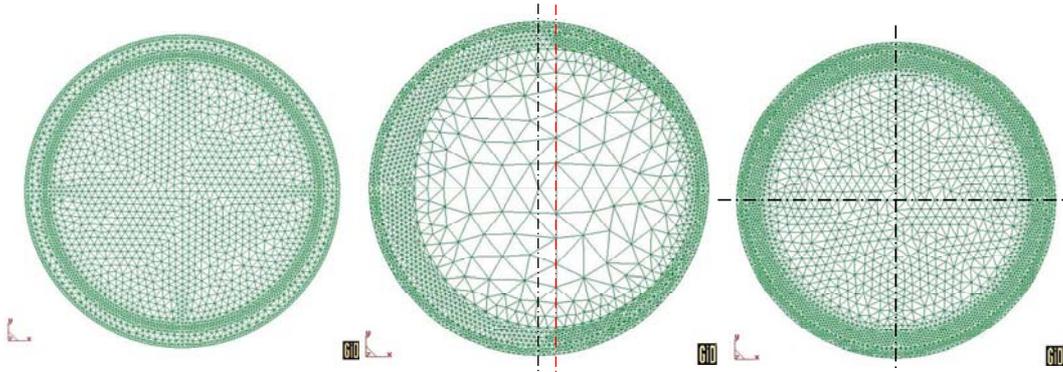
Após o processamento, o código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” gera arquivos de extensão “.flavia.msh” e “.flavia.res” que devem ser tratados no programa GID<sup>®</sup>. GID<sup>®</sup> é um pré-processador universal tipo user-friendly e pós-processador para simulações numéricas em ciência e engenharia. Foi projetado para cobrir as necessidades comuns no domínio de simulações numéricas do pré para o pós-processador: modelagem geométrica, geração de malha, transferência de dados para software de análise e visualização de resultados.

A figura 3-4 apresenta exemplos de gráficos esquemáticos de perfis de temperatura em seções da vareta com combustível concêntrico e excêntrico ao revestimento.



**Figura 3-4: Distribuição de temperatura em pastilhas concêntrica e excêntrica.**

A figura 3-5 apresenta as malhas usadas pelo programa “VARETA\_COMBUSTÍVEL”.



**Figura 3-5: Malhas usadas pelo código computacional.**

### 3.4. OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA

O problema de otimização do nível de potência aqui considerado pode ser entendido pela pergunta: “Qual deve ser o nível máximo de potência do reator para que a temperatura máxima do combustível e o DNBR mínimo permaneçam dentro dos limites estabelecidos pelo projeto?”. Encontrar esse nível máximo de potência é outra contribuição deste trabalho.

Para que a distribuição de potência seja máxima, o código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” usa o método de Newton-Raphson para dois casos. O primeiro estabelece qual deve ser o parâmetro da equação de distribuição da taxa volumétrica de geração de calor ( $q'''$ ) para que a temperatura máxima do combustível seja, dentro de uma margem de precisão, igual à temperatura limite do combustível declarada no arquivo “vareta\_combustivel.dat”. O segundo é análogo ao primeiro onde considera o DNBR mínimo ocorrido ao longo da vareta. Esses casos são estudados separadamente pelo código. Quando o parâmetro é calculado considerando o limite de temperatura do combustível, o limite de DNBR não é levado em consideração. E, quando o parâmetro é calculado considerando o limite de DNBR, o limite de temperatura do combustível não é considerado. Os procedimentos são os seguintes: Primeiro é lido um parâmetro inicial no arquivo de entrada. Em seguida a distribuição de potência, temperatura e DNBR são calculados ao longo da vareta. Se a temperatura máxima do combustível calculada pelo programa for igual, dentro da margem de precisão estabelecida, à temperatura limite declarada, o parâmetro, a temperatura

máxima do revestimento, a temperatura máxima da face externa do revestimento e a temperatura média do refrigerante ( $T_{bulk}$ ) na saída do núcleo do reator são enviados ao arquivo de saída “resultados\_finais.dat”. Um exemplo desse arquivo de saída é apresentado no apêndice 1. No caso da temperatura máxima do combustível calculada pelo programa não ser igual ao limite declarado com entrada, o código usa o método Newton-Raphson para estabelecer um novo parâmetro e repete os procedimentos relatados anteriormente até que as temperaturas sejam iguais. Os procedimentos para o cálculo do parâmetro que gera o DNBR estabelecido como limite de projeto o procedimento são análogos aos procedimentos descritos para o cálculo dos parâmetros que fazem o reator atingir a temperatura limite no combustível.

Em alguns poucos casos estudados, o método Newton-Raphson não se mostrou eficiente. Isso ocorreu porque o DNBR é calculado apenas para os pontos da parte externa do revestimento em contato com o fluido. Outro motivo foi que o método excedeu o domínio de operação do código. Nesses casos, uma subrotina com base no método de bisseção foi criada para otimizar o nível de potência.

#### 3.4.1. O MÉTODO NEWTON-RAPHSON

O Método de Newton-Raphson foi usado neste trabalho para encontrar o valor do parâmetro “A” (descrito no título 2.2.1.) com o objetivo de otimizar o nível de potência regida pela equação 2-5 fazendo com que a temperatura do combustível e o DNBR mínimo alcancem os limites de projeto.

Como a temperatura máxima do combustível é função da distribuição de  $q'''$  e esta depende do parâmetro “A”, pode-se dizer então que a temperatura máxima do combustível é função do parâmetro “A”.

$$T_M = T_M(A) \quad (\text{eq.3-2})$$

O objetivo do método é fazer

$$T_M(A) - T_{Limite} = 0 \quad (\text{eq.3-3})$$

Fazendo,

$$T_M(A) - T_{Limite} = F(A) \quad (\text{eq.3-4})$$

O objetivo passa a ser encontrar o valor do parâmetro “A” para que ocorra  $F(A) = 0$ .

Usando a expansão de Taylor na equação 3-11 até a primeira derivada, encontra-se

$$F(A) = F(A_0) + (A - A_0) \left. \frac{\partial F}{\partial A} \right|_{A_0} \quad (\text{eq.3-3})$$

como  $F(A) = 0$ ,

$$A = A_0 - \frac{F(A_0)}{\left. \frac{\partial F}{\partial A} \right|_{A_0}} \quad (\text{eq.3-6})$$

Mas,

$$\left. \frac{\partial F}{\partial A} \right|_{A_0} = \frac{F(A_0 + \varepsilon) - F(A_0)}{\varepsilon}, \quad \text{com } \varepsilon \rightarrow 0 \quad (\text{eq.3-7})$$

Então,

$$A = A_0 - \frac{F(A_0)}{F(A_0 + \varepsilon) - F(A_0)} \cdot \varepsilon \quad (\text{eq.3-8})$$

Ou ainda, usando a equação 3-11,

$$A = A_0 - \frac{T_M(A_0) - T_{Limite}}{T_M(A_0 + \varepsilon) - T_M(A_0)} \cdot \varepsilon \quad (\text{eq.3-9})$$

Para o caso da análise do DNBR como limite de projeto, a dedução do método é análoga.

$$A = A_0 - \frac{DNBR_M(A_0) - DNBR_{Limite}}{DNBR_M(A_0 + \varepsilon) - DNBR_M(A_0)} \cdot \varepsilon \quad (\text{eq.3-10})$$

O Método Newton-Raphson é aplicado a este trabalho da seguinte maneira:

**Passo 1:** Com um parâmetro “A” inicial dado como entrada para a equação 2-5 de distribuição de  $q''(z)$ , o código computacional calcula a distribuição radial de temperatura em todos os planos considerados ao longo da vareta.

Passo 2: Com a distribuição de temperatura concluída, verifica-se qual é a temperatura máxima no combustível, encontrando assim o valor de  $T_M(A)$ .

Passo 3: Dado o erro aceitável  $\delta$ , se  $|T_M(A) - T_{Limite}| \leq \delta$  então o parâmetro “A” é o parâmetro que otimiza o nível de potência. Caso contrário, seguem-se os passos seguintes.

Passo 4: Calcula-se a distribuição radial de temperatura em todos os planos considerados ao longo da vareta admitindo o parâmetro “A” da equação 2-5 de distribuição de  $q''(z)$  como  $A + \varepsilon$ .

Passo 5: Com a distribuição de temperatura concluída, verifica-se qual é a temperatura máxima no combustível, encontrando assim o valor de  $T_M(A + \varepsilon)$ .

Passo 6: Fazendo o parâmetro “A” usado nos passos anteriores igual a  $A_0$ , calcula-se o novo parâmetro “A” através da equação 3-16 e retorna-se ao passo 1.

Para o caso onde o DNBR é o limite de projeto analisado, o procedimento é análogo.

### 3.5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DEPENDENTES DA TEMPERATURA

O código “VARETA\_COMBUSTIVEL” admite duas possibilidades para o tratamento das propriedades físicas que dependem da temperatura. Na primeira essas características são consideradas constantes. Nesse caso, para a análise de um problema são considerados os valores médios de cada propriedade. A segunda possibilidade de tratamento dessas propriedades é o uso do código “NBSNRCE” para as propriedades físicas da água, as correlações do código MATPRO (NUREG, 2001) para a condutividade térmica do revestimento e para a condutância do gap. A condutividade térmica do combustível é calculada por uma relação apresentada por Todreas e Kazimi (1993).

O código “NBSNRCE” foi desenvolvido por David Adjuto Botelho e Maria de Lourdes Moreira (1990). Esse código usa um método iterativo para relacionar, dentre outras, as seguintes propriedades da água: Condutividade Térmica, Viscosidade, Densidade, Calor Específico. O método iterativo basicamente consiste em resolver a equação de transporte de energia com um valor inicial para uma dada propriedade. Em seguida, com a distribuição de temperatura encontrada, aplica novos valores para essa propriedade, calcula novamente a distribuição de temperatura e compara os resultados. Caso a temperatura esteja dentro da margem de precisão considerada o programa admite a distribuição de temperatura como correta. Caso contrário, o código faz um ajuste e repete o processo até que haja convergência das propriedades. As correlações usadas para a condutividade térmica do combustível, a condutividade térmica do revestimento, a condutância do gap e o número de Nusselt estão, respectivamente apresentados nos apêndices 2, 3, 4 e 5.

## 3.6. FLUXOGRAMA DO CÓDIGO VARETA\_COMBUSTIVEL

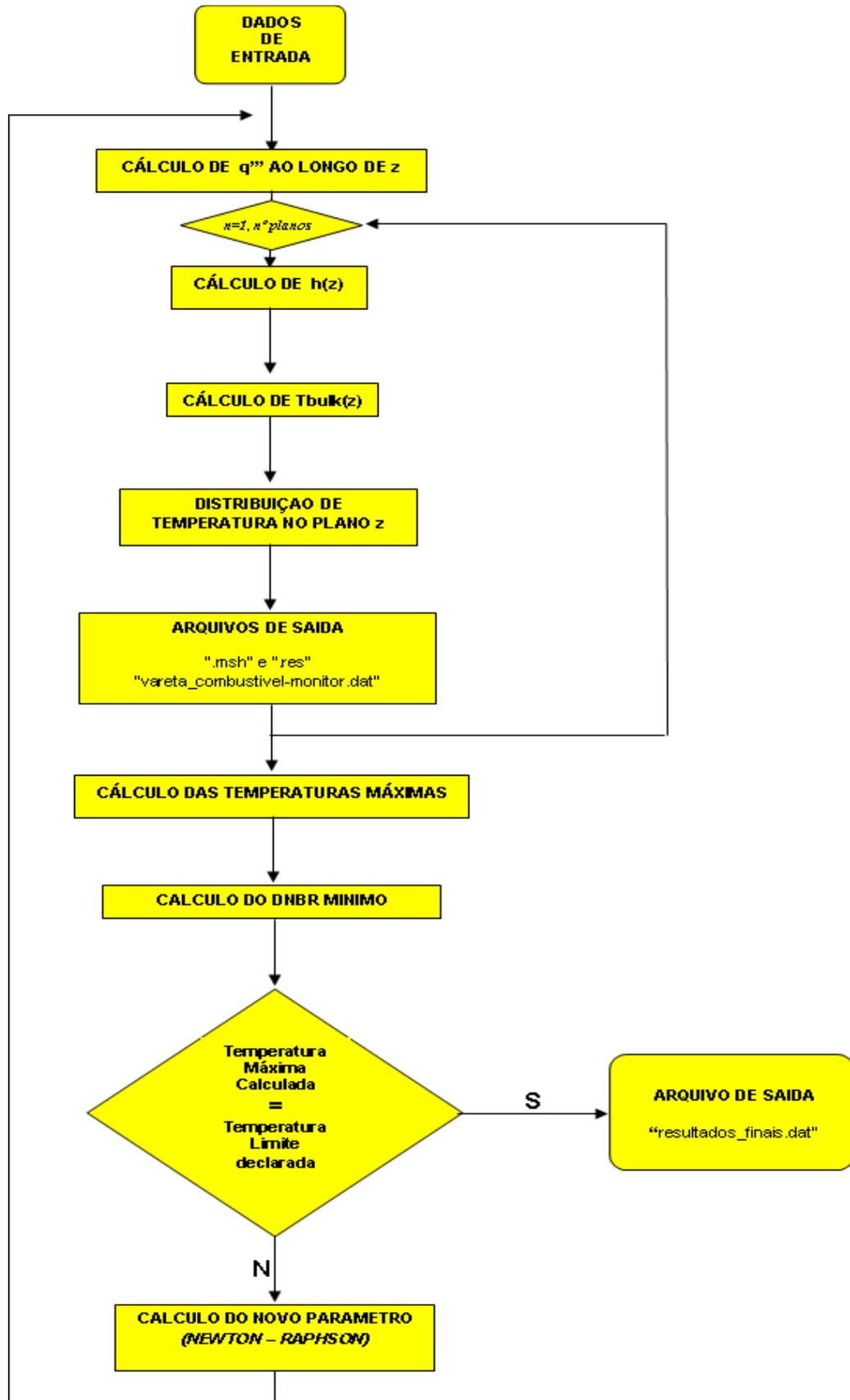


Figura 3-3: Fluxograma compacto do programa

## CAPÍTULO 4

### 4. VALIDAÇÃO

A validação do Código Computacional VARETA\_COMBUSTÍVEL foi feita para duas condições de varetas. Na primeira, admite-se que as pastilhas combustíveis são concêntricas ao revestimento. Na segunda, é considerada uma excentricidade de 10% das pastilhas em relação ao diâmetro do revestimento.

#### 4.1. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(z)$ PARA PASTILHA CONCÊNTRICA AO REVESTIMENTO

A validação do código VARETA\_COMBUSTÍVEL em relação à discretização axial de  $q'''(z)$  para pastilha concêntrica ao revestimento foi feita comparando-se a resolução analítica de um problema apresentado e resolvido por Todreas e Kazimi (1993, p.587) aos resultados numéricos gerados por ele. Essa validação se justifica por verificar se houve alguma alteração significativa no resultado da distribuição de temperatura a partir da mudança do código original (“Fuel\_rod\_v2”) (Júnior, 2010). A mudança consiste em distribuir  $q'''(z)$  de maneira discreta ao longo da vareta. O código original distribui  $q'''(z)$  analiticamente. O código VARETA\_COMBUSTÍVEL, nesse estudo, funciona de maneira semelhante ao código original: Dada uma distribuição de  $q'''(z)$ , determinar as temperaturas máximas no revestimento e no combustível.

##### 4.1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Segue abaixo a transcrição do problema:

“Para o reator PWR descrito na tabela 4-1, determinar a temperatura do fluido refrigerante em função da altura e as temperaturas máximas do combustível e do

revestimento. Desconsidere as alturas extrapoladas. Suponha que os coeficientes de transferência de calor e condutividade térmica permaneçam constantes”.

A tabela 4-1 apresenta os dados do problema.

DADOS GEOMÉTRICOS	
Diâmetro da pastilha combustível [mm]	8.2
Diâmetro interno do revestimento [mm]	8.36
Diâmetro externo do revestimento [mm]	9.5
Espessura do revestimento [mm]	0.57
Espessura do gap [mm]	0.08
Comprimento ativo [mm]	3660
Passo [mm]	12.6
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341
Taxa linear de calor do plano médio [kW/m]	31.1
Número de Reynolds	$4.98 \times 10^5$
Condutividade do combustível [kW/m °C]	0.002163
Condutividade do revestimento [kW/m °C]	0.01385
Coefficiente de transferência de calor [kW/m <sup>2</sup> °C]	34.0
Condutância do gap [kW/m <sup>2</sup> °C]	5.7
Temperatura de saída do refrigerante [°C]	324
Temperatura de entrada do refrigerante [°C]	286
Pressão do sistema [MPa]	15.5

**Tabela 4-1: Dados do problema (Todreas e Kazimi, p.587 ,1993)**

#### 4.1.2. SOLUÇÃO ANALÍTICA

Segue abaixo a solução analítica apresentada por Todreas e Kazimi (1993, p.587).

Dada a adição de calor senoidal ao longo do comprimento aquecido ( $L = 3.66m$ ), os valores do problema(apresentados na tabela 4-1) podem ser substituídos na equação 4-1 para obter a temperatura de refrigeração,  $T_m(z)$ :

$$T_m(z) - T_{in} = \frac{q_0}{m c_p} \frac{L_e}{\pi} \left( \sin \frac{\pi z}{L_e} + \sin \frac{\pi L}{2L_e} \right) \quad (\text{eq. 4-1})$$

$$T_m(z) = 286 + \left( \frac{31.1}{(0.341)(5.60)} \right) \left( \frac{3.66}{\pi} \right) \left( \sin \frac{\pi z}{3.66} + 1 \right)$$

$$T_m(z) = 305.0 + 19.0 \sin \frac{\pi z}{3.66}$$

A equação 4-2 pode ser utilizada para determinar a posição em que a temperatura máxima no revestimento ocorre:

$$Z_c = \frac{L_c}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{2\pi R_{co} L_e h}{\pi c_p m} \right) \quad (\text{eq. 4-2})$$

$$Z_c = \frac{L_c}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{h\pi DL}{\pi c_p m} \right)$$

$$Z_c = \frac{3.66}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{(34.0)\pi(9.5 \times 10^{-3})(3.66)}{\pi(5.60)(0.341)} \right)$$

$$Z_c = 0.65 \text{ m}$$

Substituindo esse valor na equação 4-3, a temperatura máxima na superfície do revestimento é encontrada:

$$T_{co}(z) = T_{in} + q_0 \left[ \frac{L_e}{\pi m c_p} \left( \sin \frac{\pi z}{L_e} + \sin \frac{\pi L}{2L_e} \right) + \frac{1}{2\pi R_{co} h} \cos \frac{\pi z}{L_e} \right] \quad (\text{eq. 4-3})$$

$$T_c(z_c) = 286 + 31.1 \left\{ \frac{3.66 \left[ \sin \left( \frac{\pi(0.65)}{3.66} \right) + 1 \right]}{\pi(0.341)(6.143)} + \frac{\cos \left( \frac{\pi(0.65)}{3.66} \right)}{\pi(9.5 \times 10^{-3})(34)} \right\}$$

$$T_c(z_c) = 286 + 31.1(0.851 + 0.836) = 341.0^\circ\text{C}$$

Para obter a temperatura máxima central do combustível, antes a equação 4-4 é aplicada para determinar a posição  $z_f$ , onde essa temperatura máxima ocorre. Primeiro vamos determinar o raio de combustível da pastilha e o raio do gap efetivo:

$$z_f = \frac{L_e}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{L_e}{\pi \dot{m} c_p \left[ \frac{1}{4\pi \bar{k}_f} + \frac{1}{2\pi k_c} \ln\left(\frac{R_{co}}{R_{ci}}\right) + \frac{1}{2\pi R_g h_g} + \frac{1}{2\pi R_{co} h} \right]} \right\} \quad (\text{eq. 4-4})$$

$$R_f = 0.5(9.5) - 0.57 - 0.08 = 4.1 \text{ mm}$$

$$R_g = (4.18 + 4.1) / 2 = 4.14 \text{ mm}$$

$$z_f = \frac{3.66}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{3.66 / \pi(0.341)(5.60)}{\left[ \frac{1}{4\pi(0.002163)} + \frac{1}{2\pi(0.01385)} \ln\left(\frac{4.75}{4.18}\right) + \frac{10^3}{2\pi(4.14)(5.7)} + \frac{10^3}{2\pi(4.75)(34)} \right]} \right\}$$

$$z_f = \frac{3.66}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{0.610}{36.79 + 1.47 + 6.74 + 0.985} \right) \approx 0.015 \text{ m}$$

Substituindo  $z_f$  na Equação 4-5, a temperatura máxima central do combustível é:

$$T_{CL}(z) = T_{in} + q_0 \left\{ \frac{L_e}{\pi \dot{m} c_p} \left( \sin \frac{\pi z}{L_e} + \sin \frac{\pi L}{2L_e} \right) + \left[ \frac{1}{2\pi R_{co} h} + \frac{1}{2\pi k_c} \ln\left(\frac{R_{co}}{R_{ci}}\right) + \frac{1}{2\pi R_g h_g} + \frac{1}{4\pi \bar{k}_f} \right] \cos \frac{\pi z}{L_e} \right\} \quad (\text{eq. 4-5})$$

$$T_{CL} = 286 + 31.1 \left[ 0.610 \left( \sin \frac{\pi(0.015)}{3.66} + 1 \right) + 45.99 \cos \left( \frac{\pi(0.015)}{3.66} \right) \right]$$

$$T_{CL} = 1735.3^\circ\text{C}$$

#### 4.1.3. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA

Esse problema trata as características físicas dos materiais como constantes, ou seja, usa uma média de valores para o contexto do problema. Com isso, o código VARETA\_COMBUSTÍVEL não considerou a dependência da temperatura de tais propriedades nessa simulação, mantendo assim as mesmas características.

O problema apresentado tem por objetivo encontrar as temperaturas máximas do combustível e do revestimento bem como as alturas (cota  $z$ ) onde ocorreram. O enunciado do problema não fornece diretamente o valor de  $q'''$  máximo. No entanto, um dos dados é a taxa linear de calor ( $q'$ ) no plano onde ocorre  $q'''$  máximo. Assim, pode-se obter facilmente o valor de  $q'''$  máximo e, conseqüentemente, considerá-lo como um dado do problema.

$$q'(z) = \pi \cdot R_f^2 \cdot q'''(z) \quad (\text{eq. 4-6})$$

Onde  $R_f$  é o raio da pastilha combustível.

O valor obtido para  $q'''_{\text{máximo}}$  foi de 588902190 W/m<sup>3</sup>.

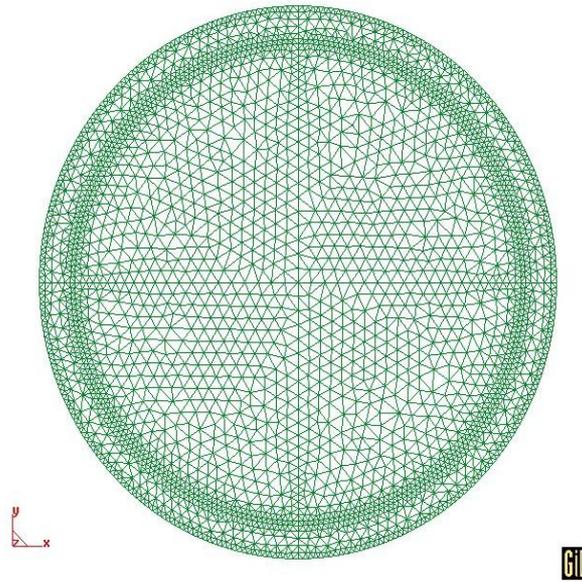
Para que as equações do problema se mantenham iguais, o parâmetro “A” da equação de distribuição de  $q'''$  assume o valor de  $q'''$  máximo e o parâmetro “k” assume o valor zero. A equação 4-7 passa para a forma da equação 4-8, que tem a estrutura típica da função  $q'''(z)$ , que serve como base para encontrar as equações usadas na resolução analítica.

$$q'''(z) = A(1 + k \cdot z) \cos\left(\frac{\pi}{H} \cdot z\right) \quad (\text{eq.4-7})$$

$$q'''(z) = A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{H} \cdot z\right) \quad (\text{eq.4-8})$$

#### 4.1.4. DADOS DE DISCRETIZAÇÃO

A vareta combustível foi discretizada em 3660 segmentos de 1 mm cada ao longo de seu comprimento. A malha usada para a discretização de cada plano transversal ao comprimento da vareta foi gerada por Júnior(2010) e possui 5800 elementos triangulares e 3059 nós. A figura 4-1 mostra a malha usada nesse trabalho para resolução do desse problema.



**Figura 4-1: Malha da pastilha combustível concêntrica ao revestimento**

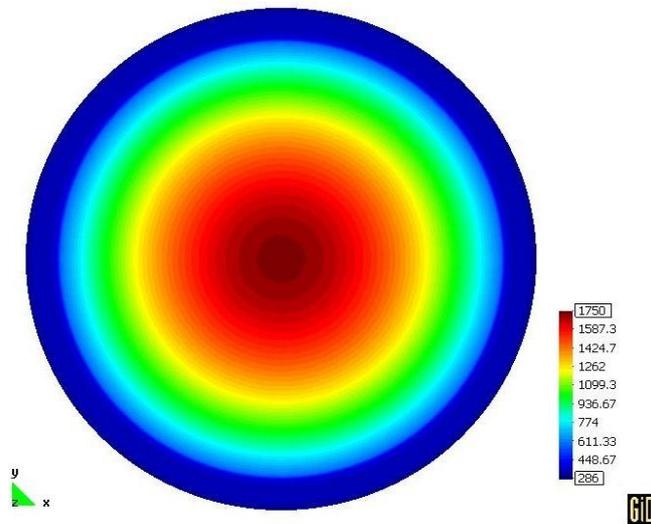
#### 4.1.5. RESULTADOS NUMÉRICOS

A tabela 4-2 compara os resultados numéricos obtidos pelo código VARETA\_COMBUSTIVEL com os resultados da solução analítica.

	Resultado Analítico	Resultado Numérico	Erro (%)
Temperatura máxima no combustível [°C]	1735.3	1736.3	0.057
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.015	0.015	0.000
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	341.0	341.0	0.000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.650	0.646	0,109
T bulk de saída [°C]	324.0	323.9	0.026
Tempo de simulação: 578 segundos			

**Tabela 4-2: Comparação de resultados**

A figura 4-2 representa o gráfico de distribuição de temperatura no plano central da vareta gerado pelo programa GID.



**Figura 4-2: Gráfico de distribuição de temperatura em  $z = 0$ .**

## 4.2.VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS AO REVESTIMENTO

A validação do código VARETA\_COMBUSTÍVEL em relação à otimização do nível de potência é feita usando o mesmo problema apresentado por Todreas e Kazimi (1993, p.587) usado para a validação anterior. Porém, o problema é tratado aqui em sentido inverso. O código otimiza o nível de potência, através do método de Newton-Raphson, fazendo com que a temperatura máxima do combustível seja igual a temperatura limite do combustível. Para essa validação o limite de temperatura do combustível foi considerado igual ao valor encontrado pela solução analítica. O objetivo é que o código encontre o valor de  $q'''_{máximo}$  que foi dado no problema.

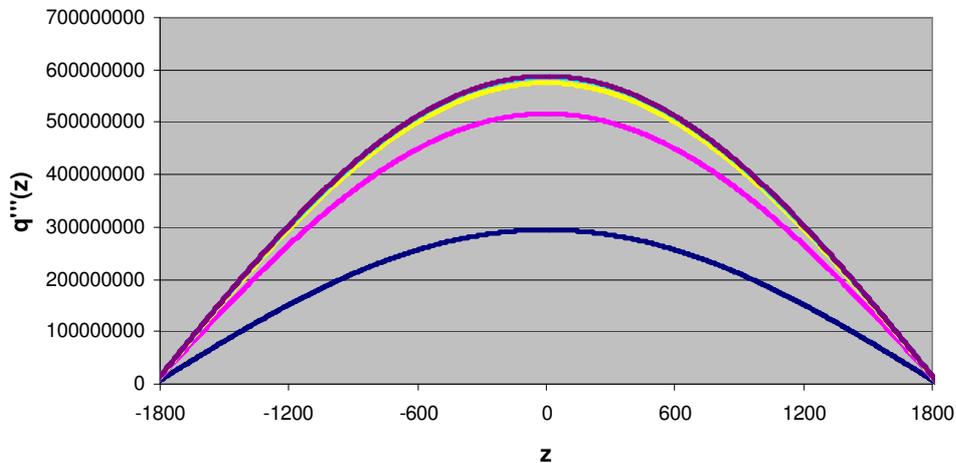
### 4.2.1. RESULTADOS NUMÉRICOS

A tabela 4-3 compara os resultados numéricos obtidos pelo código VARETA\_COMBUSTIVEL com os resultados da solução analítica.

	Resultado Analítico	Resultado Numérico	Erro (%)
$q'''_{máximo}$ [W/m <sup>3</sup> ]	588902190	588482217	0.086
Temperatura máxima no combustível [°C]	1735.3	1735.3	0.000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.015	0.015	0.000
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	341.0	340.9	0.005
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.650	0.646	0,109
T bulk de saída [°C]	324.0	323.9	0.026
Tempo de simulação: 5629 segundos			

**Tabela 4-3: Comparação de resultados**

O gráfico 4-1 apresenta a evolução de  $q'''(z)$  a cada iteração realizada pelo programa através do Método de Newton-Raphson.



**Gráfico 4-1: Evolução de  $q'''(z)$**

Os resultados apresentados mostram a consistência do código através de seu bom desempenho para simulações de distribuição de temperatura em pastilhas concêntricas ao revestimento e o legitima a fazer outras simulações similares. O gráfico 4-1 mostra também a rápida convergência obtida pelo método aplicado.

#### 4.2.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES TÉRMICAS COMO DEPENDENTES DA TEMPERATURA

Esta seção tem por objetivo comparar os resultados obtidos com a simulação onde as propriedades térmicas dos materiais são consideradas constantes com os resultados onde essas propriedades são tratadas como dependentes da temperatura. As relações de dependência estão descritas no capítulo três deste trabalho. Os dados de simulação são os mesmos do problema apresentado por Todreas e Kazimi (1993, p.587).

### 4.2.3. RESULTADOS NUMÉRICOS

A tabela 4-4 compara os resultados numéricos obtidos pelo código VARETA\_COMBUSTIVEL usando propriedades térmicas dependentes da temperatura com os resultados da solução analítica que usa propriedades térmicas constantes.

	Resultado Analítico (Propriedades constantes)	Resultado Numérico (Propriedades dependentes)
Temperatura máxima no combustível [°C]	1735.3	1739.5
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.015	0.014
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	341.0	377.8
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.650	0.662
T bulk de saída [°C]	324.0	323.6
Tempo de simulação: 2175 segundos		

**Tabela 4-4: Comparação de resultados**

Os resultados mostram que as correlações de dependência das propriedades térmicas usadas neste trabalho são apropriadas para o contexto do problema considerado.

### 4.3. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À DISCRETIZAÇÃO AXIAL DE $q'''(z)$ PARA PASTILHA EXCÊNTRICA AO REVESTIMENTO

A validação do código VARETA\_COMBUSTIVEL para pastilhas excêntricas ao revestimento foi feita tendo como base o artigo de Nijising(1966).

#### 4.3.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Considerando os dados geométricos de uma pastilha combustível bem como suas propriedades físicas, o artigo calcula analiticamente a distribuição radial de temperatura no plano central da vareta. A solução analítica não é apresentada no referido artigo, apenas os resultados.

A tabela 4-5 apresenta os dados do problema.

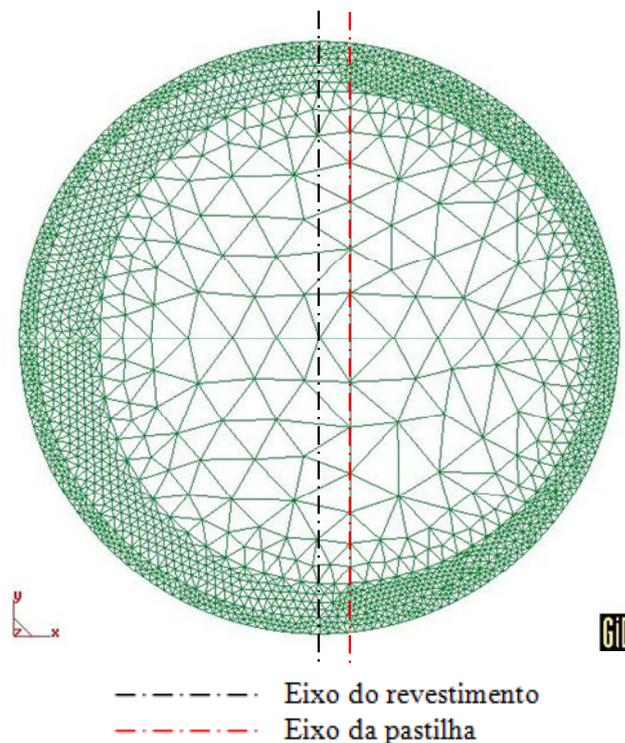
DADOS GEOMÉTRICOS	
Diâmetro da pastilha combustível [mm]	12.0
Diâmetro interno do revestimento [mm]	13.638
Diâmetro externo do revestimento [mm]	14.438
Espessura do revestimento [mm]	0.8
Espessura do gap [mm]	0.819
Comprimento ativo [mm]	3660
Excentricidade [%]	10
Passo [mm]	18.0
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341
Taxa volumétrica de geração de calor do plano médio [kW/m <sup>3</sup> ]	366666667
Condutividade do combustível [kW/m °C]	0,0035
Condutividade do revestimento [kW/m °C]	0.017
Coefficiente de transferência de calor [kW/m <sup>2</sup> °C]	10.0
Condutância do gap [kW/m <sup>2</sup> °C]	5.0
Temperatura de entrada do refrigerante [°C]	286
Pressão do sistema [MPa]	15.5

**Tabela 4-5: Dados do problema apresentado por Nijssing (1966)**

#### 4.3.2. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA

Assim como o problema usado para a validação do código no caso da pastilha simétrica ao revestimento, esse artigo trata as características físicas dos materiais como constantes usando uma média de valores para o contexto do problema. Para essa simulação o código VARETA\_COMBUSTÍVEL não considerou a dependência da temperatura de tais propriedades para que mantivessem as mesmas características.

A figura 4-3 mostra o deslocamento do centro da pastilha em relação ao centro do revestimento.

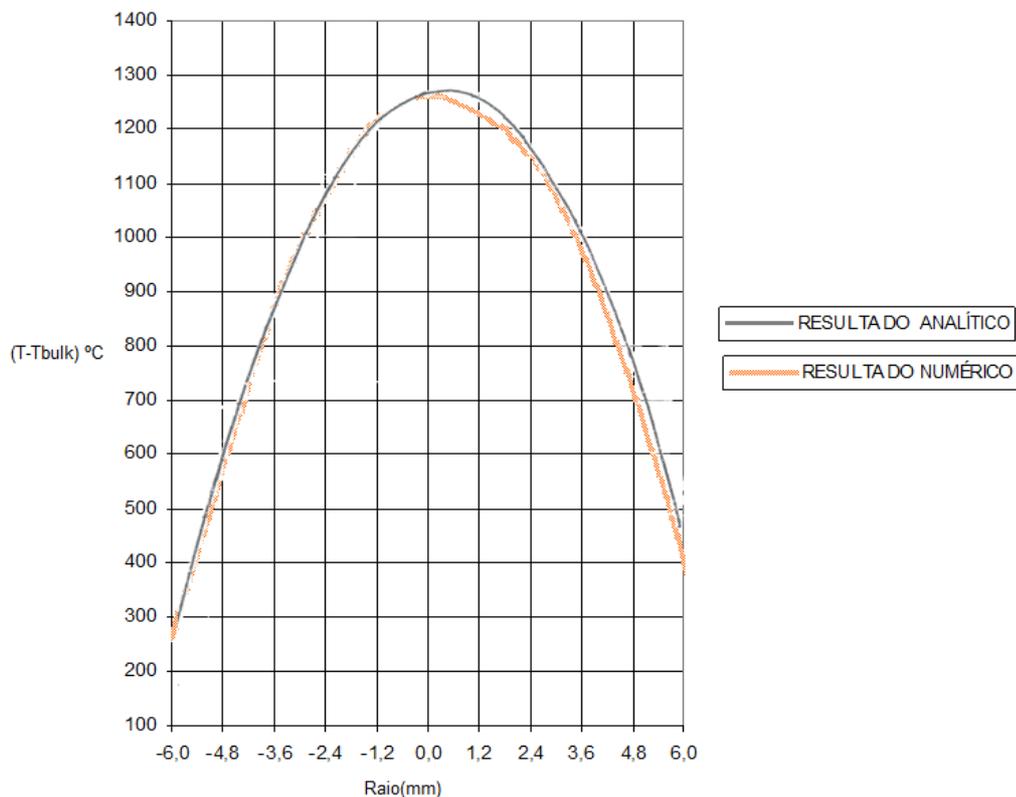


**Figura 4-3: Malha da pastilha combustível com excentricidade de 10%. Júnior(2010).**

A simulação feita foi tratada de forma análoga a validação do código para pastilhas concêntricas ao revestimento. O parâmetro “A” da equação de distribuição de  $q'''(z)$  assume o valor de  $q'''$  máximo e o parâmetro “k” assume o valor zero. A vareta combustível foi discretizada em 366 segmentos de 1 cm cada ao longo de seu comprimento. O objetivo dessa simulação é, a partir de do valor de  $q'''$  máximo dado no problema, encontrar a distribuição de temperatura no plano central da pastilha.

### 4.3.3. RESULTADOS NUMÉRICOS

O artigo usado não apresenta os valores numéricos obtidos através da solução analítica. No entanto, para que seja feita uma análise qualitativa da distribuição de temperatura no eixo horizontal da pastilha, o gráfico 4-2 apresenta o gráfico gerado pelo autor do artigo sobreposto ao gráfico interpolado com os resultados numéricos gerados pelo código. Esse gráfico relaciona a diferença entre a temperatura do combustível e a temperatura bulk com a posição do eixo x.



**Gráfico 4-2: Comparação de dados de Nijsing(1966) e de resultados do programa**

A figura 4-4 mostra o gráfico de distribuição de temperatura no plano central da vareta gerado pelo programa GID.

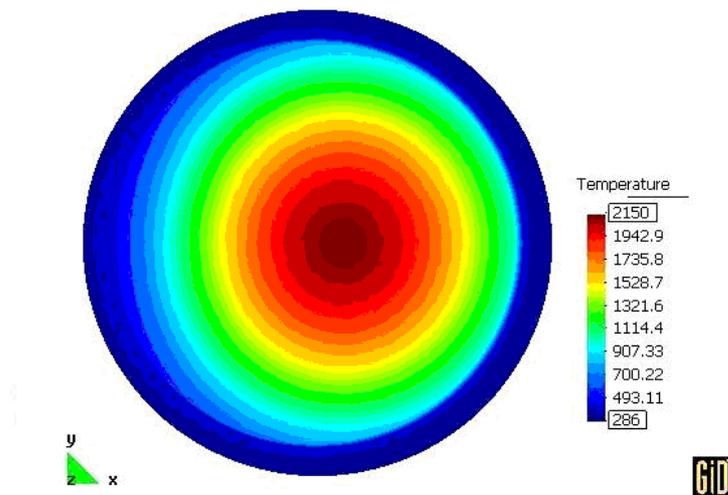


Figura 4-4: Gráfico de distribuição de temperatura em  $z = 0$ .

#### 4.4.VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL EM RELAÇÃO À OTIMIZAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS

Esta seção tem por objetivo validar o código VARETA\_COMBUSTÍVEL em relação à otimização do nível de potência para uma pastilha excêntrica ao revestimento e também teve como referência o artigo de Nijising(1966) usado na validação anterior. Assim como para as pastilhas concêntricas ao revestimento, o problema é tratado aqui em sentido inverso. O código otimiza o nível de potência, através do método de Newton-Raphson, fazendo com que a temperatura máxima do combustível seja igual a temperatura limite do combustível. Para essa validação o limite de temperatura do combustível foi considerado igual ao valor encontrado pela solução numérica anterior. O objetivo é que o código encontre o valor de  $q'''_{máximo}$  que foi dado na simulação anterior.

#### 4.4.1. RESULTADOS NUMÉRICOS

A tabela 4-6 compara os resultados numéricos obtidos pelo código VARETA\_COMBUSTIVEL para o mesmo problema, tratado em dois sentidos. A simulação (1) considera  $q'''_{máximo}$  como dado de entrada e encontra as temperaturas máximas. A simulação (2) admite o limite de temperatura do combustível como dado de entrada e otimiza o nível de potência para que a temperatura máxima do combustível seja igual à temperatura limite. Para que se pudessem comparar os resultados, o limite de temperatura do combustível adotado foi igual ao encontrado na simulação anterior.

	Simulação 1	Simulação 2	Erro (%)
$q'''_{máximo}$ [W/m <sup>3</sup> ]	366666667	366666934	0,00005
Temperatura máxima no combustível [°C]	1573.9	1574.0	0,00635
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.020	0.020	0.00000
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	422.6	422.6	0.00000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.270	0.270	0.00000
T bulk de saída [°C]	336.6	336.6	0.00000
Tempo de simulação[s]	59	831	

**Tabela 4-6: Comparação de resultados**

Os resultados apresentados mostram a consistência do código através de seu bom desempenho para simulações de distribuição de temperatura em pastilhas excêntricas ao revestimento e o legitima a fazer outras simulações similares.

## CAPÍTULO 5

### 5. ESTUDO DE CASOS

Neste capítulo serão expostos estudos de simulações de aplicações do código VARETA\_COMBUSTÍVEL a algumas situações problemas cujos resultados de distribuição de temperatura para casos onde ocorrem variações de temperatura limite do combustível, variações da vazão mássica do refrigerante, diferentes perfis de distribuição da taxa de geração volumétrica de calor e excentricidade das pastilhas combustível serão comparados entre si. Um dos objetivos dessas simulações é o estudo de otimização do processo de retirada de calor das varetas combustível mantendo a temperatura máxima do combustível e o DNBR dentro dos limites estabelecidos no projeto. Essas simulações permitem uma análise da fragilidade do projeto do ponto de vista dessas limitações.

Em todos os casos as propriedades físicas foram consideradas dependentes da temperatura. Para isso, o código VARETA\_COMBUSTÍVEL usa o método iterativo e as equações descritas no capítulo três deste trabalho.

Para essas simulações, o equipamento usado foi um *note book* Sony Waio com processador Intel Core i5-2410M de 2,30GHz.

#### 5.1.DADOS DE DISCRETIZAÇÃO

As simulações realizadas no estudo desse capítulo utilizaram três tipos malhas. Para que não seja necessário descrever repetidamente todos os dados em cada caso, a descrição das simulações apenas mencionarão o tipo de malha usada. Os dados de discretização, a geometria e as propriedades estão apresentados na tabela abaixo:

<b>DADOS GEOMÉTRICOS</b>			
	<b>Malha_1</b>	<b>Malha_2</b>	<b>Malha_3</b>
Diâmetro da pastilha combustível [mm]	8.2	12.0	12.0
Diâmetro interno do revestimento [mm]	8.36	13.638	13.638
Diâmetro externo do revestimento [mm]	9.5	14.438	14.438
Espessura do revestimento [mm]	0.57	0.8	0.8
Espessura do gap [mm]	0.08	0.819	0.819
Comprimento ativo [mm]	3660	3660	3660
Excentricidade [%]	0	10	0
Passo [mm]	12.6	18.0	18.0
<b>DADOS DE DISCRETIZAÇÃO</b>			
Número de segmentos que a vareta foi dividida ao longo do comprimento	366	366	366
Número de elementos finitos (triangulares)	5800	4092	7054
Número de nós	3059	2156	3632
<b>INFORMAÇÕES DO SISTEMA</b>			
Temperatura de entrada do refrigerante [°C]	286	286	286
Pressão do sistema [MPa]	15.5	15.5	15.5
Temperatura de saturação do refrigerante [°C]	345°C	345°C	345°C

**Tabela 5-1: Tipos de malhas usadas**

## 5.2.CASO Nº1: ESTUDO DE FATORES LIMITANTES DE PROJETO

### 5.2.1. OBJETIVO

De acordo com Perrotta (1999, p.50), “Os limites de projeto devem ser estabelecidos com o objetivo de demonstrar que um requisito funcional pertinente a uma determinada condição de projeto, é satisfeito”. Segundo o autor, estes limites são aplicados com a finalidade de garantir que exista uma suficientemente baixa probabilidade de falha relacionada ao requisito funcional. Por exemplo, no caso da vareta combustível deve ser garantida sua integridade evitando temperaturas excessivas, evitando pressão interna excessiva devido à liberação de gases de fissão e evitando tensões e deformações altas no revestimento.

O primeiro objetivo dessa simulação é verificar a distribuição de temperatura na pastilha combustível, o DNBR mínimo ocorrido e o Tbulk de saída em condições onde a temperatura máxima do combustível é a temperatura limite em que a integridade do material é mantida. O código foi alimentado com os dados de entrada e fez a simulação usando o parâmetro “A” inicial dado, usado na equação 5-1 de distribuição de potência . Caso a temperatura máxima atingida no combustível não seja igual a temperatura limite declarada, um novo valor para o parâmetro “A” foi dado através do método de Newton-Raphson e uma nova simulação foi feita. Esse processo tem por objetivo encontrar o nível de potência exato para que o resultado da temperatura máxima do combustível seja igual à temperatura limite declarada. Após esse processo, uma outra simulação foi efetuada, agora considerando o DNBR limite. O processo é análogo, porém com vistas a encontrar o nível de potência exato para que o resultado do DNBR mínimo seja igual ao DNBR mínimo limite declarado.

$$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right) \quad (\text{eq. 5-1})$$

### 5.2.2. DADOS DA SIMULAÇÃO

A temperatura limite do combustível usada nessa simulação foi de 2500°C. Para Perrotta (1999) essa é a temperatura limite para a pastilha combustível típica de um reator tipo PWR. Os dados de simulação estão apresentados na tabela abaixo.

<b>DADOS DA SIMULAÇÃO</b>	
Temperatura limite do combustível [°C]	2500
DNBR mínimo	1.3
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341
Malha usada	Malha_1
<b>DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA</b>	
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$	
Parâmetro “A” inicial	600000000
Parâmetro “k”	0

**Tabela 5-2: Dados de simulação**

Com o parâmetro “k” assumindo o valor zero, a equação de distribuição da taxa de geração volumétrica de calor ( $q'''$ ) passa a ser a função cosseno usual, admitido em condições normais de operação de reatores tipo PWR e o parâmetro “A” assume o valor de  $q'''_{\text{máximo}}$ .

### 5.2.3. RESULTADOS

Os resultados numéricos apresentados na tabela 5-3 foram encontrados pela simulação que tinha por objetivo alcançar a temperatura limite no combustível.

<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2500.0
Parâmetro “A”	868498641
$q'''_{\text{máximo}}$ [W/m <sup>3</sup> ]	868498641
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010
Temperatura máxima no revestimento [°C]	410.9
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	359.7
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.590
T bulk de saída [°C]	338.0
DNBR	0.61719

**Tabela 5-3: Resultados de simulação**

Os resultados numéricos apresentados na tabela 5-4 foram encontrados pela simulação que tinha por objetivo alcançar o DNBR limite.

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2019.0
Parâmetro "A"	684375000
$q'''_{\text{máximo}}$ [W/m <sup>3</sup> ]	684375000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010
Temperatura máxima no revestimento [°C]	386.0
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	345.6
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.640
Tbulk de saída [°C]	328.8
DNBR	1.29570

Tabela 5-4: Resultados de simulação

O tempo total de simulação foi 6591 segundos.

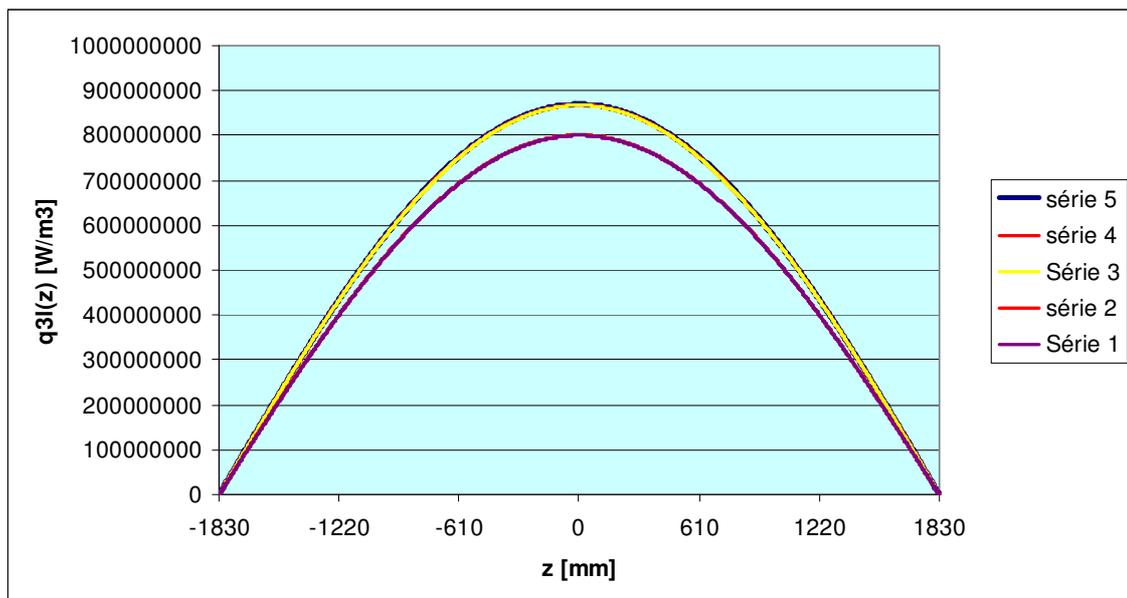
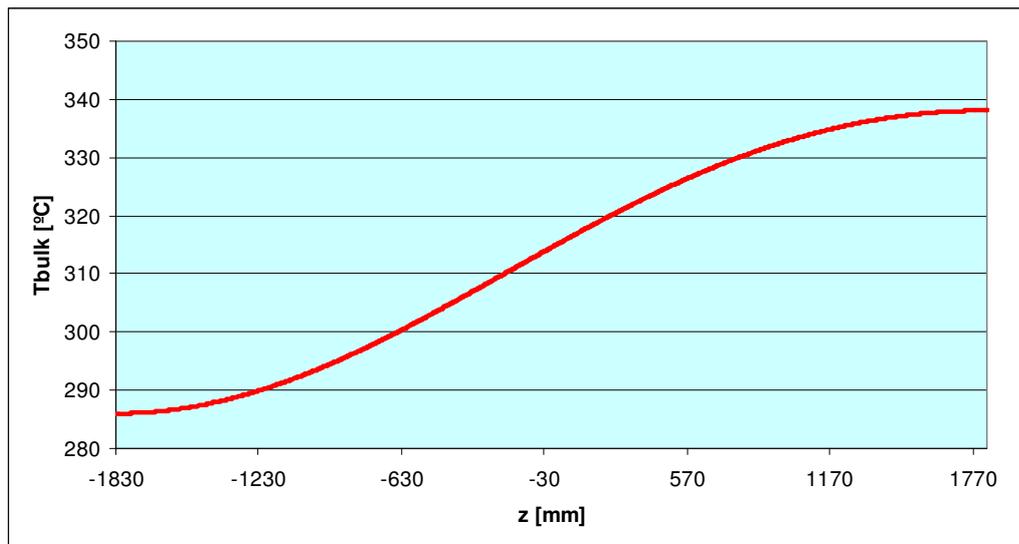


Gráfico 5-1: Evolução de  $q'''(z)$  considerando a temperatura limite na pastilha combustível



**Gráfico 5-2: Tbulk considerando a temperatura limite na pastilha combustível**

Após análise das tabelas que descrevem os resultados numéricos da simulação, nota-se que para a pastilha combustível atingir sua temperatura limite ( $2500^{\circ}\text{C}$ ) a temperatura do refrigerante bulk aumentou muito, chegando perto da temperatura de saturação para a pressão do sistema ( $345^{\circ}\text{C}$ ). Verifica-se também que, para que a pastilha combustível atinja sua temperatura limite, o DNBR mínimo permanece abaixo do limite de segurança admitido (1.3).

No entanto, através da segunda simulação percebe-se que quando o DNBR atinge seu limite de segurança, a temperatura máxima do combustível continua abaixo de seu limite de segurança.

Com essas simulações pode-se concluir que o fator limitante de um projeto com essas características está associado ao DNBR mínimo do reator. Isso significa que ao elevar o nível de potência do reator, o limite para o DNBR é alcançado antes que se alcance o limite de integridade do combustível.

### 5.3. CASO Nº2: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA DIFERENTES PERFIS DE $q'''(z)$ .

#### 5.3.1. OBJETIVO

Uma das contribuições deste trabalho é a possibilidade de analisar a distribuição de temperatura em pastilhas combustível para diferentes perfis de distribuição da taxa volumétrica de geração de calor ( $q'''$ ) respeitando os limites de temperatura do combustível e DNBR mínimo. Essa simulação tem por objetivo comparar resultados de temperatura e DNBR para casos onde a única diferença é o perfil de  $q'''(z)$ .

#### 5.3.2. DADOS DA SIMULAÇÃO

Para fazer um estudo comparativo neste caso, foi realizada uma simulação cujo objetivo é verificar quais são os limites de projeto (a temperatura máxima do combustível ou o DNBR mínimo) para uma distribuição de potência diferente da distribuição cossenoidal, usada no caso 1. Nesse caso, o parâmetro “k” assume valor igual à divisão de dois pela altura da vareta combustível  $\left(\frac{2}{H}\right)$  na equação 2-5 de distribuição de potência. Esse valor faz com que  $q'''(z)$  seja igual a zero nas extremidades da vareta.

Em um segundo momento, compara-se os resultados numéricos obtidos por esta simulação com os resultados numéricos obtidos pela simulação onde o parâmetro k é igual a zero (caso 1). O objetivo dessa comparação é verificar as diferenças de resultados para diferentes perfis de distribuição de potência.

Os dados de simulação estão apresentados na tabela abaixo.

DADOS DA SIMULAÇÃO	
	Simulação_1
Temperatura limite do combustível [°C]	2500
DNBR limite	1.3
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341
Malha usada	Malha_1
DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA	
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$	
Parâmetro "A" inicial	600000000
Parâmetro "k" $\left(\frac{2}{H}\right)$	0.00054644

Tabela 5-5: Dados de simulação

### 5.3.3. RESULTADOS

Os resultados numéricos apresentados na tabela 5-6 foram encontrados pela simulação que tinha por objetivo alcançar os limites de projeto.

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO		
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right) \text{ com } k = \left(\frac{2}{H}\right)$		
	Objetivo: Alcançar temperatura limite do combustível	Objetivo: Alcançar DNBR limite
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2500.0	2182.0
$q'''_{\text{máximo}}$ [W/m <sup>3</sup> ]	1009839073	864311484
Parâmetro "A"	871716545	746093750
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010	0.020
Temperatura máxima no revestimento [°C]	403.6	387.4
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	354.3	345.5
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.810	0.840
Tbulk de saída [°C]	338.2	332.1
DNBR	0.54331	1.29476
Tempo de simulação [seg]	5505	

Tabela 5-6: Comparação de resultados

A tabela 5-6 mostra que para a pastilha combustível atingir sua temperatura limite, o DNBR mínimo permanece abaixo do limite de segurança admitido. E, quando o DNBR atinge seu limite de segurança, a temperatura máxima do combustível continua abaixo de seu limite de segurança.

Com essa simulação pode-se concluir que o fator limitante desse projeto com a perturbação da distribuição cossenoidal de potência, assim como no caso 1, também está associado ao DNBR mínimo do reator.

#### 5.3.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA DIFERENTES PERFIS DE DISTRIBUIÇÃO DE $q'''(z)$

A tabela abaixo compara as diferenças de resultados para os dois diferentes perfis de distribuição de potência. Em ambos os casos, a simulação teve como objetivo Alcançar o DNBR limite do projeto. Essa comparação justifica-se pelo fato de ser o DNBR o fator limitante de projeto, conforme verificado anteriormente.

	$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$	
	$(k = 0)$	$\left(k = \frac{2}{H}\right)$
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2019.0	2182.0
$q'''_{\text{máximo}}$ [W/m <sup>3</sup> ]	684375000	864311484
Parâmetro “A”	684375000	746093750
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010	0.020
Temperatura máxima no revestimento [°C]	386.0	387.4
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	345.6	345.5
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.640	0.840
Tbulk de saída [°C]	328.8	332.1
DNBR	1.29570	1.29476
Potência gerada pela vareta [W]	84211.3	91805.6

**Tabela 5-7: Comparação de resultados**

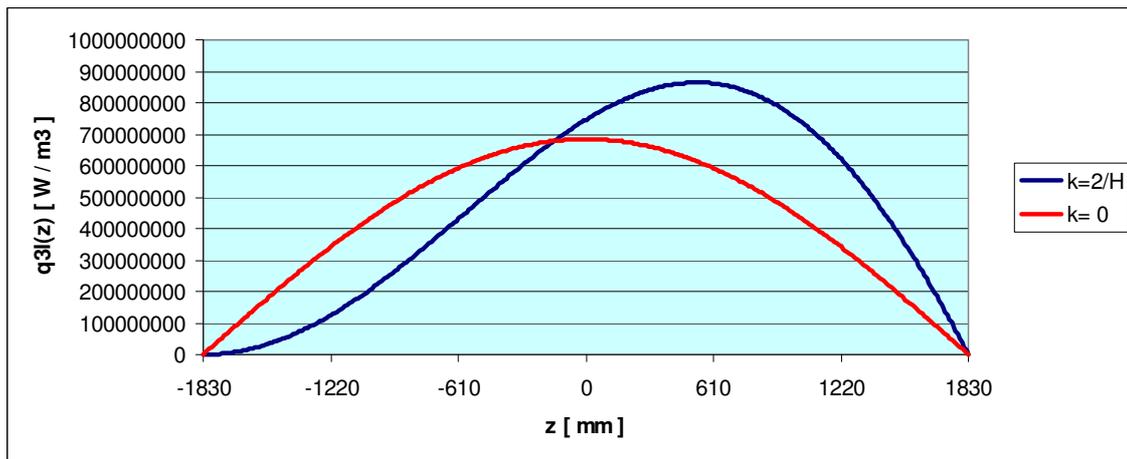


Gráfico 5-3: Distribuições de  $q'''(z)$  considerando a temperatura limite na pastilha combustível

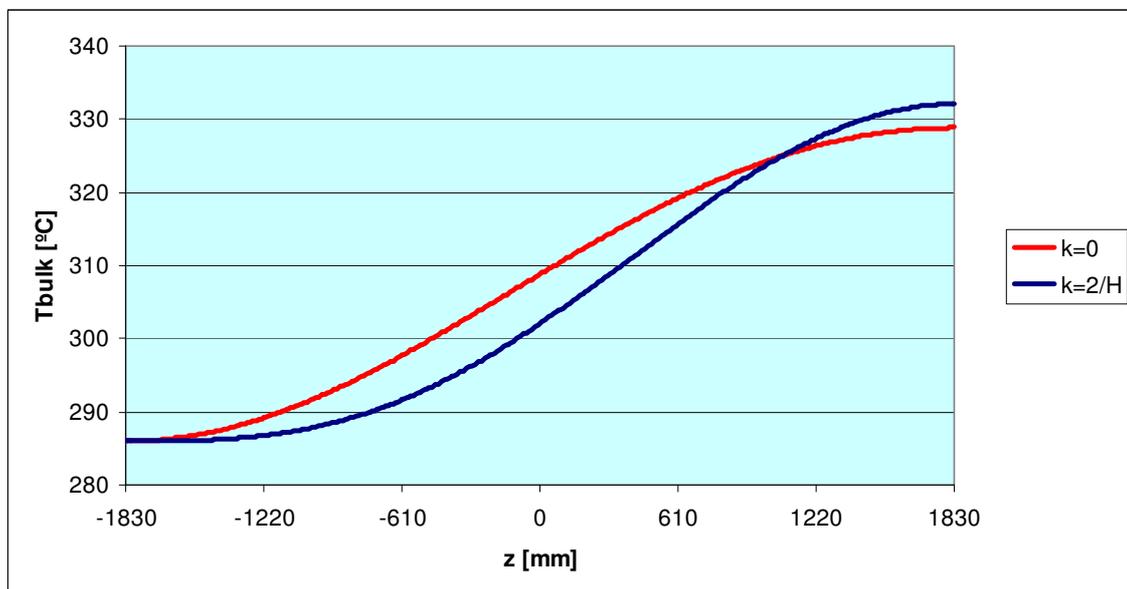


Gráfico 5-4:  $T_{bulk}$  considerando a mudança de perfil de  $q'''(z)$ .

Os resultados numéricos mostram que o valor de  $q'''_{máximo}$ , na simulação onde houve mudança do perfil de distribuição de potência, necessitou ser 26,3% maior que o da simulação onde não houve mudança nesse perfil. A temperatura de saída do refrigerante não apresenta uma diferença significativa para esses perfis de distribuição de potência, porém, a temperatura máxima do combustível para o caso do perfil modificado é 163,0°C maior que a temperatura máxima do combustível do caso original. Embora a potência gerada pela vareta combustível seja maior no caso onde houve modificação na distribuição de  $q'''$ , o fato da temperatura máxima do combustível também ser maior aponta que a modificação no perfil dessa distribuição pode ocasionar uma “queima” localizada de combustível de forma a danificar sua estrutura e comprometer o bom desempenho de seu funcionamento.

**CASO N°3: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA PASTILHAS EXCÊNTRICAS AO REVESTIMENTO COM RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA PASTILHAS CONCÊNTRICAS AO REVESTIMENTO.**

**5.4.1. OBJETIVO**

O objetivo dessa simulação é verificar a influência da excentricidade das pastilhas combustível na distribuição de temperatura no combustível, no revestimento e no refrigerante.

**5.4.2. DADOS DA SIMULAÇÃO**

Para fazer um estudo comparativo nesse caso, foram realizadas duas simulações.

A simulação\_1 foi feita com as mesmas características do artigo de Nijssing (1966) usado para validação do código computacional para pastilhas com 10% de excentricidade em relação ao diâmetro do revestimento, mas com propriedades termo-hidráulicas dependentes da temperatura. A simulação\_2 foi feita com dimensões geométricas iguais a da simulação\_1, porém sem considerar a excentricidade. Em ambas as simulações a temperatura limite do combustível foi considerada 2500°C e o DNBR mínimo de 1.3.

Os dados de simulação estão apresentados na tabela abaixo.

<b>DADOS DA SIMULAÇÃO</b>		
	<b>Simulação_1 (excêntrica)</b>	<b>Simulação_2 (concêntrica)</b>
Temperatura limite do combustível [°C]	2500	2500
DNBR mínimo	1.3	1.3
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341	0.341
Malha usada	Malha_2	Malha_3
<b>DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA</b>		
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$		
Parâmetro "A" inicial	200000000	200000000
Parâmetro "k"	0	0

**Tabela 5-8: Dados de simulação**

### 5.4.3. RESULTADOS

Os resultados numéricos apresentados na tabela 5-9 foram encontrados pela simulação que tinha por objetivo alcançar o DNBR limite do reator.

	Simulação_1 (excêntrica)	Simulação_2 (concêntrica)
Temperatura máxima no Combustível[°C]	1501.6	1775.6
$q'''_{máximo}$ [W/m <sup>3</sup> ]	293750000	340625000
Parâmetro "A"	293750000	340625000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.020	0.020
Temperatura máxima no revestimento [°C]	368.8	371.1
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	348.9	352.0
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.520	0.580
Tbulk de saída [°C]	325.8	331.2
DNBR	1.29571	1.30749
Potência gerada pela vareta [W]	77408.5	89760.9
Tempo de simulação [seg]	2333	2665

Tabela 5-9: Comparação de resultados

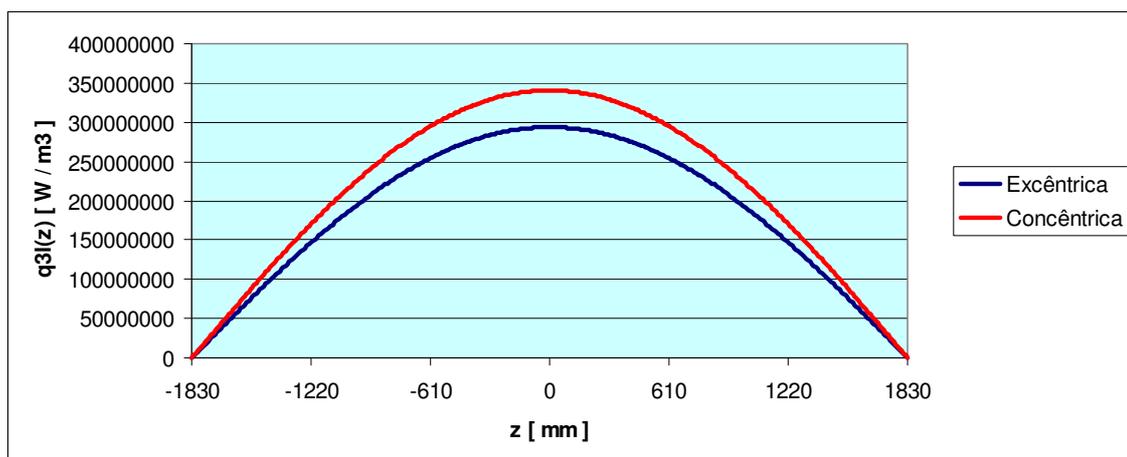
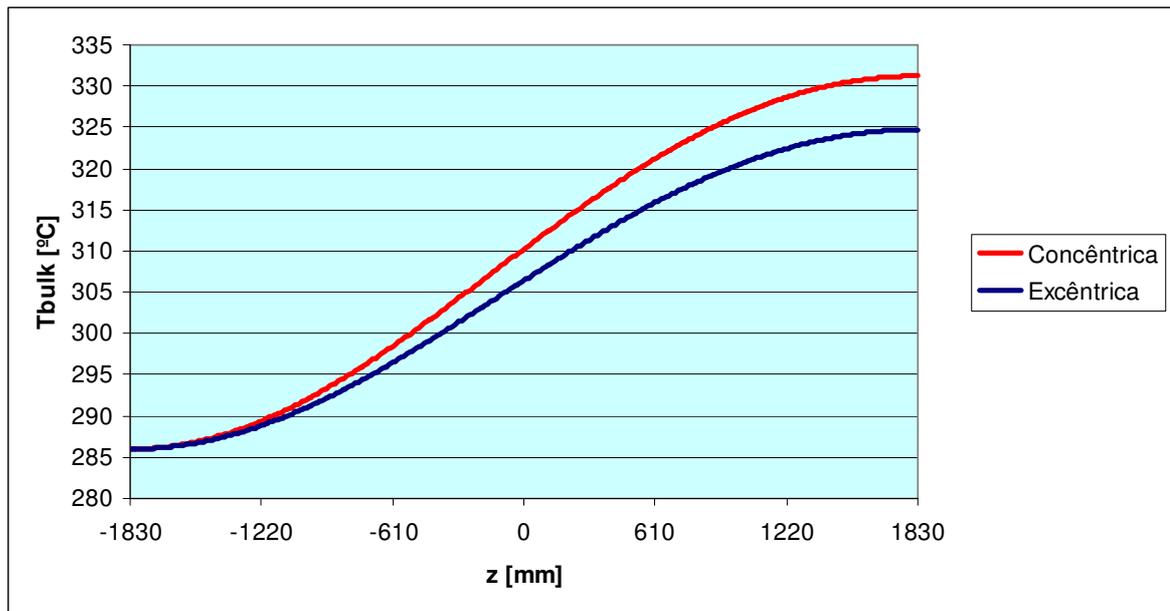


Gráfico 5-5: Distribuições de  $q'''(z)$  considerando a excentricidade na pastilha combustível



**Gráfico 5-6: Tbulk considerando a excentricidade na pastilha combustível**

A tabela 5-9 mostra que excentricidade na pastilha combustível em 10% do diâmetro interno do revestimento fez o DNBR alcançar seu limite mais rapidamente com o aumento dos níveis de potência. A excentricidade diminuiu a distância entre o combustível e o revestimento em uma parte da superfície do combustível. Como a condutividade do gap é baixa em relação aos outros materiais, essa distância menor fez com que a temperatura do revestimento aumentasse mais rapidamente. Esse fenômeno colaborou para ocorrência de DNB. Assim, o  $q'''_{máximo}$  da vareta com excentricidade é 13,7% menor que o da vareta concêntrica. Conseqüentemente, a potência para essa vareta também diminuiu 12,6%.

## 5.5. CASO Nº4: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA DIFERENTES VALORES DE VAZÃO MÁSSICA.

### 5.5.1. OBJETIVO

O objetivo dessa simulação é verificar o grau de influência da vazão mássica do refrigerante na distribuição de temperatura no combustível, no revestimento e no refrigerante.

### 5.5.2. DADOS DA SIMULAÇÃO

Para realizar um estudo comparativo nesse caso, foram realizadas cinco simulações onde apenas a vazão mássica do refrigerante foi modificada. A simulação\_1 foi feita com as mesmas características da simulação com pastilha concêntrica, apresentada no caso nº 1 e serviu de referência para todas as outras. A simulação\_2 tem sua vazão mássica 10% menor que a da simulação\_1. A simulação\_3 tem sua vazão mássica 20% menor que a da simulação\_1. A simulação\_4 tem sua vazão mássica 30% menor que a da simulação\_1. A simulação\_5 tem sua vazão mássica 40% menor que a da simulação\_1.

Os dados de simulação estão apresentados na tabela 5-10 abaixo.

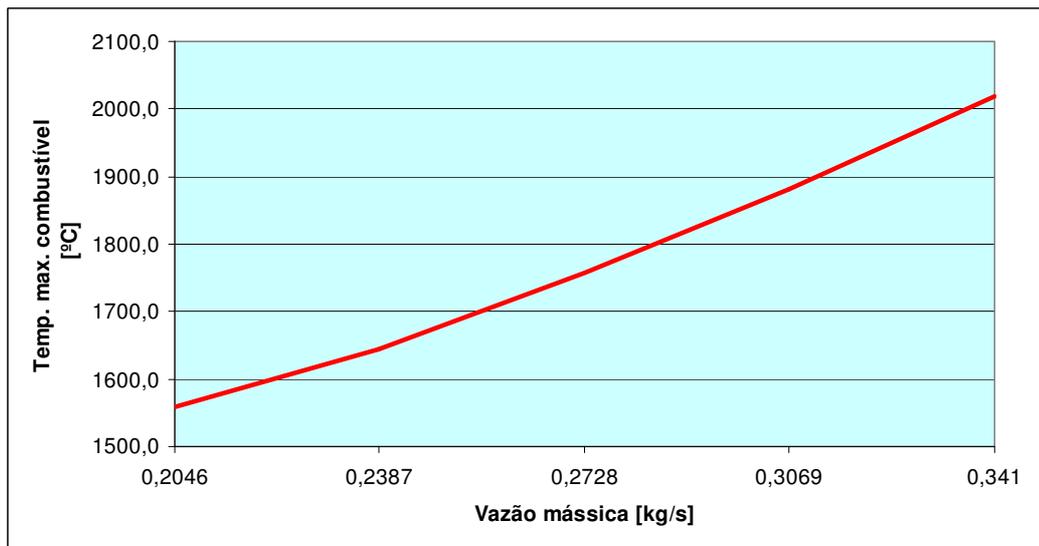
<b>DADOS DA SIMULAÇÃO</b>					
	Simulação_1	Simulação_2	Simulação_3	Simulação_4	Simulação_5
Temperatura limite do combustível [°C]	2500	2500	2500	2500	2500
DNBR mínimo	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.3410	0.3069	0.2728	0.2387	0.2046
Malha usada	Malha_1	Malha_1	Malha_1	Malha_1	Malha_1
<b>DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA</b>					
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$					
Parâmetro "A" inicial	600000000	600000000	600000000	600000000	600000000
Parâmetro "k"	0	0	0	0	0

**Tabela 5-10: Dados de simulação**

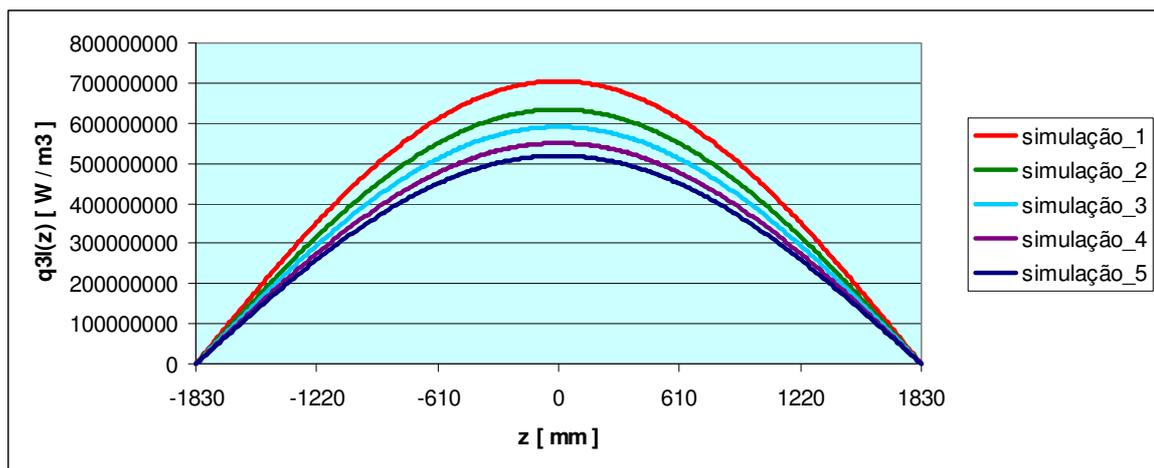
## 5.5.3. RESULTADOS

Os resultados numéricos apresentados na tabela 5-11 foram encontrados por simulações que tinham o objetivo de alcançar o DNBR limite do projeto.

	SIMULAÇÃO				
	Simulação_1	Simulação_2	Simulação_3	Simulação_4	Simulação_5
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2019.0	1880.2	1757.4	1643.7	1559.4
$q'''$ máximo [W/m <sup>3</sup> ]	684375000	634375000	590625000	550000000	518750000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010	0.020	0.020	0.010	0.040
Temperatura máxima no revestimento [°C]	386.0	383.9	383.1	383.4	386.2
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	345.5	346.6	348.6	351.4	356.2
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0.640	0.610	0.580	0.610	0.670
Tbulk de saída [°C]	328.8	329.9	331.7	334.1	337.9
DNBR	1.29570	1.29317	1.29055	1.30030	1.29475
Potência gerada pela vareta [W]	84211.3	78058.9	72675.5	67676.6	63831.4
Tempo de simulação [seg]	5505	4256	3784	2382	3853



**Gráfico 5-7: Temperatura máxima do combustível considerando diferentes taxas de vazão mássica**



**Gráfico 5-8:  $q'''$  ao longo do canal considerando diferentes taxas de vazão mássica**

Os resultados numéricos indicados na tabela 5-11 mostram que a taxa de vazão mássica do refrigerante exerce grande influência na distribuição de temperatura dos elementos do núcleo. Nota-se que, na simulação\_2, com a vazão mássica 10% menor em relação à simulação\_1, há um decréscimo de 7,3% no  $q'''_{máximo}$  para que o DNBR alcance seu limite. Já nas simulações 3 e 4, com a vazão mássica 20% e 30% menores, respectivamente, em relação à simulação\_1, os decréscimos dos valores de  $q'''_{máximo}$  em relação à simulação\_1 são, respectivamente, 13,7% e 19,6%. Verifica-se, com esses dados, que a dependência entre  $q'''_{máximo}$  e a vazão mássica não é linear.

Outra verificação importante nessa simulação está relacionada à potência gerada pela vareta combustível. Quanto menor a vazão mássica, menor deve ser a potência gerada pela

vareta para que a operação se mantenha dentro dos limites de projeto. Essa afirmação sugere que a vazão mássica de operação de um reator deve ser considerada como um elemento de influência na geração da potência desejada.

As simulações deste trabalho tratam os limites de projeto apenas considerando a temperatura máxima do combustível e o DNBR mínimo. Para o caso do estudo de projeto integral de um reator, outras considerações devem ser feitas. Ao aumentar ou diminuir a vazão mássica deve-se considerar, por exemplo, a vibração e a fadiga do material em outros componentes do reator.

## 5.6. CASO Nº5: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE DNBR PARA DIFERENTES CORRELAÇÕES.

### 5.6.1. OBJETIVO

O cálculo do DNBR de um reator térmico é feito, na maioria das vezes, por códigos comerciais como o “COBRA” (Coolant Boiling in Rod Arrays), o ATHELET (Analysis of THERmal-hydraulics of LEaks and Transients) dentre outros. Por ser considerado segredo industrial, o acesso a esse cálculo torna-se difícil já que nem mesmo os parâmetros utilizados são divulgados. No entanto, como afirma Galleti (1984), as maiores limitações na operação de um reator refrigerado a água são impostas pela capacidade de remoção de calor, de modo a evitar a ocorrência de fluxo de calor crítico. Por isso, uma metodologia para análise do comportamento do mínimo DNBR se faz necessária para as várias condições operacionais e transitórias prováveis num reator.

O objetivo dessa simulação é comparar resultados de DNBR em um mesmo caso para duas diferentes correlações.

### 5.6.2. DADOS DA SIMULAÇÃO

Para realizar um estudo comparativo nesse caso, foram realizadas duas simulações.

A simulação\_1 foi feita com as mesmas características da simulação do caso 1 deste capítulo. A correlação de DNBR utilizada foi apresentada por El-Wakil (1971, p. 311) chamada correlação W-3, Westinghouse, por ser usada pela Companhia. Essa correlação é a mesma usada em todas as simulações anteriores e descrita no título 2.2.6.1 deste trabalho.

$$\begin{aligned}
 q''_{crit} = & 10^6 [(2.002 - 0.0004302p) + (0.1722 - 0.0000984p)e^{(18.177 - 0.004129p)x} \\
 & \times [(0.1484 - 1.596x + 0.1729|x|)G \cdot 10^{-6} + 1.037] \\
 & \times [1.157 - 0.869x] \times [0.2664 + 0.8357e^{-3.151D_e}] \\
 & \times [0.8258 + 0.000794(h_f - h_i)]
 \end{aligned}$$

(eq.5-2)

onde,

$p$  = pressão do sistema (psia)

$x$  = título de vapor.

$G$  = vazão mássica (lb/hr ft<sup>2</sup>)

$D_e$  = diâmetro hidráulico (in.)

$h_f$  = entalpia do fluido na altura  $z$  (Btu/lb)

$h_i$  = entalpia de entrada no canal (Btu/lb)

O título de vapor ( $x$ ) é dado por Buongiorno(2010, p.21) através da correlação:

$$x = c_p \frac{(T_{sat} - T_{bulk})}{h_{fg}} \quad (\text{eq.5-3})$$

Onde,

$C_p$  = Calor específico à pressão constante.

$T_{bulk}$  = Temperatura média do refrigerante.

$T_{sat}$  = Temperatura de saturação.

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporização.

A simulação\_2 foi feita com dimensões geométricas iguais a da simulação\_1, porém com a correlação de DNBR diferente. A correção usada nessa simulação também foi apresentada por El-Wakil (1971, p. 310) e chamada correlação de ANL.

$$q''_{crit} = C \left( \frac{G}{10^6} \right)^m \cdot (T_{sat} - T_{bulk})^{0.22} \quad (\text{eq.5-4})$$

onde,

$C$ ,  $m$  = Parâmetros obtidos com o uso de combinações experimentais e análises dimensionais.

$G$  = vazão mássica (lb/hr ft<sup>2</sup>)

$T_{sat}$  = temperatura de saturação (°F)

$T_{bulk}$  = temperatura do fluido refrigerante (°F)

Em ambas as simulações o objetivo específico foi encontrar o nível de potência que alcance o DNBR limite.

Os dados de simulação estão apresentados na tabela abaixo.

<b>DADOS DA SIMULAÇÃO</b>		
	<b>Simulação_1</b>	<b>Simulação_2</b>
Temperatura limite do combustível [°C]	2500	2500
DNBR mínimo	1.3	1.3
Vazão mássica do canal [kg/s]	0.341	0.341
Malha usada	Malha_1	Malha_1
<b>DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA</b>		
$q'''(z) = A(1 + k.z) \cos\left(\frac{\pi}{H}.z\right)$		
Parâmetro "A" inicial	600000000	600000000
Parâmetro "k"	0	0
Correlação de DNBR	Wentinghouse	ANL

### 5.6.3. RESULTADOS

Os resultados numéricos estão apresentados na tabela 5-13.

	<b>Simulação_1</b>	<b>Simulação_2</b>
Temperatura máxima no Combustível[°C]	2019.0	2063.1
$q'''_{máximo}$ [W/m <sup>3</sup> ]	684375000	700000000
Parâmetro "A"	684375000	700000000
Cota z onde ocorre a temperatura máxima no combustível [m]	0.010	0.010
Temperatura máxima no revestimento [°C]	386.0	388.2
Temperatura máxima na face externa do revestimento [°C]	345.6	346.8
Cota z onde ocorre a temperatura máxima na face externa do revestimento [m]	0. 640	0. 640
Tbulk de saída [°C]	328.8	329.7
DNBR	1.29570	1.30636
Potência gerada pela vareta [W]	84211.3	86133.9
Tempo de simulação [seg]	5505	2931

O valor encontrado para o  $q'''_{máximo}$  na simulação\_2 foi 2,3% maior que o encontrado na simulação\_1. Esses resultados mostram que, para esse caso, as correlações apresentadas por El-Wakil (1971, p. 310,311) se mostraram coerentes entre si. Apesar das dificuldades de se obter informações e dados empíricos. Essa diferença também é proveniente de interpolações necessárias para obter os parâmetros das correlações usadas.

## CAPITULO 6

### 6. RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 6.1. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O bom desempenho do código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” para simulações de distribuição de temperatura em pastilhas concêntricas e excêntricas ao revestimento mostra sua utilidade em possíveis simulações similares. Mostra também que, por ser escrito em FORTRAN, pode ser utilizado para outros estudos através da manipulação de subrotinas e do uso de programas auxiliares, como foi o caso da utilização do código NBSNRCE (1990) neste trabalho que trata das propriedades físicas da água dependentes da temperatura.

Os casos simulados por esse código trouxeram contribuições para análise do funcionamento de um reator PWR em condições diversas. As simulações apontam o limite de DNBR como o elemento limitador do projeto. O DNBR mínimo alcança seu limite de segurança antes que a integridade do combustível alcance o seu.

Outro resultado relevante está associado ao perfil de distribuição de potência. Em determinados casos, como foi o caso número dois simulado, a mudança no perfil da distribuição da potência não aumenta a temperatura de saída do refrigerante. No entanto, essa mudança pode ocasionar um aumento da temperatura local e assim danificar a estrutura do revestimento.

A simulação que verificou a influência da excentricidade da pastilha combustível em relação ao revestimento mostrou que a temperatura máxima ocorrida no revestimento, apesar de ser mais alta, não demonstrou aumento expressivo na segurança da integridade do material. Essa conclusão só se justifica se as condições de funcionamento do reator mantiverem a temperatura do refrigerante bem abaixo da temperatura de saturação. Caso contrário, qualquer aumento de temperatura no revestimento pode ocasionar um aumento no DNB e, conseqüentemente, na segurança do reator.

Os resultados das simulações que consideraram a variação da vazão mássica do refrigerante expuseram a grande influência que essa variável tem sobre a temperatura de saída do refrigerante. Esses resultados sugerem que o aumento da vazão mássica possibilitaria um aumento da potência do reator e assim um aproveitamento maior da energia gerada. Porém,

outros fatores limitantes tais como a vibração das varetas e fadiga de materiais, não foram considerados nessas simulações.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O código computacional resultado deste trabalho possibilita diversas análises e trabalhos futuros. Podem ser citados:

- Análise de limite de projeto para diferentes composições de combustível.
- Análise de limite de projeto para outros perfis de distribuição de potência.
- Análise de limite de projeto para diferentes medidas de varetas (diâmetro, espessura, gap e altura).
- Utilização de outras correlações para avaliação de propriedades físicas do combustível, do gap e do revestimento.
- Utilização de diferentes correlações para o cálculo de DNBR.

Com modificações em subrotinas do código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” e com a utilização de outros códigos auxiliares é possível fazer um estudo da distribuição de temperatura nas pastilhas combustível a partir de características da neutrônica de um reator PWR. Esse estudo pode perceber numericamente a relação entre as características da neutrônica do reator e a distribuição de potência do mesmo bem como relacionar essas variáveis com os limites térmicos do reator.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, H. M. C. **O método de Elementos finitos aplicado a análise de estruturas fundamentais**. Universidade Estadual do Maranhão. 2005.

BOTELHO, D. A; MOREIRA, M. L. **NBSNRC: Uma Rotina Rápida Para Cálculo Das Propriedades Da Água**. Rio de Janeiro: IEN, 1990.

BUONGIORNO, J. **Notes on Two-Phase Flow, Boiling Heat Transfer, And Boiling Crises in PWRs and BWRs**. MIT - Department of Nuclear Science and Engineering, 2010

DEUDERSTADT, J. J; HAMILTON, L. J. **Nuclear Reactor Analysis**. Toronto: John Wiley & sons. 1976.

EL-WAKIL, M.M. . **Nuclear Heat Transport**. NY: International Textbook Company, 1971.

GALLETI, M. R. **Análise Termo-Hidráulica de Núcleos de Reatores PWR em Condições Transientes**. Tese. Rio de Janeiro: UFRJ, 1984.

GOMES, S.S. e PAULUCCI, L. H. **Design Limit DNBR Calculation for ANGRA1 Nuclear Power Plant Using RTDP Methodology and 16x16 Standard Fuel Assembly**. 2011.

**Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC** disponível em [www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2004/WEO2004.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2004/WEO2004.pdf) pp.329 acessado em 29 de abril de 2011.

JOHNSON, Claes. **Numerical Solutions of Partial Differential Equations by the Finite Element Method**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

JUNIOR, J. C. A. G. **Cálculo da Distribuição de Temperatura Em Varetas Combustíveis : Estudo do Efeito da Excentricidade no Posicionamento das Pastilhas de UO<sub>2</sub>**. Dissertação. Rio de Janeiro: IEN, 2010.

NIJSING, R. **Temperature and heat flux distribution in nuclear fuel element rods.** Amsterdam: Nuclear engineering and design 4, p. 1-20, 1966.

NUREG/CR-6150, Vol. 4, Rev. 2 "**SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 Code Manual: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis**". 2001.

PERROTTA, J. A. **Curso De Introdução À Engenharia Do Núcleo De Reatores.** Rio de Janeiro: Apostila ,1999.

RIBEIRO, L. B. **Introdução ao Método de Elementos Finitos - Notas de aula.** Rio de Janeiro: Programa de Engenharia Civil, COPPE / UFRJ. 2004.

SAMPAIO, P.A.B. **Heat\_Transfer\_2d\_cg.f90.** Rio de Janeiro: IEN, 2007.

SILVA, A. T. **O Futuro Da Energia Nuclear.** REVISTA USP, São Paulo, n.76, p. 34-43, dezembro/fevereiro 2007-2008

TODREAS, N. E; KAZIMI, M. S. **Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals.** New York: Taylor & Francis, 1993.

TONG, L.S.; WEISMAN, J. **Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors;** American Nuclear Society; 1979.

## APÊNDICE 1: Arquivo de saída do código VARETA\_COMBUSTÍVEL

```

=====
PROPRIEDADES FÍSICAS CONSTANTES - NÃO DEPENDENTES DA TEMPERATURA
=====
-----
RESULTADO #1: LIMITE DE TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL ALCANÇADO
-----
--VALORES DE REFERÊNCIA--

Tmax_limite_fuel(°C)=                1735.30000
PARAMK=                              .00000

--RESULTADOS DO PROGRAMA--

Q3LMAX(W/m3)=                        588482217.25376
PARAMA=                              588482217.25376
Tmax_fuel_otimizado(°C)=            1735.30000
Tmax_clad_ext(°C)=                  340.98919
Tmax_clad(°C)=                      383.57986
<<NÃO HÁ OCORRÊNCIA DE DNB>> DNBR=    2.92453
q2l_local(W/m2)=                    1041303.79706
q2l_crit(W/m2)=                     3045326.68159
ipoin_temp_max_fuel=                1129
iplan_temp_max_fuel=                 1846
cota z onde ocorre temp_max_fuel(mm)= 15.00000
ipoin_temp_max_clad_ext=             2943
iplan_temp_max_clad_ext=             2477
cota z onde ocorre temp_max_clad_ext( mm) 646.00000
tbulk_saída(°C)=                    323.92012
=====
PROPRIEDADES FÍSICAS CONSTANTES - NÃO DEPENDENTES DA TEMPERATURA
=====
-----
RESULTADO #2: LIMITE DE DNBR ALCANÇADO
-----
--VALORES DE REFERÊNCIA--

DNBR_limite=                        1.30000
PARAMK=                              .00000

--RESULTADOS DO PROGRAMA--

Q3LMAX(W/m3)=                        1323122132.74290
PARAMA=                              1323122132.74290
Tmax_fuel_otimizado(°C)=            3544.55370
Tmax_clad_ext(°C)=                  409.63569
Tmax_clad=(°C)                      505.39502
<<HÁ OCORRÊNCIA DE DNB>> DNBR=    1.30074
q2l_local(W/m2)=                    2341229.79489
q2l_crit(W/m2)=                     3045326.68159
ipoin_temp_max_fuel=                1129
iplan_temp_max_fuel=                 1846
cota z onde ocorre temp_max_fuel(mm)= 15.00000
ipoin_temp_max_clad_ext=             2943
iplan_temp_max_clad_ext=             2477
cota z onde ocorre temp_max_clad_ext(mm) 646.00000
tbulk_saída(°C)=                    371.25823
-----
RESULTADO FINAL(TODAS AS LIMITAÇÕES CONTEMPLADAS) = RESULTADO #1
A temperatura máxima do combustível é o fator limitante do projeto
-----
ELAPSED TIME:      5629.00 seconds

```

## APÊNDICE 2: CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO COMBUSTÍVEL

Para o cálculo da condutividade térmica do combustível dependente da temperatura a relação usada no código “VARETA\_COMBUSTIVEL” foi a equação A3-1 apresentada por Todreas e Kazimi (1993, p. 301) e aplicado o fator de densidade teórica de 95% às equações A3-2 e A3-3. Segundo os autores, essa relação é usada pela companhia Westinghouse, fabricante da usina brasileira Angra I.

$$k_{TD} = \frac{1}{11,8 + 0,0238T} + 8,775 \cdot 10^{-13} \cdot T^3 \quad (\text{eq. 3-1})$$

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_{TD}} \quad (\text{eq. 3-2})$$

$$k = (1 - P^{\frac{2}{3}})k_{TD} \quad (\text{eq. 3-3})$$

Onde:

$k_{TD}$  = condutividade térmica teórica em  $W / cm^{\circ}C$

$T$  = temperatura em  $^{\circ}C$

$P$  = parâmetro

$$\frac{\rho}{\rho_{TD}} = \frac{\text{densidade}}{\text{densidade teórica}}$$

$k$  = condutividade térmica em  $W / cm^{\circ}C$

### APÊNDICE 3: CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO REVESTIMENTO

Para o cálculo da condutividade térmica do revestimento dependente da temperatura a relação usada foi a apresentada no código MATPRO (NUREG, 2001, p. 4-17). Segundo esse código, a condutividade térmica de uma liga metálica é primeiramente função da temperatura. No entanto, fatores secundários tais como orientação cristalina e o nível de stress do material também podem influenciar a condutividade térmica, porém, nesse contexto, por ser muito pequena essa influência pode ser desprezada. Considerando apenas a dependência da temperatura, a condutividade térmica do revestimento constituído de zircaloy-4 observa a equação:

$$k = 7,51 + 2,09 \cdot 10^{-2} \cdot (T + 273) - 1,45 \cdot 10^{-5} \cdot (T + 273)^2 + 7,67 \cdot 10^{-9} \cdot (T + 273)^3 \quad (\text{eq. 3-4})$$

Onde

$k$  = condutividade térmica em  $W / m^{\circ}C$

$T$  = temperatura em  $^{\circ}C$

O gráfico 3-2 foi apresentada no código MATPRO (NUREG, 2001, p 4-16) e expõe dados de condutividade térmica usando o método de mínimos quadrados para interpolação.

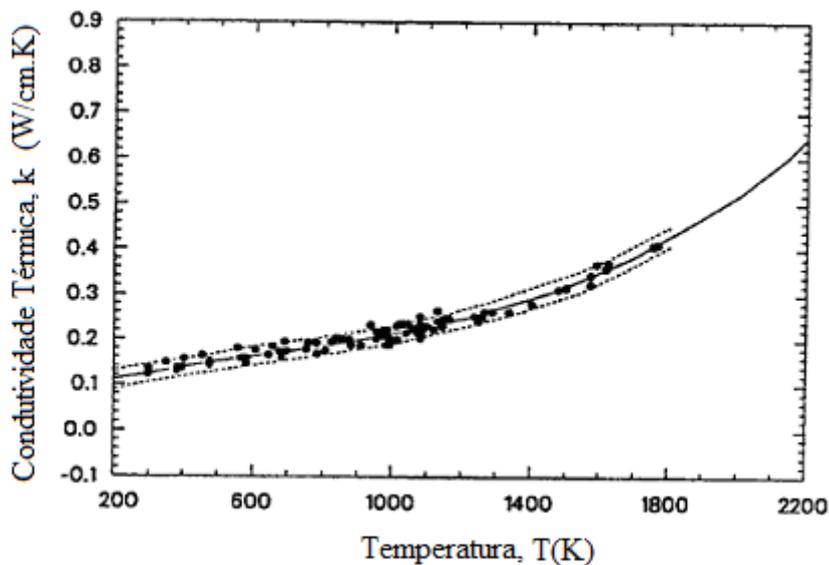


Gráfico 3-2: Gráfico experimental da Condutividade Térmica em função da Temperatura (NUREG, 2001, p. 4-16)

#### APÊNDICE 4: CONDUTÂNCIA DO GAP

Para o cálculo da condutividade térmica do gap a relação usada foi a apresentada no código MATPRO (NUREG, 2001, p 12-2). Embora esse código use três funções para atender às diversas necessidades analíticas para a condutividade térmica do gás, o código “VARETA\_COMBUSTÍVEL” utiliza apenas uma equação por considerar a existência apenas do gás hélio no gap. Isso se justifica, segundo Perrotta (1999), porque as varetas combustíveis são inicialmente preenchidas internamente com gás hélio de forma a melhorar a transferência de calor das pastilhas para o revestimento (e deste para o refrigerante) já que existe uma folga entre a pastilha combustível e o revestimento. Esta folga serve para acomodar as expansões diferenciais entre pastilha e revestimento ao longo de irradiação.

A correlação utilizada foi:

$$K = A.(T + 273)^B \quad (\text{eq. 3-5})$$

Onde

$K$  = condutância térmica em  $W / m^{\circ}C$

$T$  = temperatura em  $^{\circ}C$

As constantes A e B usadas na equação anterior foram extraídas da tabela 3-3.

Gas	A	B
He	$2.639 \times 10^{-3}$	0.7085
Ar	$2.986 \times 10^{-4}$	0.7224
Kr	$8.247 \times 10^{-5}$	0.8363
Xe	$4.351 \times 10^{-5}$	0.8616
H <sub>2</sub>	$1.097 \times 10^{-3}$	0.8785
N <sub>2</sub>	$5.314 \times 10^{-4}$	0.6898
O <sub>2</sub>	$1.853 \times 10^{-4}$	0.8729
CO	$1.403 \times 10^{-4}$	0.9090

Tabela 3-3: Constantes usadas em correlações de gás de condutividade térmica. MATPRO (NUREG, 2001, p. 12-2)

## APÊNDICE 5: O NÚMERO DE NUSSOLT

O código “VARETA\_COMBUSTIVEL” usa a equação apresentada por Todreas e Kazimi (1993, p. 443) para o cálculo do Número de Nusselt. Para os autores, essa equação, conhecida como equação de Dittus-Boelter é a correlação mais universalmente utilizada.

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (\text{eq. 3-6})$$

Onde:

$Re = \text{Número de Reynolds}$

$Pr = \text{Número de Prandtl}$

Os números de Reynolds e Prandtl são apresentados nas equações 3-7 e 3-8 respectivamente.

$$Re = \frac{\dot{m} \cdot D_h}{\mu_{\text{agua}} \cdot A_{\text{canal}}} \quad (\text{eq. 3-7})$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{\text{agua}}} \quad (\text{eq. 3-8})$$

Onde:

$\mu = \text{viscosidade dinâmica}$

$C_p = \text{calor específico à pressão constante}$

$\dot{m} = \text{vazão mássica do fluido refrigerante}$

$D_h = \text{diâmetro hidráulico equivalente}$

$A_{\text{canal}} = \text{área do canal refrigerante}$

$\mu_{\text{água}} = \text{viscosidade dinâmica da água}$

$k_{\text{água}} = \text{condutividade térmica da água}$