AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento e simulação de um programa computacional para cálculos
neutrônicos e termo-hidráulicos do reator de pesquisas IEA-R1**

Davi Pavis Parro

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

**Orientador:
Prof. Dr. Thadeu das Neves Conti**

**São Paulo
2018**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento e simulação de um programa computacional para cálculos
neutrônicos e termo-hidráulicos do reator de pesquisas IEA-R1**

Davi Pavis Parro

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

Orientador:
Prof. Dr. Thadeu das Neves Conti

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2018

Fonte de Financiamento: CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

PAVIS PARRO, D. . ***Desenvolvimento e simulação de um programa computacional para cálculos neutrônicos e termo-hidráulicos do reator de pesquisas IEA-R1***. 2018. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pavis Parro, Davi
Desenvolvimento e simulação de um programa computacional
para cálculos neutrônicos e termo-hidráulicos do reator de
pesquisas IEA-R1 / Davi Pavis Parro; orientador Thadeu das
Neves Conti. -- São Paulo, 2018.
63 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

1. Neutrônica. 2. Termohidráulica. 3. Programa. 4.
Reatores. I. das Neves Conti, Thadeu , orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

À COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN pelo apoio financeiro

A meu orientador, Professor Dr. Thadeu das Neves Conti, pelo zelo e pela atenção ao meu trabalho.

Ao Professor Dr. Valdemir Gutierrez pela inestimável ajuda e pela paciência.

Ao Professor Tuffic Madi Filho pela ajuda e pelos apontamentos.

Ao IPEN pela estrutura e suporte.

À minha família pelo carinho e apoio incondicional.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO.....	15
3 JUSTIFICATIVA.....	16
4 DELIMITADORES.....	17
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
6.1 Ambiente de criação do programa.....	22
6.2 Sequência executada pelo programa.....	24
6.3 Característica dos códigos utilizados.....	27
6.3.1 2DB.....	27
6.3.2 Citation.....	28
6.3.3 COBRA.....	28
6.3.4 Dens.....	29
6.3.5 Leopard.....	29
7 RESULTADOS.....	30
7.1 Interface gráfica.....	31
7.2 Simulação.....	33

7.2.1 Operação do Programa.....	33
7.2.2 Parâmetros de Operação.....	38
8 CONCLUSÕES.....	43
9 TRABALHOS FUTUROS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXO 1 – CÓDIGO UTILIZADO EM PYTHON.....	49
ANEXO 2 – MANUAL DE USUÁRIO PARA INTERFACE GERENCIADORA...60	

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 6.1.1 - Aparência do compilador de Python.....	22
Figura 6.1.2 - Esquema de programação de Python.....	23
Figura 6.1.3 - Exemplo de interface gráfica criada com Python.....	23
Figura 6.1.4 - Diretório do MsDos de execução de programas.....	24
Figura 6.2.1 - Exemplo de configuração do núcleo do reator.....	25
Figura 6.2.2 - Diagrama de cálculo neutrônico.....	26
Figura 6.2.3 - Ciclo do procedimento de cálculo do reator IEA-R1.....	27
Figura 7.1.1 - Interface gerada para Windows.....	31
Figura 7.2.1.1 – Abertura do Diretório.....	34
Figura 7.2.1.2 – Abertura do arquivo de entradas do código 2db.....	35
Figura 7.2.1.3 – Abertura do MsDos para execução dos programas.....	36
Figura 7.2.1.4 – Abertura do arquivo de saída do 2db.....	37
Figura 7.2.1.5 – Verificação dos dados importantes da saída do programa 2db.....	38
Figura 7.2.2.1 – Distribuição do fluxo de nêutrons no núcleo do reator.....	39
Figura 7.2.2.2 – Reatividade do elemento com o tempo de operação.....	40

Figura 7.2.2.3 – Temperatura do encamisamento pela posição.....	41
Figura 7.2.2.4 – Temperatura do centro do elemento pela posição.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.3.1 – Códigos utilizados pelo reator.....	29
--	----

LISTA DE SIGLAS

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

SUS – Serviço Único de Saúde

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

CTR – Centro de Tecnologia das Radiações

CEN – Centro de Engenharia Nuclear

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CENA – Centro de Energia Nuclear da Agricultura

CRPq – Centro Reator de Pesquisas

BNCT - Barion Neutron Capture Therapy

RESUMO

A motivação deste trabalho vem da necessidade de agilizar, de maneira segura, o processo dos cálculos neutrônicos e termo-hidráulicos durante a realização da mudança de configuração do reator nuclear de pesquisas IEA-R1. A metodologia de cálculo existente envolve a execução de vários programas computacionais e códigos nucleares nas áreas de física de reatores e termo-hidráulica. Para tanto, foi elaborado uma plataforma de gerenciamento que conjuga os cálculos dos programas já consagrados (“Two Db”, “Leopard”, “Citation”, “Dens” e “Cobra”) numa única ferramenta computacional.

A principal contribuição deste trabalho é a concepção de uma interface que simplificará a rotina de cálculos executados no reator IEA-R1, tendo um aspecto didático e uma aparência mais amigável e moderna.

DESCRITORES: Reatores, Neutrônica, Termo-hidráulica, Programa.

ABSTRACT

The motivation for this work comes from the need for the process of neutronic and thermo-hydraulic calculation to become faster, in a safe way, during the configuration change of the research nuclear reactor IEA-R1. The current calculation methodology requires the execution of several softwares and nuclear codes in the areas of Reactor Physics and Thermo-Hydraulic. Therefore, a software was elaborated, which will combine the calculation mentioned in a single computational tool.

The main contribution of this work is the creation of an interface that makes the IEA-R1 research reactor execution calculation routine simpler, having didactic aspects and a more friendly and modern appearance.

KEY WORDS: Reactors, Neutronic, Thermo-Hydraulic, Software.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por energia elétrica no mundo, a busca por fontes de energia que produzam menor impacto ambiental, que sejam seguras, e que sejam autossustentáveis, fez com que a energia nuclear voltasse, desde o início deste século, a ser vista como uma valiosa opção que se enquadra nas exigências atuais. Tal fato tem impulsionado a construção de usinas nucleares, principalmente nos países mais desenvolvidos do mundo. O Brasil está entre os trinta e um países do mundo que possuem usinas nucleares em atividade e, encontra-se hoje, com sua terceira usina em fase de construção, Angra 3, sendo que o Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro aponta ainda a necessidade da construção de pelo menos mais quatro usinas até 2030, com capacidade de 1000 MW cada uma [1].

Dada a importância que a energia nuclear ocupa no Brasil e no mundo, é extremamente importante e estratégico que o país tenha capacidade de trabalhar com esta fonte de energia. É fundamental que haja pesquisa na área nuclear para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do uso de sua energia, bem como regulação na atividade oriunda da exploração econômica deste singular recurso que é a energia nuclear.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), criada em 1956 com o objetivo de desenvolver a política de energia nuclear no Brasil. Sendo um órgão superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, a CNEN estabelece normas e regulamentos no que tange à radioproteção e é responsável por regular, licenciar, e fiscalizar a produção e o uso de energia nuclear no Brasil.

A CNEN também investe em pesquisa e desenvolvimento, buscando um uso cada vez mais amplo e seguro das técnicas do setor nuclear, e seu foco é garantir os benefícios da energia nuclear a um número cada vez maior de brasileiros, sempre com segurança na operação dos materiais e equipamentos radioativos [2].

O setor de medicina nuclear do País, cujos procedimentos para diagnóstico ou terapia utilizam radiofármacos, conta com 432 serviços de medicina nuclear

(SMN) distribuídos por todo o território brasileiro. Os radiofármacos fornecidos pela CNEN propiciam a realização de aproximadamente um milhão e meio de procedimentos de medicina nuclear por ano, sendo que aproximadamente 30% contam com cobertura do Sistema Único de Saúde (SUS).

O portfólio de produtos da CNEN conta atualmente com 38 (trinta e oito) radiofármacos fornecidos para a área médica, sendo classificados da seguinte forma: gerador de tecnécio; radioisótopos primários; substâncias marcadas com iodo-123, iodo-131, cromo-51, flúor-18, samário-153, índio-111 e lutécio-177; reagentes liofilizados para marcação com Tc-99m [2].

A principal unidade produtora da CNEN é o IPEN, localizado em São Paulo, que produz atualmente 38 diferentes radiofármacos, incluindo o flúor FDG-18F, além de ser o único produtor de Geradores de Tecnécio-99m no país. O IEN, localizado no Rio de Janeiro, produz o FDG-18F, iodo-123 ultra-puro e metaiodobenzilguanidina marcada com iodo-123; o CDTN, em Belo Horizonte, produz o FDG-18F e Na18F; e o CRCN-NE, em Recife, produz somente o FDG-18F. Além desses, o IPEN fornece fios de irídio-192 e sementes de iodo-125, ambos utilizados em tratamentos oncológicos, por meio de procedimentos de braquiterapia [2].

O CTR, órgão do IPEN, é pioneiro nas atividades voltadas para aplicações da tecnologia das radiações no país e possui um histórico de realizações importantes, nos mais diversos seguimentos das indústrias, da saúde e do meio ambiente. O dinamismo em desenvolver novas tecnologias associadas aos avanços de outras áreas é uma das características da aplicação das radiações e radioisótopos. Tradicionalmente, o Centro de Tecnologia das Radiações - CTR vem acompanhando essa tendência, tornando-se referência na inovação de aplicações da tecnologia nuclear, com alto impacto no futuro da agricultura, saúde, indústria e na preservação do meio ambiente. As atividades de pesquisa e os investimentos realizados no CTR revertem na produção de conhecimento científico, formação de recursos humanos, transferência de tecnologia e geração de produtos e serviços para a sociedade brasileira.

As atividades de pesquisa e desenvolvimento utilizando as tecnologias das radiações e radioisótopos estão voltadas aos clientes dos mais diversos

seguimentos: indústrias químicas, petroquímicas, de embalagens, farmacêuticas, automobilísticas, alimentícias, agrícola, mecânica pesada, saneamento básico, além das universidades, instituições de pesquisa, clínicas e hospitais. Hoje, o CTR tem posição de destaque no país, dando suporte à comunidade local na utilização da radiação e de radioisótopos para diversas aplicações [3].

O Centro do Reator Nuclear de Pesquisa (CRPq), órgão do IPEN, gira ao redor da operação e utilização do reator nuclear IEA-R1. Neste centro de pesquisa é realizada pesquisa científica de excelência e credibilidade nas áreas de Física Nuclear Experimental e da Matéria Condensada, bem como de Análise por Ativação Neutrônica. Além disto, o CRPq também presta serviços de irradiação com nêutrons, produção e calibração de fontes radioativas e análises por ativação neutrônica [3].

O reator IEA-R1 é do tipo piscina, com combustível tipo placa, moderado e refrigerado a água leve, utilizando grafite e berílio como refletores. Foi projetado e construído pela empresa norteamericana “Babcock & Wilcox”, em 1956, e sua primeira criticalidade ocorreu em 16 de setembro de 1957. A partir de 1993, o reator tem funcionado por ciclos de 64 horas contínuas semanais, em potências que variam entre 2 e 5 MW, num arranjo de vinte e quatro elementos combustíveis, todos fabricados no próprio instituto, prestando serviço a inúmeros clientes internos e externos ao IPEN [4].

Dentre os principais clientes internos do reator nuclear IEA-R1 encontram-se: o Centro de Radiofarmácia - CR que produz radioisótopos como o iodo 137, o samário 153 e os geradores de molibdênio; o Centro de Engenharia Nuclear - CEN que utiliza radiação para teste de materiais e fluxo de nêutrons para uso em BNCT; o próprio Centro do Reator de Pesquisas - CRPq em pesquisas básicas e aplicadas nas áreas de radioquímica e física nuclear. Os principais clientes externos são: Centro de Energia Nuclear na Agricultura - o CENA que se utiliza do reator para fazer irradiações de amostras biológicas e geológicas; Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF que utiliza o reator para pesquisas gerais em física, a Universidade de Campinas - Unicamp em medidas cronológicas de diversos materiais; o Instituto de Geociências da USP na datação de rochas sedimentares; a CETESB, etc [3].

Para que o reator possa atender toda essa demanda é necessário fazer a troca de alguns elementos combustíveis, com altas queimas, por elementos combustíveis novos ou com queimas mais baixas, com uma frequência que varia de acordo com a potência de operação do reator.

Essa mudança de configuração dos elementos combustíveis do núcleo do reator é calculada baseada em uma metodologia desenvolvida pela divisão de física de reatores do Centro de Engenharia Nuclear. Antes de ser feita tal mudança, a nova configuração é simulada, ou seja, os parâmetros de operação do reator são previstos por simulação computacional para verificar se sua operação atende pré-requisitos de segurança e desempenho. A metodologia de cálculo desenvolvida emprega a execução de maneira sequencial de vários códigos e programas computacionais, nas áreas de física de reatores e termo-hidráulica, de tal maneira que no final dos cálculos alguns critérios devem ser respeitados, para que a nova configuração calculada possa ser aprovada.

Os programas que são utilizados nas mudanças de configuração são: “Two Db”, “Leopard”, “Citation”, “Dens”, “Cobra”. O Two Db (ou 2DB) é utilizado no cálculo do histórico de potência do reator em duas dimensões. O “Citation” modela o núcleo do reator para determinar a criticalidade, o fluxo de nêutrons e a densidade de potência [5]. O programa “Leopard” é o gerador da seção de choque de materiais físséis. O programa “Dens” gera um perfil axial de potência e o programa “Cobra” calcula o perfil de temperatura ao longo do reator e parâmetros termo-hidráulicos de suma importância.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi a elaboração de um programa computacional, que visa fazer o gerenciamento e a automatização do uso dos vários códigos e programas computacionais utilizados nos cálculos de neutrônica e termo-hidráulica, referentes às mudanças de configuração dos elementos combustíveis do reator nuclear de pesquisa IEA-R1, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN.

Além do gerenciamento dos códigos utilizados, o programa tem também uma finalidade didática, ou seja, visa facilitar o aprendizado da rotina de cálculos por novos integrantes do CRPq – Centro Reator de Pesquisas - do IPEN/CNEN.

3. JUSTIFICATIVA

A motivação deste trabalho advém da necessidade de facilitar e agilizar a rotina de cálculos inerentes às mudanças de configuração do reator IEA-R1, bem como de verificar a eficácia da nova interface gerada.

É de grande valia para o Instituto que novos funcionários que vierem a ter contato com o reator tenham uma ferramenta para aprendizado. Este trabalho é apresentado como uma forma, além de tornar a utilização da rotina mais fácil, tornar o seu aprendizado mais fluido.

Neste trabalho, o programa computacional concebido compila todos os outros já utilizados numa única plataforma que automatize a rotina. Vale lembrar que os programas já utilizados, ou seja, “Two Db”, “Leopard”, “Citation”, “Dens” e “Cobra” são programas consagrados, adquiridos por cientistas brasileiros da área nuclear de outros centros de pesquisa no exterior, e que possuem autorização governamental para serem utilizados no reator IEA-R1. Desta forma, como os aspectos construtivos do reator não preveem mudanças em curto prazo, é de valia que a rotina utilizada atualmente seja modernizada e trabalhada de forma mais didática, para que se possa difundir o conhecimento de seu manuseio.

4. DELIMITADORES

Este tópico traz as limitações do trabalho, listadas a seguir, que delimitam o seu campo de atuação. Devido a certas incompatibilidades, o trabalho teve seu campo de atuação reduzido, e, portanto, foram adotadas hipóteses simplificadoras.

- Programas antigos: os códigos nucleares utilizados na mudança de configuração do reator IEA-R1 foram concebidos em meados da década de 1970;
- Dificuldade de atualização: conforme a tecnologia se aprimora, os programas antigos vão perdendo seu espaço. Com a aquisição de novos computadores por parte do IPEN, os programas tornaram-se incompatíveis com processadores mais modernos;
- Linguagem antiga: os códigos nucleares utilizados como sub-rotinas são programas escritos em linguagem Fortran. Tal linguagem sofreu muitas atualizações desde que os programas foram concebidos e não foi viável obter um compilador que depurasse a linguagem utilizada nos programas, e que gerasse um aplicativo executável, o que teria tornado o trabalho mais fácil e também teria aumentado o campo de atuação;
- Dificuldade inerente a licenças: A Comissão Nacional de Energia Nuclear preza pela máxima segurança na operação dos reatores nucleares em todo o Brasil. Desta forma, o presente trabalho precisou se ater aos códigos nucleares citados anteriormente, que são antigos;
- Incompatibilidade com computadores comerciais modernos: os aplicativos executáveis dos códigos nucleares aqui utilizados foram projetados para a

década de 1970. Isso gerou dificuldades e tornou necessário o conhecimento de algumas operações no MsDos, do Windows, sistema operacional obsoleto atualmente;

- Hipótese de que não se alteram os materiais não físséis do reator: da metodologia aplicada para os cálculos neutrônicos e termohidráulicos, descrita adiante neste trabalho, deve-se assumir a hipótese de que as regiões do reator que são compostas por materiais não físséis, tanto no núcleo quanto na periferia, têm sua composição constante e inalterada. Tal hipótese é razoável, uma vez que muito dificilmente os elementos não físséis do reator são modificados, salvo em caso de manutenção e reformas. A última modificação de elementos não físséis na configuração do reator foi há 15 anos.
- Para o cálculo de grandezas inerentes às regiões de elementos não físséis do reator, utiliza-se um código denominado Hammer. Entretanto, não é disponibilizada pelo instituto uma versão compatível com hardwares modernos. Isto se deve ao fato de que não há arquivos executáveis deste código compilados em computadores que não são antigos, o que tornou incompatível sua utilização na plataforma gerenciadora deste trabalho e, tendo em vista a hipótese descrita no item anterior, é corroborada sua dispensa de constar da proposta deste trabalho.
- Os códigos utilizados e os executáveis devem estar salvos em uma mesma pasta no computador. Isso ocorre porque tais códigos fazem uso de bibliotecas e outras sub rotinas que, para que os códigos possam operar, devem estar salvas no mesmo diretório, dentro do computador.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são citadas obras que compõem as referências bibliográficas deste trabalho e servem de guia para a condução do trabalho. Tais obras delimitam o campo de atuação para a conclusão da tese e consubstanciam os pareceres de aspecto teórico aferidos no presente trabalho.

Domingos [5] desenvolve cálculos neutrônicos, termohidráulicos e de segurança para avaliar a segurança operacional de um dispositivo de irradiação de miniplacas a ser colocado no núcleo do reator IEA-R1 do IPEN/CNEN. De acordo com Domingos, o programa computacional 2DB foi desenvolvido em 1969 pelo “Pacific Northwest Laboratories” em conjunto com o “Los Alamos Scientific Laboratory” e trata da solução da equação de difusão de nêutrons em duas dimensões e vários grupos de energia. Sendo um código bidimensional, as utilidades do 2DB incluem:

- Calcular a queima do combustível;
- Calcular a criticalidade;
- Calcular a distribuição de fluxo para uma fonte arbitrária qualquer.

Domingos [5] relata, ainda, que, em 1969, foi publicada a primeira versão do programa computacional CITATION desenvolvida para resolver problemas envolvendo a representação por diferenças finitas da teoria da difusão em três dimensões do espaço. O CITATION pode resolver os seguintes problemas:

- Problema de depleção do combustível;
- Gerenciamento do combustível para análise multiciclo;
- Resultados de perturbação de primeira ordem que podem ser obtidos fornecendo dados macroscópicos e concentrações de núclídeos;
- Problemas estatísticos e resultados de perturbações obtidos com dados macroscópicos.

A referência [3] é uma das bases e motivações da realização do presente trabalho. Entretanto, [3] preocupa-se apenas com a automatização da sequência de programas a serem usados como sub-rotinas. Já o presente trabalho tem objetivo semelhante, porém acrescido da preocupação em dar ao programa computacional uma interface autoexplicativa para o usuário.

Santiago [1] apresenta um modelo termohidráulico para realimentação do cálculo de seções de choque neutrônicas em reatores PWR. Em códigos neutrônicos, tem-se obrigatoriamente um módulo de realimentação termohidráulica. Tal módulo de realimentação calcula a temperatura do combustível que alimenta as seções de choque neutrônicas. No simulador neutrônico presente no PEN/COPPE/UFRJ, a temperatura é obtida através de um modelo empírico e analiticamente, através do modelo desenvolvido por Santiago.

De acordo com Santiago [1], o código neutrônico COBRA é um código termohidráulico que tem como saídas o perfil de densidade da água ao longo de seu comprimento e o perfil de temperatura do elemento combustível ao longo de uma distribuição axial.

Nishiyama [7] desenvolve cálculos neutrônicos e termohidráulicos para avaliar a segurança operacional de um dispositivo para a produção de ^{99}Mo a ser irradiado no núcleo do reator IEA-R1. Sendo assim, também utiliza o programa CITATION no tangente aos cálculos neutrônicos.

Em [8] é apresentada uma metodologia de cálculo de fração efetiva de nêutrons atrasados e do tempo de geração dos nêutrons prontos. Tal metodologia é baseada na biblioteca de dados nucleares ENDF/B-IV, presente no programa CITATION.

Em [9] apresenta-se uma modelagem preliminar para o núcleo do reator IEA-R1 com um código não utilizado neste trabalho, o RELAP5. Entretanto a distribuição de potência é fornecida pelo CITATION. A modelagem é validada através de comparação com o código computacional COBRA utilizado neste trabalho (não se limitando a esse último), também utilizado na elaboração do capítulo de análise de acidentes do Relatório de Análise de Segurança (RAS).

Umbehaun [10] expõe uma metodologia para análise termo-hidráulica de reatores de pesquisa tipo piscina com combustível tipo placa MTR (“Material Test Reactor”). Para esta metodologia, foram desenvolvidos um programa computacional para cálculo da distribuição de vazão no núcleo do reator e um modelo que permite fazer análises termo-hidráulicas do núcleo do reator em regime permanente. Tal modelo foi aplicado e testado no reator IEA-R1 e sua eficácia foi comprovada quando confrontada com os resultados fornecidos pelo código COBRA.

De Granzotto [11], pode-se obter uma importante explicação da serventia dos códigos nucleares utilizados nesta dissertação. A obra contém a compilação dos resumos de todos os códigos nucleares disponíveis no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, dentre os quais estão três códigos que fazem parte da rotina computacional (Citation, COBRA, e Leopard).

Little e Hardie [12] disponibilizam o manual de usuário de código nuclear 2DB, o qual é um dos programas acionados na sequência de cálculos realizada acerca do reator IEA-R1. Convém ressaltar que o 2DB é o primeiro programa acionado e que tem função semelhante ao Citation. Como o Citation fornece dados de saída semelhantes ao 2DB, porém executados em modelo tridimensional (ao passo que o 2DB utiliza um modelo bidimensional), a equipe de cálculo utiliza o Citation de forma subsidiária, pois o 2DB fornece resultados satisfatórios com uma menor solicitação computacional (menor quantidade de memória exigida), e requerendo menor complexidade e menor tempo gasto.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 AMBIENTE DE CRIAÇÃO DO PROGRAMA

Dentre várias opções de programas de interface visual disponíveis no mercado, foi constatado que a plataforma Python pode ser obtida gratuitamente. Também foram encontrados diversos tutoriais em bibliografia disponível na internet, o que fez com que a familiarização com sua linguagem fosse lograda em tempo hábil para a conclusão deste trabalho.

Python é uma linguagem de programação de altíssimo nível (VHLL – *Very High Level Language*), criada pelo holandês Guido Van Rossum sob o ideal de “Programação de Computadores para todos”. Este ideal fez com que esta linguagem fosse trilhada pela liberdade, disponibilidade e pela clareza de sintaxe, ou seja, Python é uma linguagem de programação que possui compiladores gratuitos, de fácil acesso na internet, os programas executáveis nessa linguagem podem ser rodados em diversos sistemas operacionais e tal linguagem possui singular produtividade [13]. Seu ambiente de programação é exposto na figura 6.1.1 a abaixo.

Figura 6.1.1 - Aparência do compilador de Python (Fonte própria)

A programação em alto nível, não se restringindo à linguagem Python, pode ter seu procedimento esquematizado conforme a figura 6.1.2 a seguir.

Figura 6.1.2 - Esquema de programação de Python [14]

O código fonte foi escrito no trabalho em questão para desenvolver a interface gráfica que gerencia os códigos previamente utilizados no reator IEA-R1. As ferramentas fundamentais do Python que possibilitaram este trabalho foram a manipulação de arquivos, a capacidade de vasculhar o sistema operacional do computador e a capacidade de produzir um executável que possua uma interface gráfica. Na etapa de familiarização com a linguagem, foi verificado que a ferramenta intrínseca ao Python que melhor atendia ao objetivo pretendido era a biblioteca Tkinter, da qual foi lançado mão para que a interface final fosse concebida.

A figura 6.1.3 a seguir revela um exemplo de interface gráfica que, obviamente, foi alterado para atender aos requisitos do projeto.

Figura 6.1.3 - Exemplo de interface gráfica criada com Python (Fonte própria)

Uma das principais dificuldades deste projeto foi o fato de os códigos nucleares inseridos no programa computacional concebido serem antigos. Os mesmos foram projetados para serem rodados na plataforma MsDos, o que é um

impecilho muito grande nos dias atuais, uma vez que são incompatíveis com as versões mais novas dos sistemas operacionais comercialmente mais populares.

Convém ressaltar que a dificuldade com relação à compatibilidade do programa em computadores modernos foi exclusivamente causada pelo tempo decorrido da aquisição de tais códigos, não sendo esta dificuldade tangente à programação em Python.

A figura 6.1.4 a seguir ilustra a plataforma do MsDos, para a qual os códigos foram projetados.

Figura 6.1.4 - Diretório do MsDos de execução de programas(Fonte própria)

6.2 SEQUÊNCIA EXECUTADA PELO PROGRAMA

Os cálculos inerentes ao reator IEA-R1 são cálculos neutrônicos e termohidráulicos. No caso desta dissertação, a situação mais interessante que justifica a execução do projeto é a mudança de configuração do reator. Esta referida configuração consiste na disposição espacial dos elementos combustíveis dentro do núcleo do reator. A mudança de configuração é necessária para manutenção da potência à qual opera o reator e para testes de irradiação em outros elementos.

A figura 6.2.1 a seguir ilustra um exemplo de diagrama que representa uma possível configuração do reator, tratando-se da representação esquemática do corte de sua vista superior. Convém ressaltar que o reator tem sua configuração trocada regularmente.

Figura 6.2.1 - Exemplo de configuração do núcleo do reator [6]

Tendo sido fixadas as posições dos elementos combustíveis, porcentagem de queima e posição das barras de controle de irradiação, aplica-se a metodologia esquematizada na figura 6.2.2 a seguir para se obter os parâmetros de

funcionamento do reator. Tais parâmetros são avaliados para pesquisa em testes de irradiação e para segurança de operação.

Figura 6.2.2 – Diagrama de cálculo neutrônico [15]

Pode-se observar que os códigos têm bibliotecas anexas que devem estar salvas no diretório onde serão executados. É também importante salientar que, após fixada a configuração do reator, a saída do programa usado primeiro é a entrada do

programa subsequente. Desta forma, o processo é pré-determinado e já consagrado como explícito no trabalho de Stefani [15].

Convém mostrar de forma gráfica o procedimento, que é periódico, a ser executado pelo usuário da interface. Vale ressaltar que o procedimento é adequado aos fatores delimitadores descritos no capítulo 4 deste trabalho, ou seja, não está inserido na rotina o código Hammer devido à incompatibilidade já descrita e seu uso pouco frequente. Da execução dos programas na ordem descrita abaixo, extraem-se seus dados de saída que simulam as condições de operação.

Figura 6.2.3 – Ciclo do procedimento de cálculo do reator IEA-R1 (Fonte própria).

6.3 CARACTERÍSTICA DOS CÓDIGOS UTILIZADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as características de cada um dos códigos utilizados na interface gerenciadora. Será citada a utilidade de cada um deles, conforme extraída da bibliografia disponível.

6.3.1 2DB

O 2DB é um código bidimensional (X-Y, R-z, R- θ , Triangular) para uso em criticalidade rápida em reatores e análise de queima do elemento combustível. Tal código pode fornecer:

- Coeficiente de Criticalidade efetivo;
- Performance sob flambagem;
- Tempo de absorção;
- Composição do reator;
- Fluxo de Nêutrons, conforme as dimensões do reator;
- Queima do material;

Sua programação é compilada em FORTRAN – IV, de acordo com [12].

6.3.2 Citation

O Citation é projetado para monitorar a exaustão do núcleo do reator, bem como seus problemas dinâmicos num senso geral. Este programa resolve problemas de coeficiente de criticalidade em uma, duas ou três dimensões, através da aproximação por diferenças finitas da teoria da difusão do transporte de nêutrons [16]. Pode fornecer como dados de saída, parâmetros semelhantes aos do 2DB, todavia, levando mais tempo para realizar seus cálculos, uma vez que nos mesmos são consideradas três dimensões. Sua programação é feita em FORTRAN IV.

6.3.3 COBRA

Este código calcula a entalpia e queda de pressão, em condições de regime permanente e transiente, nos subcanais dos conjuntos de barras dos elementos combustíveis do núcleo do reator, tanto quando ocorre evaporação quanto quando a mesma não ocorre. O código utiliza um modelo matemático que leva em consideração efeitos de turbulência. Uma opção de modelo termo-hidráulico é disponível para calcular a distribuição de temperatura do elemento combustível em direção radial como função da densidade de potência e transferência de calor. Sua programação encontra-se em FORTRAN IV [17]. O código possui variações,

inclusas na rotina utilizada no trabalho, que calculam a temperatura de “encamisamento” do elemento combustível. [18].

6.3.4 DENS

O DENS é um código que, de posse do “k-efetivo” e do fluxo de nêutrons, obtidos pelo 2DB ou Citation, calcula a densidade de potência axial, isto é, ao longo do elemento combustível. Esta referida densidade é um parâmetro fundamental para o correto uso do código COBRA. Sua programação está em FORTRAN IV.

6.3.5 Leopard

Este programa é de singular importância para os cálculos do reator. Tal código calcula a seção de choque de elementos físséis. Com a necessidade de se verificar o resultado da irradiação sob um determinado tipo de material, a seção de choque é previamente testada com o Leopard. De acordo com Granzotto [19], conforme citado por Barry [20], o Leopard é uma homogeneização de uma célula unitária, e um gerador de espectro. Sua programação está escrita em FORTRAN II.

A tabela abaixo traz as informações e características mais importantes dos programas de forma simplificada e esquematizada.

Tabela 6.3.1 – Códigos utilizados pelo reator (Fonte própria)

2DB	Coeficiente de Criticalidade Efetivo; Performance sob flambagem; Fluxo de Nêutrons; Queima do combustível (bidimensional)
Citation	Idem 2DB (tridimensional)
COBRA	Entalpia e queda de pressão
DENS	Densidade de potência axial
Leopard	Seção de choque dos elementos físséis

7. RESULTADOS

7.1 INTERFACE GRÁFICA

Tendo sido assimilada a linguagem Python de programação, a mesma foi utilizada para desenvolver o programa gerenciador o qual é descrito e objetivado no capítulo 2 desta dissertação, que é o objetivo deste trabalho. O programa utiliza dos códigos já consagrados e utilizados corriqueiramente pelo grupo de cálculo do reator IEA-R1, descritos no item 6.3 desta dissertação. A interface, quando executado o programa gerenciador, é exposta na figura 7.1.1 a seguir.

Figura 7.1.1 - Interface gerada para Windows. (Fonte própria)

Antes de ser iniciada a pesquisa para decidir qual a plataforma na qual seria programada tal interface, que viria a ser decidida a ser Python ao longo do tempo de execução do trabalho, foi idealizado que a interface tivesse um aspecto didático. Foi intrínseco ao objetivo que a interface fosse de fácil aprendizado para um eventual novo usuário.

Dessa forma, com o programa gerenciador concebido, é possível que o procedimento de cálculo dos parâmetros de funcionamento do reator, e todas as etapas ao mesmo inerentes, seja mais facilmente ensinado a eventuais novos integrantes do grupo de cálculo do reator IEA-R1.

Pode-se observar que o layout da interface faz com que o procedimento torne-se autoexplicativo, ou seja, basta o novo usuário seguir os passos (que podem ser lidos na ordem dos botões), que poder-se-ão extrair os parâmetros de funcionamento do reator, os quais devem ser lidos e confrontados com a literatura disponível sobre os valores de segurança para o funcionamento do reator.

Convém lembrar que, como visto na interface, há um manual de funcionamento para a interface, que tem seu conteúdo integralmente transcrito no Anexo 2. Tal manual expõe cada passo que o usuário deve tomar para que torne ainda mais fácil a execução do programa gerenciador.

Devido a delimitadores descritos no capítulo 4, o programa ainda requer que o usuário acione os códigos nucleares com comandos típicos do sistema operacional do MsDos, devido à antiguidade dos códigos já explicada neste trabalho. Também devido a delimitadores descritos no capítulo 4, todos os códigos que a interface gerencia devem estar salvos no mesmo diretório. Entretanto, como mecanismo de funcionamento da linguagem Python, os programas devem estar salvos, pelo menos, no computador no qual são simulados tais códigos.

7.2 SIMULAÇÃO

7.2.1 Operação do Programa

Convém enfatizar que, no contexto desta dissertação, o objetivo em função do qual foi desenvolvido o programa gerenciador é, principalmente, o aspecto visual da interface. Os códigos nucleares utilizados são consagrados e licenciados. Desta forma, é de seguro conhecimento que os cálculos por eles elaborados são previamente validados, portanto, confiáveis. Embora não constituam o foco principal, os parâmetros de funcionamento do reator são, sim, objeto de atenção deste trabalho.

Todavia, é objetivo principal da dissertação verificar o funcionamento do programa gerenciador, ou seja, se os resultados obtidos através do uso da interface gerenciadora são congruentes com os obtidos pelos meios antigos, que valem-se exclusivamente do seu acionamento por comandos não gráficos.

Uma das características mais importantes de tal interface é sua capacidade de agilizar a manipulação das entradas e extração dos dados mais importantes das saídas, tornando-a mais didática e auto explicável. Conforme a execução segundo o manual já mencionado, previsto no Anexo 2, podem-se verificar os seguintes resultados.

Com a interface obtida e exposta na figura 7.1.1, ao dar um clique único com o botão esquerdo do mouse no botão 0 – Diretório M-Htg – o programa irá abrir a pasta que contém toda a biblioteca inerente aos programas usados nos cálculos. O simples clique gera a abertura da pasta conforme figura 7.2.1.1 a seguir.

Figura 7.2.1.1 – Abertura do Diretório. (Fonte própria).

Essa é a primeira janela que é aberta. Então, deve-se apagar o arquivo TWODB30.BIN, para fins de correta inserção de dados de entrada. Feito isso, o primeiro programa a ser utilizado é o 2db. Sabendo do fato que operador sabe operá-lo, basta um clique simples no botão 1 – Input 2DB – que a interface abrirá o programa de entradas do código 2db, conforme a figura 7.2.1.2 a seguir.

Figura 7.2.1.2 – Abertura do arquivo de entradas do código 2db. (Fonte própria).

Assumindo como verdade o fato de que é requisito para o operador ter afinidade com código 2db, o operador deve manipular o arquivo aberto (que pode ser manipulado exatamente como qualquer arquivo na aplicação Bloco de Notas do Windows) e inserir os devidos dados de entrada.

Como os códigos são antigos e limitados pelas hipóteses indicadas no capítulo 4, o operador deverá salvar e fechar o arquivo aberto. Após isso, deverá com um clique simples no botão 2 – Executar 2db. A janela do prompt de comando do MsDos abrirá conforme exposto na figura 7.2.1.3 a seguir

Figura 7.2.1.3 – Abertura do MsDos para execução de programas.(Fonte própria).

À abertura do MsDos, o operador deverá executar o código digitando conforme indicado no manual: “twodb <input_twodb.dat> output_twodb.out”.

Com esse comando que não foi possível suprimir devido a problemas de incompatibilidade dos códigos, automaticamente será gerado (ou simplesmente atualizado dentro do diretório) o arquivo “output_twodb.out”. O qual pode ser aberto com um simples clique no botão 3 – Output 2db – conforme exposto a seguir na figura 7.2.1.4.

Figura 7.2.1.4 – Abertura do arquivo de saída do 2db. (Fonte própria).

Após executado o 2db, pode-se facilmente extrair os dados necessários de sua saída clicando no botão 15 – Dados fornecidos 2db – o qual fornecerá os dados necessários em tela do programa Python. A figura 7.2.1.5 a seguir ilustra tal fato.

Figura 7.2.1.5 – Verificação dos dados importantes da saída do programa 2db. (Fonte Própria).

Vale ressaltar que o programa 2db (ou Citation, se for requerida análise tridimensional) é o primeiro a ser executado na medida em que sua entrada é composta pela disposição geométrica, ou seja, pelo posicionamento dos elementos no núcleo do reator, além das respectivas composições químicas e das porcentagens de queima corrente. A saída do 2db consubstancia os dados necessários para os outros programas.

Esse procedimento se repete de forma semelhante para todos os demais códigos e é consideravelmente mais rápido, simples, amigável e didático do que o método antigo, o que atende os objetivos propostos para esta dissertação.

7.2.2 Parâmetros de Operação

Foram simulados os códigos intrínsecos à rotina para verificar os parâmetros de operação do reator IEA-R1. Convém ressaltar que os parâmetros obtidos, ora

pela metodologia antiga, ora pelo programa gerenciador fruto deste trabalho, serão idênticos. É verificado aqui que a plataforma gera resultados coerentes com as medidas experimentais, sendo estritamente fiel à antiga metodologia, já consagrada.

Neste tópico são expostos gráficos inerentes à operação do reator. A figura 7.2.2.1 a seguir mostra o fluxo de neutros na seção transversal média do núcleo do reator. O gráfico foi extraído dos dados de saída do código 2db.

Figura 7.2.2.1 – Distribuição do fluxo de nêutrons no núcleo do reator. (Fonte própria).

Do gráfico acima, pode-se aferir que o fluxo de nêutrons é maior no núcleo, que vai da faixa de 36 a 86 cm, como era de se esperar. O fluxo nas bordas é muito pequeno, aumenta na faixa dos elementos refletores, e atinge seu ápice no centro.

Na figura 7.2.2.2 a seguir, é plotado o gráfico de reatividade do elemento combustível.

Figura 7.2.2.2 – Reatividade do elemento com o tempo de operação. (Fonte própria).

Do gráfico plotado acima, é possível concluir que a reatividade do reator IEA-R1 tem um comportamento cíclico. Com o passar do tempo e com a operação, a reação química que ocorre no núcleo do reator tem como sub produto o elemento Xenônio. Tal elemento é um inibidor pois tem propriedade de captura de nêutrons, dificultando a irradiação.

Conforme o gráfico da figura 7.2.2.2, é nítido que quanto maior a reatividade de Xenônio, menor a do reator. As linhas vermelha (reatividade do reator) e azul (reatividade do Xenônio) apresentam comportamento razoavelmente enantiomórfico.

As figuras 7.2.2.3 e 7.2.2.4 a seguir representam gráficos plotados com os dados de saída do código COBRA. São gráficos da temperatura em função da posição (altura) do elemento combustível.

Figura 7.2.2.3 – Temperatura do Encamisamento pela posição. (Fonte própria).

Figura 7.2.2.4 – Temperatura no centro do elemento pela posição. (Fonte própria).

Os dois gráficos representam a temperatura na parte mais externa do elemento combustível, denominada encamisamento, e na parte central do elemento combustível, respectivamente.

Pode-se aferir que a temperatura nos dois casos é maior na parte central do elemento, a uma altura de aproximadamente 44 polegadas, uma vez que o fluxo de incidente de nêutrons é maior na região central do elemento. Também vale lembrar que os dois gráficos são muito parecidos uma vez que o encamisamento do elemento combustível possui alta condutividade térmica, aumentando a taxa de calor e fazendo com que ambas as temperaturas sejam muito próximas, sendo muito ligeiramente superior a temperatura central.

8. CONCLUSÕES

Do exposto até aqui, pode-se concluir que, apesar de condições delimitadoras descritas anteriormente neste trabalho, o objetivo foi concluído, e o programa computacional concebido é eficaz em gerenciar o uso dos códigos computacionais previamente utilizados no reator de pesquisas IEA-R1. Conforme descrito anteriormente, a interface é mais moderna e autoexplicativa, o que pode facilitar o trabalho de um usuário que, eventualmente, não tenha experiência.

Devido aos delimitadores, o campo de atuação do programa é restrito, ou seja, há incompatibilidade entre os programas desenvolvidos à época da geração dos códigos computacionais utilizados no reator e os computadores comerciais utilizados para serem realizados os cálculos dos seus parâmetros de operação. Por isso, mesmo que o programa de gerenciamento tenha uma interface moderna, ainda não é possível que o gerenciamento seja feito livre de comandos no MsDos.

É possível aferir também que, conforme exposto anteriormente, as simulações do programa mostram resultados plenamente satisfatórios, isto é, os resultados obtidos pelos códigos computacionais são condizentes com as medições realizadas no reator. Os parâmetros obtidos por via computacional estão suficientemente próximos dos obtidos empiricamente.

É importante ratificar que os parâmetros de funcionamento obtidos com a interface gerada em Python serão idênticos aos obtidos com a metodologia atualmente utilizada. Isso ocorre porque os programas utilizados são exatamente os mesmos. Conforme é proposto no capítulo que trata dos objetivos deste trabalho, visou-se promover modificação na interface, a qual foi concebida e testada. Os códigos e seus dados de entrada são exatamente os mesmos, sendo previsível, portanto, que os parâmetros obtidos fossem idênticos aos obtidos com a metodologia antiga.

9. TRABALHOS FUTUROS

O objetivo deste trabalho foi cumprido e, a partir das conclusões extraídas, pode-se visualizar melhorias e aprimoramentos, que, todavia, extrapolariam o tempo para a execução desta dissertação além de seu objetivo. Assim são apresentadas, neste tópico, proposições para trabalhos futuros que agreguem conhecimento científico ao acervo no qual serão depositadas suas dissertações e teses, bem como para aprofundar ainda mais o campo de pesquisa sobre o reator.

Pode-se idealizar como trabalho futuro uma dissertação cujo objetivo seja exibir a queima de cada elemento combustível em 3 dimensões. Para tanto, seria necessário um código muito mais moderno que os utilizados no reator IEA-R1, todavia seria uma das funções que atualmente tem seus resultados vistos por tabela (um documento com extensão “txt”, aberto no bloco de notas). Há outros códigos nucleares que executam essa função, neste contexto executada por 2db e Citation, disponíveis por outros centros de pesquisa como o Argonne National Laboratory [18].

É também possível elaborar um trabalho no qual calculem-se os perfis de temperatura, hoje calculados pelo COBRA, de forma tridimensional. Uma visão gráfica pode ser concebida, descrevendo mais minuciosamente o que hoje é transcrito em uma tabela, num arquivo de extensão “txt”.

Outra possível contribuição que pode ser feita é um trabalho que pormenorize o fluxo de nêutrons. O fluxo de nêutrons é de suma importância para os cálculos realizados no reator, e tem influência direta na queima e na distribuição da temperatura do elemento combustível. Um trabalho que possibilitasse ver de forma tridimensional, o que hoje é visto em formato de texto, seria um avanço de singular contribuição.

Obviamente, tal trabalho demandaria um esforço muito grande, uma vez que o fluxo de nêutrons no núcleo de um reator nuclear é algo complexo. Todavia, tal trabalho poderia ainda ser subdividido. Dentre muitas etapas no qual estaria dividido, os diferentes níveis de complexidade poderiam ser distribuídos entre trabalhos de iniciação científica, mestrado e doutorado.

Ainda na questão de trabalhos futuros, seria de grande valia também um trabalho sob o aspecto qualitativo do reator, isto é, um trabalho que avaliasse o impacto de referido reator na comunidade acadêmica. O reator IEA-R1 produz muitos produtos de valor econômico. Visto isso, seria interessante um futuro trabalho que avaliasse rendimento econômico que o mesmo proporciona e avaliar seus impactos qualitativos na sociedade, bem como a relação entre o custo de sua manutenção e o rendimento econômico gerado.

Referências Bibliográficas

- [1] Santiago, D. M. N. Modelo Termohidráulico para realimentação do Cálculo de Seções de Choque Neutrônicas em Reatores PWR. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [2] <http://www.cnem.gov.br/quem-somos> acessado em 21/01/2017
- [3] Stefani, G. L. de; Conti, T. N. das; INTERNATIONAL NUCLEAR ATOMIC CONFERENCE – INAC, 2009, Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ipen.br/biblioteca/2009/inac/15244.pdf>. Acesso em 03/04/17.
- [4] https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=729 acessado em 20/01/2017
- [5] Domingos, D. B. Cálculos Neutrônicos, Termo-hidráulicos e de Segurança de um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM) de Elementos Combustíveis Tipo Dispersão. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [6] Filho, W. R., “Relatório de mudança de configuração do reator IEA-R1 nº 258”, CRPq/IPEN/CNEN, São Paulo-SP. Dezembro de 2017.
- [7] Nishiyama, P. J. B. de O. Análises Neutrônica e Termohidráulica de um Dispositivo para Irradiação de Alvos Tipo Leu de UAlx-Al para a Produção de ⁹⁹Mono Reator IEA-R1. 2012. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [8] Yamaguchi, M.; Santos A. dos; Encontro Nacional de Física de Reatores - ENFIR, 1995, Águas de Lindóia. Disponível em <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/19100/05894.PDF?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 03/04/17
- [9] Rocha, R. T. V. da; Andrade, D. A. de; Sabundjian, G.; Junior, A. B.; Umbehain, P. E.; Torres, W. M.; INTERNATIONAL NUCLEAR ATOMIC CONFERENCE – INAC,

2005, Santos-SP. Disponível em
<<https://www.ipen.br/biblioteca/2005/inac/10697.pdf>>. Acesso em 03/04/17.

[10] Umbehaun, P. E. Metodologia para Análise Termo-Hidráulica de Reatores de Pesquisa tipo Piscina com Combustível tipo Placa. 2000. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[11] Granzotto, A. Gouvêa, A. S. de. Lourenção, E. M. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. “Compilação dos códigos nucleares disponíveis no CPD/IPEN” .Universidade de São Paulo. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Centro de Processamento de Dados. São Paulo, Março de 1981.

[12] Little, W. W., Jr.; Hardie, R. W., “2DB user’s manual – revision I”, BNWL – 831 REV.I, Batelle Pacific Northwest Laboratory, 1969.

[13] Labaki, J. Introdução a Python. Ilha Solteira, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho – UNESP, 2004.

[14] http://rodrigor.dcx.ufpb.br/_media/disciplinas/introprog/19939680-aprendacomputaocompython3k.pdf acessado em 09/04/17

[15] Stefani, G. L.; Conti, T. N. “Projeto da automatização dos programas e dos códigos computacionais utilizados na metodologia de cálculo neutrônico e termo-hidráulico do reator nuclear IEA-R1” – Relatório Final de Atividades/FAPESP Processo 2009/02992-5, 2010 (Outra Produção Técnica)

[16] Fowler, T. B.; Vondy, D. R.; Cunningham, C. W. “Nuclear reactor core analysis code: Citation”. Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory, Rev.- 2. Julho de 1971.

[17] Rowe, D. S. “COBRA-3C: a digital computer program for steady-state and transient thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements”. Richland, WA, Batelle-Northwest, Março de 1973.

[18] Marr, W. W. “COBRA 3M – a digital computer code for analysing termal-hydraulic behavior in pin bundles”. Argonne, ILL. Argonne National Laboratory, Março de 1975.

[19] Granzotto, A. Gouvêa, A. S. de. Lourenção, E. M. Instituto de Energia Atômica – IEA. “Compilação dos códigos nucleares disponíveis no CPD/IEA” .Universidade de São Paulo. Instituto de Energia Atômica – IEA. Centro de Processamento de Dados. São Paulo, Março de 1979.

[20] Barry, R. F. “LEOPARD: a Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code for the IBM 7094”, Pittsburgh, PA, Westinghouse Electric Corp., Setembro de 1963.

ANEXO 1 – CÓDIGO UTILIZADO EM PYTHON

```
import math
```

```
import os
```

```
import sys
```

```
from tkinter import *
```

```
def bc1():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\input_twodb.dat')
```

```
def bc2():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Testes  
Bat\Programas\AEP')
```

```
def bc3():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\output_twodb.out')
```

```
def bc4():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\input_citation.dat')
```

```
def bc5():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\FORT.51')
```

```
def bc6():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg')
```

```
def bc7():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\input_cobra.dat')
```

```
def bc8():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg')
```

```
def bc9():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\output_cobra.out')
```

```
def bc10():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\input_leopard.leo')
```

```
def bc11():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Testes  
Bat\Programas\AEP')
```

```
def bc12():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\output_leopard.out')
```

```
def bc13():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg')
```

```
def bc14():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Testes  
Bat\Programas\AEP')
```

```
def bc15():
```

```
    a = open('saidatwodb.out', 'r');
```

```
    b = a.readlines();
```

```
a.close;

""" numero da linha no arquivo menos 1 """

print('Dados 2db \n')

print(b[3806])

print(b[3840])


def bc16():

    c = open('FORT.51', 'r');

    d = c.readlines();

    c.close;

    """ numero da linha no arquivo menos 1 """

    print('Dados Citation \n')

    print(d[229544])


def bc17():

    e = open('cbout.out', 'r');

    f = e.readlines();

    e.close;

    """ numero da linha no arquivo menos 1 """

    print('Dados COBRA \n')

    print(f[557])
```

```
def bc18():  
  
    g = open('DENS.out', 'r');  
  
    h = g.readlines();  
  
    g.close;  
  
    """ numero da linha no arquivo menos 1 """  
  
    print('Dados DENS \n')  
  
    print(h[3])
```

```
def bc19():  
  
    i = open('output_leopard_teste.out', 'r');  
  
    j = i.readlines();  
  
    i.close;  
  
    """ numero da linha no arquivo menos 1 """  
  
    print('Dados Leopard \n')  
  
    print(j[2])
```

```
def bc20():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Manual_Interface.pdf')
```

```
def bc21():
```

```
    os.startfile('c:Users\Davi\Desktop\IPEN\Mestrado\Projeto\Área de Cálculo\Pub-  
Usuário\AEP\M-Htg\DENS.out')
```

```
janelaum = Tk()
```

```
lb1 = Label(janelaum, text = "IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e  
Nucleares")
```

```
lb1.place(x = 150, y = 25)
```

```
lb2 = Label(janelaum, text = "Mestrado em Tecnologia Nuclear Reatores - TNR")
```

```
lb2.place(x = 150, y = 50)
```

```
lb3 = Label(janelaum, text = "Orientador: Prof. Dr. Thadeu das Neves Conti")
```

```
lb3.place(x = 850, y = 25)
```

```
lb4 = Label(janelaum, text = "Aluno: Davi Pavis Parro")
```



```
lb4.place(x = 850, y = 50)
```

```
lb5 = Label(janelaum, text = "Programas para cálculos na mudança de configuração  
do Reator IEA-R1")
```

```
lb5.place(x = 450, y = 80)
```

```
lb6 = Label(janelaum, text = "Entrar no diretório M-Htg")
```

```
lb6.place(x = 100, y = 180)
```

```
lb9 = Label(janelaum, text = "Deletar o arquivo TWODB30.BIN")
```

```
lb9.place(x = 100, y = 200)
```

```
lb7 = Label(janelaum, text = "Entrar no diretório Dens")
```

```
lb7.place(x = 350, y = 255)
```

```
lb10 = Label(janelaum, text = "Apagar o arquivo DENS.out")
```

```
lb10.place(x = 350, y = 275)
```

```
lb11 = Label(janelaum, text = "Duplo clique no executável DENS_Be-R2")
```

```
lb11.place(x = 350, y = 295)
```

```
lb8 = Label(janelaum, text = "Entrar no diretório Cobra e executá-lo")
```

```
lb8.place(x = 350, y = 500)
```

```
bt1 = Button(janelaum, width=20, text="1 - Input 2DB", command=bc1)
```

```
bt1.place(x=100, y=300)
```

```
bt2 = Button(janelaum, width=20, text="2 - Executar 2DB", command=bc2)
```

```
bt2.place(x=100, y=350)
```

```
bt3 = Button(janelaum, width=20, text="3 - Output 2DB", command=bc3)
```

```
bt3.place(x=100, y=400)
```

```
bt4 = Button(janelaum, width=20, text="4 - Input Citation", command=bc4)
```

```
bt4.place(x=100, y=450)
```

```
bt5 = Button(janelaum, width=20, text="6 - Output Citation", command=bc5)
```

```
bt5.place(x=350, y=200)
```

```
bt6 = Button(janelaum, width=20, text="7 - Dens", command=bc6)
```

```
bt6.place(x=350, y=350)
```

```
bt7 = Button(janelaum, width=20, text="9 - input cobra", command=bc7)
```

```
bt7.place(x=350, y=450)
```

```
bt8 = Button(janelaum, width=20, text="10 - cobra", command=bc8)
```

```
bt8.place(x=600, y=200)
```

```
bt9 = Button(janelaum, width=20, text="11 - output cobra", command=bc9)
```

```
bt9.place(x=600, y=250)
```

```
bt10 = Button(janelaum, width=20, text="12 - input Leopard", command=bc10)
```

```
bt10.place(x=600, y=300)
```

```
bt11 = Button(janelaum, width=20, text="13 - Execução Leopard", command=bc11)
```

```
bt11.place(x=600, y=350)
```

```
bt12 = Button(janelaum, width=20, text="14 - output Leopard", command=bc12)
```

```
bt12.place(x=600, y=400)
```

```
bt13 = Button(janelaum, width=20, text="0 - diretório M-Htg", command=bc13)
```

```
bt13.place(x=100, y=250)
```

```
bt14 = Button(janelaum, width=20, text="5 - Executar Citation", command=bc14)
```

```
bt14.place(x=100, y=500)
```

```
bt15 = Button(janelaum, width=20, text="15 - Dados fornecidos 2DB",  
command=bc15)
```

```
bt15.place(x=600, y=450)
```

```
bt16 = Button(janelaum, width=26, text="16 - Dados fornecidos Citation",  
command=bc16)
```

```
bt16.place(x=600, y=500)
```

```
bt17 = Button(janelaum, width=26, text="17 - Dados fornecidos COBRA",  
command=bc17)
```

```
bt17.place(x=850, y=200)
```

```
bt18 = Button(janelaum, width=26, text="18 - Dados fornecidos DENS",  
command=bc18)
```

```
bt18.place(x=850, y=250)
```

```
bt19 = Button(janelaum, width=30, text="19 - Dados fornecidos Leopard",  
command=bc19)
```

```
bt19.place(x=850, y=300)
```

```
bt20 = Button(janelaum, width=50, text="Manual para execução dos Cálculos",  
command=bc20)
```

```
bt20.place(x=450, y=120)
```

```
bt21 = Button(janelaum, width=20, text="8 - output DENS", command=bc21)
```

```
bt21.place(x=350, y=400)
```

```
janelaum.geometry("1250x600+50+50")
```

```
janelaum.mainloop()
```

ANEXO 2 – MANUAL DE USUÁRIO DA INTERFACE GERENCIADORA**INSTITUTO DE PESQUISAS DE ENERGÉTICAS E NUCLEARES****MANUAL PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DO
REATOR DE PESQUISAS IEA-R1**

Este manual integra a dissertação de mestrado do aluno Davi Pavis Parro, sob orientação do Prof. Dr.

Thadeu das Neves Conti, como requisito para a obtenção do título de mestre em Tecnologia Nuclear
– Reatores.

São Paulo

2017

Este manual não é um documento técnico oficial. Ele é um arquivo que visa dar praticidade ao trabalho do calculista do reator de pesquisas IEA-R1. Consiste num roteiro a ser seguido na estrita ordem apresentada a seguir, para a execução de códigos computacionais pré-existentes utilizados nos cálculos realizados a cada troca de configuração dos elementos do núcleo do reator.

A interface contém todos os links dispostos em ordem. Para a obtenção dos parâmetros de funcionamento desejados, é fundamental que este manual seja seguido à risca.

As etapas a serem seguidas são apresentadas a seguir.

PASSOS:

- Clicar no botão 0 – diretório M-Htg e deletar o arquivo TWODB30.BIN;
- Clicar no botão 1 – Input 2DB e redefinir as condições para a situação a qual é requerida sua simulação;
- Clicar no botão 2 – Executar 2DB e digitar (em vermelho):

“Twodb <input_twodb.dat> output_twodb.out”;

- Clicar no botão – Output 2DB para ver a saída do 2db;
- Caso seja necessário aplicar o modelo em 3 dimensões, clicar no botão 4 – Input Citation e redefinir as condições de simulação;
- Clicar no botão 5 – Executar Citation e digitar (em vermelho):

“Citation <input_citation.dat> output_citation.out”;

- Clicar no botão 6 – Output Citation para ver a saída do Citation;
- Clicar no botão 7 – Dens;
- Entrar no diretório e deletar o arquivo DENS.OUT;
- Duplo clique no executável DENS_Be-R2. Isto gerará um saída atualizada do DENS;
- Clicar no botão 8 – Output DENS, e ver a saída do DENS;

- Clicar no botão 9 – Input COBRA, e modificar a entrada do programa COBRA, tendo como base o arquivo gerado como saída pelo DENS;
- Clicar no botão 10 – COBRA, e executá-lo com duplo clique no executável cbieaw(.exe);
- Clicar no botão 11 – Output COBRA para ver a saída do COBRA;
- Clicar no botão 12 – Input Leopard para modificar para a condição desejada a entrada do programa Leopard;
- Clicar no botão 13 – Execução Leopard e digitar o trecho em vermelho:

“Leopard <input_leopard.dat> output_leopard.out”;

- Clicar no Botão 14 – Output Leopard para ver a saída do Leopard;
- A partir daqui o usuário pode clicar em quaisquer dos botões de 15 a 19 (Dados Fornecidos) para obter as informações relevantes extraídas da execução de cada programa. Os resultados estarão expostos na janela de execução do prompt de comando e podem ser acionados a critério do usuário para consulta.