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

**Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de
pesquisa IPEN/MB-01**

MARCELO EDUARDO CASORLA

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

**Orientador:
Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha**

**São Paulo
2020**

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

**Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de
pesquisa IPEN/MB-01**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

MARCELO EDUARDO CASORLA

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

**Orientador:
Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha**

**São Paulo
2020**

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

Como citar:

CASORLA, M. E. . ***Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01***. 2020. 76 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (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)

Casorla, Marcelo Eduardo

Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01 / Marcelo Eduardo Casorla; orientador Marcelo da Silva Rocha. -- São Paulo, 2020.
76 p

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. Simuladores. 2. SCADA. 3. IPEN. 4. Operação. 5. OPC.
I. Rocha, Marcelo da Silva, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: MARCELO EDUARDO CASORLA

Título: Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01

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

Data: __/__/2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. : _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr. : _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr. : _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr. : _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos,

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pelo acesso as instalações do Reator de Pesquisa IPEN/MB-01 e todos os outros locais necessários para meus estudos e pesquisas;

Ao SENAI, pelo apoio durante todo o processo do mestrado no IPEN;

Ao Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha, pela orientação, dedicação e imprescindível apoio durante a construção e conclusão do trabalho;

Ao Prof. e Gerente do reator Dr. Ulysses Bitelli, pela orientação, sugestão do tema e apoio durante as etapas do trabalho;

E a toda equipe que integra o prédio de operação do IPEN/MB-01 e Engenharia (CEN).

RESUMO

CASORLA, M. E. ***Desenvolvimento de um simulador computacional para o reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01***, 2020. 76 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador computacional para o Reator Nuclear de Pesquisa IPEN/MB-01. O Simulador foi desenvolvido em plataforma SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), onde foram desenvolvidos modelos matemáticos e a configuração de interfaces gráficas em ambiente Windows. Será utilizada uma modelagem simplificada dos principais fenômenos físicos relacionados com a operação do reator e os sistemas de controle de reatividade, resfriamento e proteção do reator. O Simulador permite uma IHM (Interação Homem-Máquina) através de manipulação de variáveis dos sistemas e monitoramento de tendências das grandezas durante a operação do reator, mostrando-se uma ferramenta interativa para ensino, treinamento e reciclagem para profissionais no Reator Nuclear IPEN/MB-01, permitindo simulações das operações de partida, manobra de potência e parada.

Palavras-chave: Reator Nuclear, Simulação Computacional, SCADA.

ABSTRACT

CASORLA, M. E. ***Development of a computer simulator for the nuclear research reactor IPEN/MB-01***, 2020. 76p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

This work presents the development of a computer simulator for the IPEN / MB-01 Nuclear Research Reactor. The Simulator will be developed on a SCADA platform (Supervisory Control and Data Acquisition), where mathematical models and the configuration of graphical interfaces in Windows environment will be developed. A simplified modeling of the main physical phenomena related to the operation of the reactor and the reactivity control systems, cooling and reactor protection will be used. The Simulator allows an HMI (Human-Machine Interaction) by manipulating system variables and monitoring trends in quantities during the operation of the reactor, showing an interactive tool for teaching, training and recycling for professionals in the IPEN/MB-01 Nuclear Reactor, allowing simulations of the start, power and stop operations.

Keywords: Nuclear Reactor, Computational Simulation, SCADA.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação do trabalho	11
1.2 Modelagem de sistemas	12
1.3 Tipos de simuladores.....	12
2 CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES.....	18
2.1 Reatores Nucleares de Potência.....	18
2.2 Reatores de Pesquisa no País	19
2.3 Reatores de pesquisa para produção de radioisótopos	19
2.4 Reatores de pesquisa de potência zero	21
2.5 Reator de pesquisa IPEN/MB-01	22
2.5.1 Descrição do reator	23
2.5.2 Descrição dos experimentos	27
3 TREINAMENTO DE OPERADORES DE REATORES	30
4 SIMULADORES DE REATORES NUCLEARES	32
5 METODOLOGIA	39
5.1 Conceitos	43
5.1.1 Identificação de Sistemas	43
5.1.2 Modelagem Matemática	47
5.1.2.1 Validação do modelo	47
5.1.3 Identificação de Sistemas no Matlab	48
6 DESENVOLVIMENTO	52

6.1	Simulink	59
6.2	Indusoft	60
7	RESULTADOS	65
8	CONCLUSÃO	70
9	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ANSI – American National Standards Institute

ANS – American Nuclear Society

BPS – Princípio Básico Simuladores

CPU - Central Processing Unit

FSS – Full Scope Simulator

IAEA – International Atomic Energy Agency

**IPEN/MB – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares/Marinha
do Brasil**

IHM – Interface Homem Máquina

MDS – Modular Development System

NPA – Nuclear Plant Analyzer

NPP – Nuclear Power Plant

PSS – Partial Scope Simulator

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

TCS – Training Course Series

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do trabalho

Este trabalho tem como motivação a necessidade de desenvolvimento de um simulador computacional para o treinamento de estudantes e operadores de reatores, visando a formação de recursos humanos, pesquisa, inovação e desenvolvimento.

A operação de um reator nuclear depende de muita experiência dos profissionais envolvidos, bem como das situações dinâmicas do processo em si. Um simulador pode contribuir de forma progressiva o aprendizado ou correção dos procedimentos de operação ou intervenção no reator nuclear. Principalmente, devido aos acidentes graves ocorridos nos EUA, na ex-URSS e recentemente no Japão, os treinamentos e reciclagens dos operadores tem se intensificado juntamente com outras melhorias físicas, comportamentais e de emergência [1]. Com a popularização dos computadores se tornou viável o seu uso massificado e na década de 80 criou-se um padrão para simulação de reatores de potência chamado “ANSI/ANS-3-5” (American Nuclear Society, 1985) [2].

Até o presente momento, não há um *software* didático de auxílio ao uso do reator IPEN/MB-01 e vislumbrou-se uma possibilidade de utilização de um *software* SCADA para tal recurso, no qual hoje só executado *in loco* junto com operadores e todos os responsáveis pelo funcionamento do reator nuclear.

O desenvolvimento desse trabalho vem de encontro da necessidade exposta pela gerência de operação do reator IPEN/MB-01, de se desenvolver um simulador computacional adequado àquela instalação, com a finalidade de realizar cursos de treinamento e reciclagem de operadores de reatores para o IPEN, para a Eletronuclear, e para oficiais da Marinha do Brasil. Além disso, há a possibilidade de oferecer uma importante ferramenta para os cursos de graduação e pós-graduação em engenharia e tecnologia nuclear.

1.2 Modelagem de sistemas

A utilização de programas simuladores tem cada vez se tornado mais comum nas diferentes situações reais de trabalho. Há simuladores para previsão de tempo, para pilotagem de aviões, navios e automóveis. Esse uso de um modelo simulando situações reais nos fornece vantagens de previsibilidade e correção de problemas ou produtos. No âmbito educativo auxilia no treinamento, especialização, qualificação e reciclagem de recursos humanos para demandas de trabalho, que em nosso caso seria em ambientes nucleares. Em geral, os simuladores usados para tal, tem objetivo para o treinamento de pessoal com atuação geralmente nas seguintes áreas:

- Controle e operações da instalação.
- Análise de resposta de equipamentos e/ou falha de instrumentação.
- Instrumentação e controle dos processos na instalação.
- Monitoração do núcleo e proteção da radiação.
- Manutenção da instalação.
- Análise neutrônica.
- Análise de materiais irradiados estruturais do próprio sistema ou externos ao mesmo.

1.3 Tipos de simuladores

Segundo a IAEA (2001) no documento TCS-12 [3], que norteia o desenvolvimento de simuladores de reatores em 1968, a General Electric (GE) desenvolveu um sistema completo de simulador para o treinamento dos reatores americanos refrigerados a água leve. Nos dias atuais, ocorreram avanços significativos nas tecnologias dos computadores e também no desenvolvimento da tecnologia de simulação. Só como exemplo, um simulador ocupava um imenso

espaço físico e custava milhões de dólares. Nos dias de hoje os programas operam em CPU's (*Central Processing Unit*) de baixo custo, não alcançando valores de milhares de dólares. Ainda sobre a modelagem, a parte matemática era intensa e com poucas mudanças nas equações e alguns ajustes numéricos, consumindo muito trabalho das máquinas. Atualmente utiliza-se Modelos com Sistemas Modulares (MDS).

De modo geral, tem-se os seguintes passos para criação dos MDS's: Como primeiro passo define-se os componentes básicos a serem usados no processo (planta). Tais como válvulas, bombas, resfriamento, etc, modelando individualmente cada um deles com suas particularidades, tais como se as válvulas são do tipo *on/off* (digitais), ou do tipo de posição (analógicas). Logo a seguir tem-se a criação dos subsistemas, no qual cada bloco faz uma parte importante do processo para que se tenha um gerenciamento facilitado do todo. Como terceiro passo tem-se o desenvolvimento de cada algoritmo específico de cada subsistema criado, na sequência interligam-se os blocos usando algoritmos genéricos ou específicos, de acordo com a necessidade. Por fim, tem-se os testes de fidelidade (aferição) de cada subsistema, assegurando que satisfaça a representação real daquele subsistema em questão, bem como a integração entre os subsistemas. Na Figura 1 tem-se um fluxograma da construção de um MDS sugerido anteriormente.

Figura 1 – Reprodução do fluxograma de criação de MDS

Fonte: Adaptado de IAEA (2001)

Dando continuidade às referências sobre desenvolvimento de simuladores, o documento IAEA TECDOC-995 (1998) [4] orienta na seleção, especificação e desenvolvimento de simuladores de reatores nucleares, valorizando a importância do treinamento de pessoal da usina nuclear (NPPs) para operação normal ou em emergência. Aprimorando e reciclando operadores, engenheiros, gerentes e pessoal envolvido, não só com simuladores de escopo total. Muitas vezes tem-se a necessidade de treinamento mais específico, menos oneroso e eficaz, diante deste cenário tem-se, portanto, alguns tipos de simuladores e seu papel na formação do profissional [5, 6].

Simuladores de tarefas parciais, tem com o objetivo de treinamento específico de alguma operação ou fenômeno físico, melhorando o foco de treinamento em áreas especiais.

Simuladores de princípios básicos, demonstra os processos físicos fundamentais da operação da central nuclear. Tem como objetivo facilitar os formandos a compreender de um modo geral os processos fundamentais da usina como um todo.

Simuladores compactos são usados para treinamento de novos operadores ou pessoal que trabalha no controle. Mostrando a operação em uma forma mais generalizada. Geralmente o painel de controle expõe os parâmetros mais importantes.

Simuladores gráficos demonstram através de representação gráfica os parâmetros de controle e ambiente de operação, diminuindo custo.

Simuladores multifuncionais se enquadram em muitas tarefas como os compactos ou gráficos, porém se aproximam dos de escopo total.

E por fim tem-se os **analisadores de plantas** que tem como objetivo o foco em treinamento de transientes ou acidentes de um reator. Não, necessariamente, funciona em tempo real.

De um modo geral tem-se vários benefícios gerados com o uso de simuladores na formação de profissionais da área, tais como listado a seguir:

- Capacitação de treinamento em avarias, transitórios e acidentes.
- Diminuição de risco em equipamentos e pessoal envolvido.
- Repetibilidade de um cenário quantas vezes forem necessárias para o aprendizado.

- Testar empiricamente eventos em modo de treinamento, antes de vê-los como acontecem na operação.
- Capacidade de treinamento de eventos reais da planta.
- Custo/benefício para dominar objetivos no treinamento.
- Facilidade de treinamento quando ocorrem mudanças, ou alcançando novos objetivos de treinamento como pré-requisitos ou necessidades para novos cargos.
- Obter excelência em treinamento para tarefas cognitivas, aquisição e retenção de conhecimento sobre a operação de plantas.
- Proporcionam transição nos formandos no aprendizado inicial para as operações mais complexas da planta e treinamento da equipe que são feitos em simulador de escopo completo.
- Praticamente todo o pessoal envolvido pode receber treinamento dependendo da variedade de simuladores disponíveis.
- Pode ser realizado auto treinamento de forma eficaz nos simuladores projetados com esses propósitos em mente.
- Treinamento para engenharia e gerência que não precisam de familiarização com exibições e instrumentação da sala de controle, mas de uma compreensão dos processos e sistemas específicos da planta.
- Necessidade de reciclagem para o pessoal enfatizando a compreensão do trabalho em equipe e comportamento na sala de controle, realizado em simulador de escopo completo.
- Treinamento em um simulador econômico, devido a reduções no escopo e a complexidade de um de escopo completo (usado para tarefas separadas).
- Assegurar treinamento apropriado para dispositivos de simulação que não sejam executados no simulador de escopo total, apoiando a eficiência do treinamento e permitindo mais tempo no simulador de alcance total quando necessário.
- Minimizando a demanda no simulador de escopo total, permitindo melhor preparação por instrutores e melhor manutenção e modificações no mesmo.
- Fornecer simulação que vão além da capacidade da sala de controle quando necessário.

- Treinamento para averiguação de acidentes, mesmo para os além dos Acidentes Base de Projeto (*DBA – Design Bases Accident*).

Só como comparativo como pode-se observar na Figura 2, segundo o artigo “Nuclear Power Plant Simulators: Goals and Evolution” (2008) [7], do finlandês Jaakko Miettinen que, basicamente, existem quatro tipos de simuladores:

1. Simuladores de Escopo Total (FSS),
2. Princípio Básico Simuladores (BPS),
3. Simuladores de Escopo Parcial (PSS),
4. Analisadores de Usinas Nucleares (NPA).

O FSS é a réplica da sala de operações, sendo que o treinamento é para a equipe de operações e não individualmente. Já o BPS descreve as funções principais da planta ou subsistema (núcleo, turbina, alimentação, gerador), os PSS têm muitas variações, podendo diferenciar dos FSS com relação a quantidade de telas por exemplo. Já o NPA é um simulador que tem como objetivo análise precisa de algum subsistema (nêutrons, termohidráulica, automação e eletrônica). Na Figura 2 tem-se diversas aplicações, tipos e tarefas de simuladores existentes e seus respectivos nomes.

Figura 2 – Tipos, denominações e aplicações dos diversos simuladores.

Fonte: Adaptado de Thicket (2008)

2. CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES NUCLEARES

Resumidamente existem dois tipos de reatores nucleares, considerando-se as suas características de aplicações: os reatores nucleares de pesquisa e os reatores nucleares de potência.

2.1 Reatores Nucleares de Potência

Este tipo de reator nuclear é focado para a geração de energia elétrica e, atualmente, no mundo [8] tem-se cerca de 440 reatores nucleares em operação. No Brasil encontram-se em Angra dos Reis onde tem-se dois em funcionamento (Angra 1 e Angra 2) (Figura 3) [9] e um terceiro em construção, suprimindo uma terça parte do consumo elétrico do estado do Rio de Janeiro e três por cento do sistema elétrico nacional.

Figura 3 - Usina de Angra dos Reis

Fonte: Eletrobrás (2019).

2.2 Reatores de Pesquisa no País

No Brasil existem quatro reatores nucleares de pesquisa localizados nos institutos de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN): o reator Argonauta no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro; os reatores IEA-R1 e IPEN/MB-01, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN); e o reator TRIGA IPR-R1 no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte. No Plano de Ação de Ciência, Tecnologia e Inovação do Ministério da Ciência e Tecnologia, estão previstas ações visando o domínio industrial de todas as fases do ciclo do combustível nuclear, a conclusão do reator do LABGENE da Marinha, o submarino nuclear e o projeto, construção e comissionamento do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB).

Os reatores nucleares de pesquisa são instalações nucleares que se destinam a realização de pesquisa, treinamento, pesquisa com nêutrons, testes de materiais entre outras atividades correlatas. Geralmente são reatores de pequeno porte (até 100 MWt).

2.3 Reatores de pesquisa para produção de radioisótopos

Usado principalmente para a produção do molibdênio (^{99}Mo) onde seu decaimento radioativo gera o tecnécio utilizado em procedimentos de medicina nuclear de diagnóstico, principalmente em exames de cintilografia. Como este tipo de reator tem-se no Brasil um localizado no IPEN (SP) chamado IEA-R1 [10]. A Figura 4 mostra o edifício das suas instalações. Sendo do tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve, utilizando como refletores elementos de berílio e grafite. Criticalizado em setembro de 1957, pode operar até em potência máxima de 5 MW. Suas finalidades principais são de produção de radioisótopos para medicina nuclear, fontes radioativas para gamagrafia industrial, pesquisa em física nuclear, neutrongrafia e treinamento operacional de reatores.

Figura 4 - IEA-R1.

Fonte: Brasil Nuclear (2009).

O segundo é o reator Argonauta do IEN (RJ), mostrado na Figura 5. Operando desde 1965 tem como potência máxima de projeto em 0,5 kW. Tem como principais funções pesquisas neutrônicas nas áreas de física de reatores e nuclear, produção de radioisótopos (^{56}Mn , ^{140}La , ^{75}Se e ^{82}Br), traçadores industriais e meio ambiente e em treinamento [11].

Figura 5 – IEN – Argonauta

("http://carpedien.ien.gov.br/bitstream/ien/1084/2/10409.jpg"
<http://carpedien.ien.gov.br/bitstream/ien/1084/2/10409.jpg>)

Fonte: IEN (2020)

O terceiro é o reator TRIGA IPR-R1 do CDTN em Belo Horizonte (MG), cujo acrônimo significa treinamento, pesquisa, produção de radioisótopos, e General Atomic (seu fabricante) possui potência máxima de operação de 100 kW atingiu a primeira criticalidade em 1960. Instalado no antigo Instituto de Pesquisas

Radioativas (IPR), atual Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). O Reator TRIGA IPR-R1 foi o segundo reator nuclear instalado no país. Mesmo com o longo tempo de operação, seu combustível está pouco “queimado”, cerca de 4 % em média, operando por vários anos na realização de pesquisas e análises, na produção de radioisótopos e em treinamentos (Mesquita, 2010). Na Figura 6 mostra o poço e o núcleo do reator TRIGA IPR-R1, onde se pode ver a radiação de Cherenkov quando o reator está crítico [12].

Figura 6 – Núcleo do reator TRIGA IPR-R1

<http://www.cdtm.br/instalacoes-de-grande-porte/reator-triga-ipr-r1>

Fonte: CDTN (2020)

2.4 Reatores de pesquisa de potência zero

Como citado anteriormente, os quatro reatores de pesquisa nacionais, além de produzirem radioisótopos, também servem para estudo, treinamento, pesquisa e desenvolvimento (TRIGA), porém no IPEN existe um quarto reator que é objeto de estudo deste trabalho, o IPEN/MB-01 Figura 7 [13], que é chamado de reator de potência zero. Sua finalidade primária foi o estudo de propulsão naval,

sem fins de geração de potência, cujo valor de energia gerada não ultrapassam 100 W.

Figura 7 – Prédio do Reator IPEN/MB-01

Fonte: Ipen (2020)

2.5 Reator de pesquisa IPEN/MB-01

Objeto da pesquisa desenvolvida neste trabalho, o reator IPEN/MB-01 é um reator nuclear de tecnologia totalmente brasileira, concebido por colaboradores do IPEN e Marinha do Brasil. Este reator atingiu sua primeira criticalidade às 15 horas e 35 minutos do dia 9 de novembro de 1988, sendo oficialmente entregue para operação em 28 de novembro.

Seu projeto foi iniciado em 1983 e concluído em julho de 1988. Logo após iniciaram-se os testes de comissionamento dos seus vários sistemas. As exigências legais para o seu licenciamento foram concedidas pela CNEN em meados de outubro para sua operação inicial.

O reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de características nucleares reais, porém em escala reduzida, não havendo necessidade de um sistema de remoção de calor.

Estes tipos de reatores são conhecidos como reatores de potência zero, neste caso, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts. Esses reatores constituem uma ferramenta essencial, que permite aos pesquisadores estudá-lo por cálculos teóricos, com medidas experimentais, desempenho e as características de cada tipo de núcleo de um reator de potência ou de propulsão naval, antes da sua efetiva instalação.

O objetivo que norteou o projeto do reator IPEN/MB-01, foi de se projetar e testar um núcleo para uso em propulsão naval, onde o controle da reatividade do núcleo se dá na inserção ou retirada de barras de controle, diferentemente de outros núcleos de reatores de potência zero, em que o controle se dá pelo nível do moderador. Esse controle de reatividade por barras de controle é típico de reatores navais, que necessitam de rápidas variações de potência para realização de suas manobras operativas.

2.5.1 Descrição do reator

O primeiro núcleo do reator IPEN/MB-01 possuía forma retangular com dimensões ativas de (39 x 42 x 54,6) cm, com arranjo de 28 x 26 posições de varetas combustíveis e 48 tubos guias, destinados à inserção das varetas de controle e de segurança, responsáveis pelo controle da reação em cadeia e *scram* do reator [14]. Nesta configuração de núcleo, tem-se um total de 680 varetas combustíveis com um excesso de reatividade de aproximadamente 2400 pcm, A Figura 8 apresenta um diagrama das varetas.

Figura 8 - Diagrama Esquemático das Varetas de Combustíveis e de Controle.

Fonte: Ipen (2020).

As 680 varetas combustíveis são constituídas por tubos de aço inoxidável, contendo em seu interior 52 pastilhas combustíveis de dióxido de urânio (UO_2) enriquecidas a 4,3 %. A altura total da coluna de pastilhas é de 54,6 cm, sendo que cada pastilha possui uma altura de 1,05 cm e diâmetro de 0,849 cm. As extremidades vazias das varetas são preenchidas com pastilhas de Al_2O_3 . Os outros 48 tubos guias são para as varetas absorvedoras de nêutrons (barras de controle e de segurança) dispostos em 4 grupos contendo 12 varetas absorvedoras cada, sendo dois grupos de barras de segurança e dois grupos de barras de controle, cada um disposto em um quadrante do núcleo do reator, conforme disposição apresentada na Figura 9. Essas varetas absorvedoras de cada conjunto estão unidas em um corpo central, chamado aranha, que está ligado a uma haste de acionamento, conectada a eletro mecanismos acionados por magnetos.

A reatividade integral de cada barra de controle ou de segurança é suficiente para desligar o reator, pois contém aproximadamente 3200 pcm. As barras de segurança apresentam a mesma geometria das de controle, diferenciando-se pelo material absorvedor de nêutrons utilizado (B_4C). Durante a operação do reator, são mantidas totalmente retiradas do núcleo ativo. Já as barras de controle são de liga de Ag-In-Cd revestidas de aço inoxidável austenítico, e são as responsáveis por controlar a população de nêutrons do reator de modo constante, quando o mesmo atinge um certo nível desejado de potência, por meio da absorção dos nêutrons em sua constituição.

Figura 9 – Posicionamento dos canais nucleares e barras de controle e de segurança usados no reator IPEN/MB-01

Fonte: autoria própria.

Todo o núcleo do reator, os mecanismos de acionamento de barras, as guias para as aranhas e o amortecedor de queda de barras, é apoiado por uma estrutura, fixada na parte superior por uma plataforma metálica. Na parte inferior é mantida suspensa no interior do tanque moderador, o qual contém água tratada e desmineralizada, utilizada como elemento moderador e de blindagem dos nêutrons.

No sistema de controle de reatividade inclui um mecanismo de esvaziamento rápido do tanque moderador provocando o desligamento imediato do reator. No desligamento por barras, chamado primeiro nível, as 4 barras caem por gravidade no núcleo, a partir da desenergização dos magnetos. No desligamento de segundo nível, além de todas as 4 barras caírem, são abertas duas válvulas tipo borboleta de abertura rápida, de 20 polegadas de diâmetro, situadas no fundo do tanque moderador, causando a retirada do moderador do tanque em torno de 4 segundos.

A água do tanque principal, como é sabido, é um elemento fundamental para a moderação da energia dos nêutrons rápidos de fissão, termalizando-os e com isso aumentando a probabilidade de fissão dos isótopos de urânio-235.

A água drenada é estocada no primeiro subsolo, no tanque de estocagem, que poderá ser novamente bombeada para o tanque do moderador para operação do reator, ou tratamento por filtragem e diminuição do nível de condutividade através de um vaso trocador de resina mista. Ainda pode ser mudada sua temperatura, através da passagem pelos trocadores de calor para aquecimento ou resfriamento.

A instrumentação nuclear usada para o controle e segurança do reator é formada por 10 canais de medidas nucleares, divididos por função sendo, 2 canais de partida (com detectores BF_3), 2 canais de potência (com câmaras de Ionização Compensadas - CIC), 2 canais chamados de lineares (utilizando câmaras de Ionização Não Compensadas - CINC), 3 canais de segurança na faixa de potência (com 2 CINC e 1 com detector B-10) e 1 canal de segurança na faixa de partida (com detector BF_3). Estes medidores nucleares estão situados em posições estratégicas no núcleo, introduzidos no tanque moderador em cotas axiais, dentro de tubos de alumínio imersos em água.

Este controle nuclear é responsável pelo processamento de todos os sinais gerados nos detectores nucleares, onde também são enviados para os indicadores de potência e de período na mesa de controle do reator e para os comparadores de sinais que fazem a lógica de proteção do reator.

Na Figura 10 pode-se observar a mesa de controle e um dos painéis sinóticos é apresentado na Figura 11. Existem vários valores de limiar operacional (“set points”) que constituem a rede de intertravamento dos canais nucleares:

- Contagem mínima de 2 cps nos canais de partida e de segurança, para habilitar a malha de partida;
- Desligamento por sobrepotência mínima (110 mW) de primeiro nível para os canais de partida;
- Desligamento por sobrepotência mínima (120 mW) de segundo nível para os canais de partida;
- Desligamento por sobrepotência máxima de primeiro nível (110 W) para os canais de potência;
- Desligamento por sobrepotência máxima de segundo nível (120 W) para os canais de potência.

Figura 10 – Console e mesa usados no reator IPEN/MB-01

Fonte: Fotografia do autor

Figura 11 – Lado esquerdo do Painel de processo (Ventilação) usado no reator IPEN/MB-01

Fonte: Fotografia do autor

Utiliza-se uma fonte de nêutrons de amerício-berílio cujo a atividade inicial era de 1 curie e intensidade $2,5 \cdot 10^6$ nêutrons/s, utilizada para se atingir a contagem mínima nos canais lineares e liberar a partida do reator.

Esta fonte de nêutrons fica localizada no segundo subsolo do prédio do reator dentro de um furo de concreto e isolada do núcleo. Na partida para operação ela é elevada, por meio de um carrinho preso a um cabo de aço e posicionada embaixo do tanque moderador, onde sensibilizará os canais nucleares de partida a valores mínimos aceitáveis. Para que os detectores dos canais de partida e de segurança estejam aptos a monitorar a taxa de crescimento populacional dos nêutrons. Outro intertravamento importante se referente ao período de crescimento da população neutrônica durante a supercriticalidade do reator. Situação em que os nêutrons crescem exponencialmente. Portanto, foi determinado que para períodos de crescimento menores ou iguais a 17 segundos ocorre *scram* chamado de primeiro nível, com a queda das 4 barras. Se ocorrerem períodos menores ou iguais a 14 segundos ocorre o *scram* de segundo nível, com a queda das quatro barras e abertura das válvulas para escoamento da água do tanque moderador [15]. Existem vários outros intertravamentos que impedem a operação do reator (segurança), e outros que provocam o desligamento do reator (operacionais). Um deles seria a abertura da porta de acesso à planta do reator (saguão onde está o núcleo do reator). Outro intertravamento seria de condições inadequadas do moderador, ou por

baixa temperatura da mesma (menor de 17 graus celsius) ou de um nível inaceitável de resistividade do mesmo.

Todos estes sistemas de operação e controle (núcleo, tanque moderador, detectores dos canais nucleares, controle das barras e segurança) estão alocados em um prédio mantido com pressão negativa e que se houver uma perda de estanqueidade, o ar externo tende a entrar. Então tem-se um intertravamento operacional que impede a partida do reator caso a pressão negativa no interior do reator não esteja com valores pré-estabelecidos em projeto, provocando o desligamento automático da operação.

2.5.2 Descrição dos experimentos

Ao longo dos anos de atividade do reator, foram muitos os experimentos realizados, podendo ser citados os mais importantes [16]:

- Carregamento do núcleo e previsão de criticalidade através da curva $1/M$;
- Medida de níveis de radiação para testes de blindagem;
- Calibração de potência do reator (canais lineares 5 e 6) a partir da medida do fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo por meio da ativação de folhas de ouro;
- Medidas da reatividade integral das barras de controle;
- Medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons rápidos e térmicos a partir da irradiação de folhas de índio e ouro;
- Medida do espectro de energia dos nêutrons por ativação de folhas de ouro;
- Medida do coeficiente de reatividade de temperatura;
- Medida do coeficiente de reatividade de vazio;
- Medida da curvatura do fluxo de nêutrons ("buckling") por ativação de folhas de ouro;
- Medida do parâmetro β/λ através da técnica de análise por ruído;
- Medida do coeficiente Alfa-Rossi;

- Medida da taxa de reação no combustível através da irradiação de folhas de urânio em varetas combustíveis especiais desmontáveis;
- Medida da razão de conversão modificada (C^*) pela técnica de varredura gama em varetas combustíveis;
- Medida da taxa de reação no combustível através da técnica de varredura gama em varetas combustíveis;
- Mapeamento de fluxo com câmara de fissão miniatura;
- Medida da densidade de potência no núcleo pela técnica de varredura gama de varetas combustíveis;
- Calibração de potência pela técnica de análise por ruído;
- Medida do sinal de detectores posicionados fora do núcleo ("out-of-core").

3. TREINAMENTO DE OPERADORES DE REATORES

A Marinha do Brasil vem desenvolvendo projeto para a construção do primeiro submarino nuclear com tecnologia nacional. Dentro deste processo há a necessidade de mão-de-obra qualificada e capacitada para operar o protótipo de instalação propulsora nuclear naval denominada INAP (Instalação Nuclear a Água Pressurizada), que está sendo construída no Centro Experimental de Aramar (CEA) em Iperó (SP). De acordo com a demanda, é ministrado um Curso de Formação de Operadores de Reatores Nucleares a partir de 1999 [17]. Para isso foi planejado um programa de treinamento adequado ao exame a ser aplicado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) aos candidatos a obtenção da licença de operadores. O período de treinamento é de 10 meses, correspondendo a um total de 840 horas, distribuídas em 3 módulos, descritos a seguir:

- Parte A: Teoria Básica: 240 horas (4 meses);
- Parte B: Sistemas do Reator: 360 horas (6 meses);
- Parte C: Operação do reator: 240 horas realizada simultaneamente às partes anteriores.

Na primeira parte é abordada a teoria de reatores, desde física nuclear, detecção da radiação, ciclo de nêutrons, multiplicação subcrítica, cinética de reatores. Incluindo proteção radiológica com monitoração da radiação na instalação e controle de efluentes radioativos. Na parte B são abordados os sistemas e procedimentos necessários para a operação segura do reator. Assim, são estudados os sistemas elétricos, ar comprimido, combate a incêndio, ponte rolante, estruturas do núcleo, descrição de manuseio e armazenamento de varetas combustíveis, os diversos sistemas de água, os diversos sistemas de ventilação e ar condicionado, instrumentação e controle do reator, proteção e intertravamentos, especificações técnicas, análise de acidentes, plano de proteção radiológica (PER), análise de acidentes específica para o reator

IPEN/MB-01, revisão de matéria, entrega de relatórios e prova simulada para licenciamento de operadores [18].

No último módulo, o aluno é um operador assistente, anotando as condições operacionais do reator na mesa de controle, preenchendo da lista de verificação inicial ao ligar o reator e lista de verificação final no seu desligamento. Sempre acompanhado pelo Supervisor da Operação ou um Operador licenciado do reator. O candidato a operador participa dos experimentos, como calibração de barras de controle, medidas de excesso de reatividade e de coeficientes de reatividade. São apresentados a seguir, alguns simuladores mais recentes em operação.

4. SIMULADORES DE REATORES NUCLEARES

Um dos recursos mais utilizados atualmente é o uso de simuladores para prever problemas de operação, fadiga de materiais, erros de projeto, inserção de eventos externos (catástrofes) e no caso deste trabalho, treinamento de operadores, graduandos ou pós-graduandos, melhorando a compreensão da física dos reatores nucleares.

Já foram realizados vários trabalhos usando simulação de reatores, dentre os quais podem-se citar o artigo sobre o trabalho coreano de Baang *et al.* (2012) [19] com “Pesquisa de sistema de controle de potência do reator desenvolvidos no programa Matlab/Simulink” onde se modelou o controle denominado de MRAC (referência de controle de modelo adaptativo), esboçado na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura generalizada do simulador MRAC (coreano)

Fonte: adaptado de Baang *et al.* (2012).

Como resultado, mostrou-se promissor utilizando um dos programas propostos pela monografia em questão. Exemplo de resultado deste trabalho é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de resultados obtidos do controle adaptativo.

Fonte: adaptado de Baang *et al.* (2012).

Outro trabalho, porém, com enfoque diferenciado foi o realizado por Muhamad e Bahrin (2017) com o título: “*Virtual Environments Simulation in Research Reactor*” [20], usando os *software* CATIA e 3DVIA. Podendo simular estrutura das instalações de uma usina nuclear baseada em realidade virtual com modelos 3D. Sendo útil para melhorar a segurança de trabalhadores que não estão familiarizados com o ambiente onde serão inseridos, detectando colisões, restringindo a circulação em determinadas áreas e avaliando a proteção radiológica do colaborador no local de trabalho, como pode-se observar um exemplo de resultado na Figura 14.

Figura 14 - Estrutura do simulador em 3D.

Fonte: Muhamad e Bahrin (2017)

Também cabe citar o simulador esloveno “*PC based research reactor simulator*” desenvolvido por Toskan *et al.* (2017) [21], onde está focado em

resultados dos parâmetros físicos mais importantes do reator nuclear como mostram as Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Exemplo de IHM do simulador esloveno.

Fonte: Toskan *et al.* (2017)

Bem como controle de suas variáveis na operação do reator, como por exemplo, posição e modo de trabalho das barras de controle.

Figura 16 – Alguns resultados do simulador esloveno

Fonte: Toskan *et al.* (2017)

Dando continuidade nos trabalhos utilizando simuladores, tem-se o trabalho de Arafa *et al.* (2014) [22], onde utilizaram como base para interface para os usuários, o software LabVIEW no trabalho intitulado “*Development of an educational nuclear research reactor simulator*” mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Painel Frontal do Simulador onde se utilizou o programa LabVIEW

Fonte: Arafa *et al.* (2014)

Não se pode deixar de registrar que há inúmeros trabalhos realizados sobre os reatores de pesquisa nacionais também com focos diversificados, dentre os quais podem-se citar o de Aghina *et al* (2007), com seu trabalho denominado “*Full Scope Simulator of a Nuclear Power Plant Control Room Using 3D Stereo Virtual Reality Techniques for Operators Training*” [23], onde a proposta foi de um ambiente virtual como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Ambiente Virtual criado por Aguina *et al.*

Fonte: Aguina *et al* (2007)

Outro trabalho realizado foi de Carvalho (2006) na sua dissertação de mestrado com o título “Desenvolvimento de simulador para operadores do reator de pesquisa Ipen IEA-R1” [24], que contempla toda a física de operação, proteção e termo hidráulica deste reator, onde são realizados treinamentos (Figura 19).

Figura 19 - Exemplo da tela principal do simulador do reator IEA-R1.

Fonte: Carvalho (2006)

Finalizando os exemplos nacionais de simuladores, tem-se o trabalho de Lage *et al* (2017) [25] com o título “*Design of a Digital System for Operational Parameters Simulation of IPR-R1 Triga Nuclear Research Reactor*” também utilizando o software LabVIEW aplicado no reator nuclear Triga IPR–R1 (MG). Na Figura 20 tem-se um exemplo de fluxograma de uma das funcionalidades deste simulador.

Figura 20 – Fluxograma de desligamento do reator IPR-R1.

Fonte: Adaptado de Lage *et al* (2017)

Existem também muitas empresas multinacionais, inclusive as que produzem as usinas nucleares que possuem simuladores comerciais ou educacionais para uso em treinamento dos reatores específicos nos quais trabalham. Dentre as quais pode-se citar o Instituto Nuclear NI, que desde 2008 fornece treinamentos para reator tipo PWR, o Centro de Ciência Nuclear e Informação Tecnológica, e até a IAEA tem simuladores para *download* [26] e documentos para orientação de usuário tais como TCS 21 de 2005 e TCS 22 de 2003. Como exemplo de fabricantes tem-se a empresa russa Rosatom com os simuladores SMOLENSK 3 (2014) para reatores RBMK e o Rostov 3 (2016) para os reatores VVER da mostrado na Figura 21 [27], e a Areva que criou em 2014 o simulador TAISHAN EPR.

Figura 21 - Simulador Rostov 3

Fonte: Rostov (2015)

Através desta fotografia da Rosatom e anteriores, pode-se perceber que existem várias concepções de simulação e suas metodologias. Segundo o documento “TECDOC-995” da IAEA (2008), as simulações podem contemplar apenas uma parte da operação ou algo específico, podem demonstrar conceitos gerais da física do reator, podem simplificar a operação do reator, podem mostrar de forma gráfica o que acontece na usina e podem replicar um centro de usina nuclear como na foto do simulador Rostov 3 [27].

Este projeto de pesquisa visa dar uma contribuição para futuros trabalhos, seja para aprimoramento, implementação em outros centros ou em novos reatores. Esta contribuição a princípio é de um ambiente virtual simulado que não utiliza sinais externos provindos das variáveis do reator IPEN/MB-01, mas que em trabalhos futuros tem total condição de interfaceamento com a instrumentação e controle da operação do mesmo.

5. METODOLOGIA

O simulador foi desenvolvido com base em duas plataformas distintas e complementares. A primeira é uma plataforma tipo SCADA (Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados) neste caso o *software* Indusoft Web Studio, como observado na Figura 22 [28]. O qual utiliza interface gráfica (IHM) e controle entre o operador e a operação do reator de pesquisa. Neste *software* podem-se:

- ✓ Posicionar as barras de controle e segurança;
- ✓ Alterar a temperatura do moderador;
- ✓ Mudar o nível do moderador;
- ✓ Alterar a configuração do núcleo;
- ✓ Intervir no intertravamento no controle do reator;
- ✓ Executar *scrams* quando necessário.

Com isto pode-se verificar o comportamento da física e operação do reator, contemplando:

- Operação, intervenção e desligamento do reator;
- Verificar o funcionamento dos detectores de radiação;
- Levantar a curva $1/M$ *versus* posição das barras de controle;
- Levantar curvas de calibração para cada configuração do núcleo;
- Influenciar no nível e da temperatura do moderador na reatividade do núcleo;
- Medir o coeficiente de reatividade/vazio do reator;
- Dentre outras condições futuras que possam ser introduzidas pelos especialistas.

Figura 22 – Exemplo de tela do programa Indusoft SCADA

Fonte: Fenasucro (2012)

Como este programa tem foco em sinóticos, a parte matemática é limitada. Portanto, para modelamento matemático serão utilizados os recursos do *software* Matlab/Simulink como o exemplo da Figura 23 [29]. Pois, ele tem vínculos diretos com ~~nesse~~ este programa SCADA. A comunicação do sistema supervisório com o programa Matlab será estabelecida via porta OPC (*Ole for Process Control*) possibilitando a integração entre os dois sistemas propostos. Para isso ocorra tem-se que inserir dois blocos no ambiente Simulink: OPC (*Block parameters: OPC Configuration*) e OPC (*Client Manager*) já existentes no Simulink/Matlab® e configurá-los nos sistemas Matlab® e Indusoft para enviar e receber as informações da operação em tempo real.

Figura 23 – Exemplo de tela do programa Matlab

Fonte: Mathworks (2020)

A proposta é a interação bidirecional entre os programas Simulink do Matlab e o supervisor Indusoft em tempo real como mostra a Figura 24 [30].

Figura 24 – Exemplo de interação OPC entre Matlab e Indusoft

Fonte: Mazalli e Silva (2014)

Concluído todo o desenvolvimento do projeto do simulador, o mesmo ficará alocado em um PC executando um modo como servidor, executando o *software* Indusoft e Matlab. Os treinamentos ou cursos ministrados serão realizados em um laboratório onde os alunos terão acesso à internet através de um *browser* (Edge, Explorer, Chrome, Firefox entre outros), operando remotamente a planta do reator, com acesso restrito para cada objetivo proposto no momento. A Figura 25 mostra, resumidamente, operação através do programa Indusoft Web Studio [31], incorporado no próprio *software* SCADA.

Figura 25 – Exemplo de interação servidor e remoto

Fonte: Indusoft (2020)

No desenvolvimento do simulador não haverá necessidade de aquisição de licença do *software* SCADA, pois, será utilizado a versão educacional. Porém, para sua implementação futura, será necessária uma licença profissional do *software* mencionado sendo usado como servidor, bem como do computador pessoal. Este computador poderá ser um *desktop* ou *notebook* com configuração semelhante ao descrito, ligado em rede aos outros computadores em modo remoto para uso em treinamento. Para o *software* modelador matemático Matlab, o IPEN possui a sua licença não havendo

necessidade de compra e não possuindo nenhuma restrição. Sendo que será desenvolvido nas instalações do Centro de Engenharia (CEN), com apoio dos responsáveis pela operação do reator IPEN/MB-01.

5.1 Conceitos

5.1.1 Identificação de sistemas

De uma maneira geral, pode-se modelar matematicamente um sistema dinâmico através da física do processo ou por identificação de sistemas. Pela modelagem com fundamentação na física do processo (caixa-branca), há a exigência do conhecimento dos fenômenos físicos que o envolvem. Pois funcionam através das leis ou princípios representados nestes fenômenos. Sua utilização aborda a derivação dos modelos que descrevem a dinâmica interna do processo, relacionando sua entrada-saída. Porém, se o sistema a ser modelado é muito grande ou complexo, as equações físicas desenvolvidas acompanharam sua dificuldade, tornando a análise longa e sua implementação computacional complicada.

Atualmente existe a utilização desta abordagem através da identificação de sistemas, permitindo-se construir modelos matemáticos dos seus sistemas dinâmicos, a partir de dados empíricos do sistema físico. Por este método tem-se duas formas de construção dos modelos matemáticos. Por modelagem de caixa-preta, onde não se tem conhecimento algum do sistema a ser modelado, usando-se apenas os dados de entrada e saída do processo para a identificação, não existindo nenhuma relação entre a matemática usada e física do processo, facilitando a obtenção do modelo e possibilitando a escolha de qual estrutura seja mais adequada para o objetivo a ser alcançado. Existe também a modelagem por caixa-cinza, na qual já tem-se algum conhecimento do sistema real a ser modelado, se colocando como método de modelagem através da realidade do processo e a da identificação por caixa-preta, no qual não será abordado pois não será utilizado.

Os sistemas dinâmicos podem ser descritos através do domínio do tempo ou da frequência. Portanto a identificação tem a capacidade de derivar os modelos lineares ou não-lineares, descrevendo o seu comportamento original pelo domínio do tempo através de equações diferenciais ou pelo domínio da frequência (resposta em frequência), conforme a necessidade do que se deseja chegar.

Será descrito, brevemente, algumas representações para sistemas lineares. Sendo as mais comuns, e não abordando as técnicas e representações de sistemas não-lineares. Pois seria inviável descrever todas as representações existentes.

Funções de Transferência

As funções de transferência são funções que modelam o comportamento dinâmico de um par entrada-saída de um sistema, ou seja, descrevem como uma determinada entrada é dinamicamente “transferida” para a saída do sistema (AGUIRRE 2014) [32]. Utilizando técnicas de transformada de Laplace pode-se fazer uma estimativa da função de transferência de um sistema, dividindo a transformada de Laplace da saída pela da entrada. Deste modo, as funções de transferência são normalmente representadas por dois polinômios em s [33]. A função de transferência $G(s)$ da transformada de Laplace da entrada $U(s)$ e saída $Y(s)$ é dada pela equação (1):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_0 + b_1s^1 + b_2s^2 + \dots + b_qs^q}{a_0 + a_1s^1 + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} \quad (1)$$

Onde $N(s)$ e $D(s)$ são polinômios em s e $n > q$. Assim definem-se três importantes parâmetros da função de transferência, sendo eles o número de polos de $G(s)$ que são gerados das raízes de $D(s)$, número de zeros $G(s)$ que são gerados das raízes de $N(s)$ e a ordem do sistema que vem do grau de $D(s)$.

Representações Discretas

Há também modelos amplamente utilizados na identificação de sistemas que utilizam a função de transferência discreta. Esses modelos utilizam a transformada-z para modelagem sendo todos eles regidos praticamente por uma equação de modelo geral dada pela Equação 2:

$$A(z)y(k) = \frac{B(z)}{Z(z)}u(k) + \frac{N(z)}{D(z)}e(k) \quad (2)$$

Sendo $y(k)$ a saída, $u(k)$ a entrada e $e(k)$ o ruído branco, e $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$, $F(z)$ os polinômios definidos a seguir pelas Equações 3 à 7, respectivamente:

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_y} z^{-n_y} \quad (3)$$

$$B(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_u} z^{-n_u} \quad (4)$$

$$C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + a_{n_\xi} z^{-n_\xi} \quad (5)$$

$$D(z) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_{n_d} z^{-n_d} \quad (6)$$

$$F(z) = 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{n_f} z^{-n_f} \quad (7)$$

Modelo Box-Jenkins (BJ)

O *Box-Jenkins* é o modelo mais genérico possível, onde se consideram funções de transferência independentes para o ruído, $e(k)$, e a entrada $u(k)$. O modelo pode ser obtido através do modelo geral tomando-se $A(z) = 1$ e os demais polinômios arbitrários, resultando na Equação 8:

$$y(k) = \frac{B(z)}{D(z)} u(k) + \frac{C(z)}{D(z)} e(k) \quad (8)$$

Este modelo é útil quando há distúrbios que entram no final do processo. Por exemplo, um ruído de medição na saída sendo uma perturbação no final do processo.

Modelo ARMAX

O modelo auto regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX) pode ser obtido a partir do modelo geral, tomando-se $D(z) = F(z) = 1$ e $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$ polinômios arbitrários, resultando na Equação 9:

$$y(k) = \frac{B(z)}{A(z)} u(k) + \frac{C(z)}{A(z)} e(k) \quad (9)$$

Os modelos ARMAX são extensão dos Box-Jenkins, pois possibilitam a inclusão de variáveis exógenas como regressores. São formados parte auto regressiva (AR), definida como uma regressão linear de valor atual da série contra valores passados ponderados, uma parte de médias móveis (MA), da soma ponderada da observação atual e de observações do passado de um processo ruído branco. Os Modelos ARMAX, são uteis quando se tem o domínio de distúrbios que entram no início do processo.

Modelo ARX

O modelo auto-regressivo com entradas externas pode ser obtido também a partir do modelo geral, adotando-se $C(z)$, $D(z)$, $F(z) = 1$ e $A(z)$ e $B(z)$ polinômios arbitrários resultando na Equação 10:

$$y(k) = \frac{B(z)}{A(z)} u(k) + \frac{1}{A(z)} e(k) \quad (10)$$

O modelo ARX, é o modelo mais simples incorporando o sinal de estímulo. A estimativa deste modelo é a mais eficiente dos métodos de estimação polinomiais porque é o resultado de resolução de equações de regressão linear em forma analítica com solução é única, ou seja, a solução sempre satisfaz o mínimo global de perda de função, muito usada quando a ordem do modelo é alta.

O ARX é uma simplificação do modelo ARMAX considerando que o efeito do ruído tenha menos importância, ou seja, tem-se ruído aleatório aplicado diretamente à dinâmica do sistema, tornando-o deste modo, assim como ARMAX, um modelo pertencente à classe de modelos de erro na equação.

Modelo *Output Error*

O OE significa erro na saída, justificando seu nome como classe de modelo. Sendo que o ruído branco, $e(k)$, pode ser, apenas um ruído na medição da saída. Este modelo, assim como todos os anteriores, também pode ser obtido a partir do modelo geral, tomando-se $A(z)$, $C(z)$, $D(z) = 1$ e $B(z)$ e $F(z)$ polinômios arbitrários resultando na Equação 11:

$$y(k) = \frac{B(z)}{F(z)} u(k) + e(k) \quad (11)$$

Notasse que se trata de um modelo mais simples que o ARX, e com certeza um dos modelos mais descomplicado entre todos os anteriores, com o ruído aleatório aplicado diretamente na saída do sistema.

5.1.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática via Identificação de Sistemas pode ser dividida em algumas etapas:

- ✓ A obtenção dos dados empíricos do sistema que se deseja modelar, onde neste trabalho é utilizado os dados obtidos pelo SAD do reator IPEN MB-01.
- ✓ A escolha de um conjunto de candidatos a modelos que responda melhor, que poderão ser utilizados os modelos paramétricos lineares ou não lineares.
- ✓ Estimação dos parâmetros das estruturas destes modelos, como por exemplo o método por função de transferência.
- ✓ A validação dos modelos escolhidos através de comparativos com modelo de várias medidas geradas pelo SAD.
- ✓ E a identificação da estrutura de modelo, presente no grupo de candidatos a modelos que apresenta os melhores resultados na validação.

5.1.2.1 Validação do modelo

Tendo escolhido uma família dentre os modelos, é verificado se incorporam as características do sistema original, ou seja, o modelo realmente descreve o que as entradas e as saídas forneceram (AGUIRRE 2014) [32].

Também é importante poder comparar os modelos entre si e decidir se há algum, significativamente, melhor que os demais, sendo esta etapa certamente muito subjetiva, pois o resultado da validação dependerá de diversas variáveis. Como exemplo, a aplicação pretendida para o modelo, já que nenhum irá

representar o sistema real em todos os aspectos necessariamente. Portanto o sistema será considerado válido se incorporar aquelas características do sistema que são fundamentais para a aplicação exigida (AGUIRRE 2014) [32]. A forma mais comum para a validação do modelo é a simulação do mesmo com os dados empíricos previamente obtidos [34]. Neste caso, deseja-se saber se o modelo reproduz ao longo do tempo os dados observados.

5.1.3 Identificação de Sistemas no Matlab

O Matlab possui diversos *toolboxes* (ou ferramentas auxiliares) entre eles há o de Identificação de Sistemas chamado de *System Identification Toolbox*. Esta é uma ferramenta disponível para a construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos a partir de dados de entrada e saída adquiridos de um sistema. Foi desenvolvida por Lennart Ljung professor doutor da Universidade de Linköping na Suécia [35]. A ferramenta permite criar e usar modelos de sistemas dinâmicos que não são facilmente modelados a partir de princípios físicos. Podem ser usados tanto em dados no domínio do tempo, como no domínio da frequência de entrada-saída para identificar em tempo discreto modelos de processos na forma de função de transferência, espaço de estado, polinômios entre outros.

Este recurso ajuda a obter de forma mais rápida e simples modelos de um certo sistema permitindo comparar os resultados da simulação dos modelos, com os resultados reais coletados verificando qual possui o menor erro em relação ao sistema real, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico de comparação do Sistema físico com virtual

Fonte: Autoria própria.

Nas abas superiores do Matlab, há aba uma com a palavra APPS, ao clicar sobre nela, tem-se o menu dos *toolboxes* do Matlab, o *Toolbox System Identification* é aberto em uma janela à parte como mostra a Figura 27. Então é possível visualizar, previamente, as funções principais e elementares da ferramenta, sendo elas: *Import data* e *Estimate*.

Figura 27 – Interface do *System Identification Toolbox*

Fonte: Autoria própria.

A função *Import Data*, como o próprio nome diz, irá importar os dados de entrada e saída do sistema a ser identificado. Sendo a primeira tarefa a ser executada ao utilizar esta ferramenta. Pois sem tais dados nada pode ser feito para dar prosseguimento. A função *Estimate* permite escolher entre diversos modelos tais como função transferência, ARX, ARMAX, BJ entre outros, para estimar o modelo do sistema desejado.

Ao importar os dados do sistema real o mesmo é alocado em uma das caixas destinada aos dados importados como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Dados importados e alocados no Toolbox

Fonte: Autoria própria.

Há uma importância de se obter pela menos duas aquisições de dados. Pois uma será utilizada para estabelecer o modelo sendo alocada no quadro '*Working Data*' e a outra utilizada para a validação do mesmo sendo colocada no quadro '*Validation Data*'. Pois um modelo com muitos parâmetros pode ajustar bem qualquer conjunto de dados, sendo assim necessário verificar se o modelo consegue ajustar outro conjunto de dados, diferente dos que foram usados para a estimação, e claro ambos obtidos do mesmo processo em observação. Isto é feito para minimizar o erro, como mostra o gráfico da figura. O erro diminui com o aumento do número de parâmetros para dados de estimação. Mas o mesmo não ocorre para os dados de validação. A partir de certo ponto o erro começa a aumentar, com relação ao aumento de parâmetros, chamado de *over fitting*. Assim, os dados de validação devem ser coletados com um número determinado de parâmetros, menor do que os dados de estimação, visando obter um erro mínimo, como demonstra a Figura 29 [36].

Figura 29 – Gráfico de Erro em relação ao Número de Parâmetros.

Fonte: Ufpr(2020)

Com os dados preparados deve-se então selecionar um ou mais modelos a serem estimados e então verificar qual irá representar da melhor forma possível, dentro dos aspectos desejados, no modelo real.

6 DESENVOLVIMENTO

Figura 31 – Exemplo de dados importados para o Matlab.

Import - C:\Users\casorla\Desktop\teste de simulink\identificacao\resultados\gerandoexperiencia\completa\050919\3423 substituido filtrado.txt

IMPORT VIEW

Column delimiters: Tab Range: A1:R10675 Column vectors Numeric Matrix Cell Array

Replace unimportable cells with NaN

Import Selection

3423 substituido filtrado.txt

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	TQ201	PotC3_C4	Canal3	Canal4	ReatC3	ReatC4	Perodo	Canal1	Canal2	cps10	cps9	DoseTQ201	BC1	BC2	Canal5	Canal6	potC5	potC6
	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER
1	TQ-201	PotC3_C4	Canal3	Canal4	ReatC3	ReatC4	Perodo	Canal1	Canal2	cps10	cps9	DoseTQ-201	BC1	BC2	Canal5	Canal6	potC5	potC6
2	1,33E-01	2,03E-04	2,39E-12	2,38E-12	-1,93E+00	-3,48E+00	4,75E+03	9,93E-01	5,24E-01	2,94E+01	1,47E+01	3,99E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,82E-03	2,11E-12	1,37E+03	1,47E-01
3	-3,66E-01	2,05E-04	2,40E-12	2,40E-12	3,15E+00	3,14E+00	-6,74E+04	9,69E-01	5,16E-01	2,94E+01	1,47E+01	3,21E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,48E-03	1,91E-12	2,48E+03	2,80E-01
4	-2,29E-01	2,02E-04	2,41E-12	2,37E-12	4,21E+00	-5,16E+00	9,88E+03	9,35E-01	5,08E-01	0,00E+00	7,48E-01	2,80E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,91E-03	3,54E-12	3,91E+03	5,27E-01
5	-4,63E-01	2,03E-04	2,40E-12	2,38E-12	1,42E+00	-7,14E-01	-4,70E+04	9,04E-01	4,99E-01	0,00E+00	9,12E-01	2,54E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,76E-03	1,41E-12	5,23E+03	6,25E-01
6	-2,77E-01	2,04E-04	2,40E-12	2,39E-12	2,14E-01	1,49E+00	2,72E+04	8,78E-01	4,89E-01	9,14E-01	9,12E-01	2,52E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,55E-03	3,71E-12	6,40E+03	8,83E-01
7	-2,69E-01	2,04E-04	2,39E-12	2,39E-12	-1,96E+00	9,96E-01	1,06E+04	8,54E-01	4,82E-01	9,14E-01	9,12E-01	2,19E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,66E-03	2,51E-13	7,64E+03	9,00E-01
8	-2,29E-01	2,06E-04	2,40E-12	2,41E-12	1,31E+00	6,91E+00	1,33E+04	9,71E-01	5,58E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,47E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,36E-03	2,41E-12	8,66E+03	1,07E-01
9	-2,45E-01	2,05E-04	2,41E-12	2,40E-12	4,41E+00	1,45E+00	1,33E+04	9,10E-01	5,35E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,40E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-03	3,65E-12	9,64E+03	1,32E-01
10	-4,38E-01	2,05E-04	2,38E-12	2,40E-12	-5,05E+00	7,37E-01	5,81E+03	8,74E-01	0,524	0,00E+00	9,13E-01	2,32E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,51E-03	1,80E-12	1,08E+04	1,45E-01
11	-3,66E-01	2,04E-04	2,36E-12	2,39E-12	-1,05E+01	-3,81E-01	6,55E+03	8,50E-01	5,12E-01	0,00E+00	2,74E+00	2,18E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,52E-03	1,27E-12	1,19E+04	1,54E-01
12	-1,73E-01	2,03E-04	2,41E-12	2,38E-12	6,10E+00	-3,62E+00	2,02E+04	9,40E-01	5,03E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,19E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,73E-03	3,00E-12	1,32E+04	1,74E-01
13	-9,30E-01	2,03E-04	2,39E-12	2,38E-12	-5,96E-01	-3,47E+00	7,15E+03	8,97E-01	4,91E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-03	1,32E-12	1,45E+04	1,84E-01
14	-2,37E-01	2,03E-04	2,40E-12	2,38E-12	8,61E-01	-1,63E+00	9,88E+03	9,86E-01	4,84E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,91E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,65E-03	7,22E-13	1,57E+04	1,89E-01
15	-4,38E-01	2,04E-04	2,41E-12	2,39E-12	3,32E+00	1,61E+00	2,72E+04	9,36E-01	4,76E-01	9,14E-01	0,00E+00	1,87E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,64E-03	8,33E-14	1,69E+04	1,89E-01
16	-4,87E-01	2,04E-04	2,39E-12	2,39E-12	-2,85E+00	1,44E+00	-1,19E+05	9,04E-01	4,68E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,85E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,45E-03	8,90E-13	1,80E+04	1,95E-01
17	-3,74E-01	2,03E-04	2,40E-12	2,37E-12	7,34E-01	-4,29E+00	-6,96E+03	8,67E-01	4,61E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,87E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-03	1,98E-12	1,90E+04	2,09E-01
18	-2,77E-01	2,03E-04	2,40E-12	2,38E-12	2,00E+00	-2,81E+00	1,13E+04	9,66E-01	4,56E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,83E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,46E-03	2,90E-12	2,01E+04	2,29E-01
19	-5,11E-01	2,03E-04	2,40E-12	2,38E-12	7,71E-01	-1,99E+00	6,84E+03	9,19E-01	4,40E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,82E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-03	3,78E-12	2,14E+04	2,56E-01
20	-8,57E-01	2,04E-04	2,41E-12	2,39E-12	2,63E+00	1,33E+00	2,02E+04	8,85E-01	4,45E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,78E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,61E-03	3,15E-12	2,26E+04	2,78E-01
21	-3,82E-01	2,04E-04	2,41E-12	2,39E-12	2,86E+00	7,85E-01	3,30E+04	8,51E-01	5,18E-01	9,14E-01	0,00E+00	1,98E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E-03	2,95E-12	2,38E+04	2,98E-01
22	-4,79E-01	2,03E-04	2,39E-12	2,38E-12	-2,25E+00	-1,75E+00	7,15E+03	9,47E-01	4,99E-01	0,00E+00	9,12E-01	1,92E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,55E-03	3,23E-12	2,38E+04	2,98E-01
23	-2,77E-01	2,04E-04	2,40E-12	2,39E-12	-3,04E-01	9,72E-01	5,41E+03	8,99E-01	4,87E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,84E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,59E-03	3,25E-12	2,36E+04	3,06E-01
24	-4,47E-01	2,04E-04	2,42E-12	2,39E-12	5,51E+00	9,89E-01	5,81E+03	9,81E-01	4,78E-01	0,00E+00	1,82E+00	1,80E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,27E-03	1,77E-12	2,35E+04	3,05E-01
25	-1,48E-01	2,02E-04	2,41E-12	2,37E-12	1,52E+00	-5,45E+00	6,28E+03	9,39E-01	4,61E-01	0,00E+00	1,82E+00	1,72E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,96E-03	5,55E-12	2,35E+04	3,19E-01

Fonte: Autoria própria.

Na sequência importamos para seu *Workspace*, mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Dados Importados no Workspace do Matlab.

MATLAB R2016a

HOME PLOTS APPS VARIABLE VIEW

Open Rows Columns Insert Delete Sort

Current Folder

Variables - Canal6

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.0600e-12												
2	4.1800e-12												
3	4.1800e-12												
4	4.3900e-12												
5	4.5800e-12												
6	4.2300e-12												
7	5.5500e-13												
8	4.2300e-12												
9	5.3500e-12												
10	5.1900e-12												
11	4.8600e-12												
12	4.6900e-12												
13	4.3100e-13												

Workspace

Name	Value
BC1	887x1 double
BC2	887x1 double
Canal1	887x1 double
Canal2	887x1 double
Canal3	887x1 double
Canal4	887x1 double
Canal5	887x1 double
Canal6	887x1 double
cps10	887x1 double
cps9	887x1 double

Command Window

fx >> |

Fonte: Autoria própria.

Como próximo passo necessitou-se transformar cada variável em dados válidos para o APP *Identification Toolbox* do Matlab. Para isso precisou-se utilizar na linha de comando a instrução “iddata”. Definindo nome da variável, saída e entrada usadas como mostra o exemplo da Figura 33.

Figura 33 – Validando a variável na linha de comando do Matlab.

Fonte: Autoria própria.

Lembrando que será necessário usar este comando para cada variável criada. A seguir, na aba de APP do Matlab será aberto o *System Identification* para inserir estas variáveis “iddata” criadas anteriormente como mostra a Figura 34.

Figura 34 – APP System Identification do Matlab.

Fonte: Autoria própria.

Uma vez feito isto, importamos importou-se as variáveis criadas para serem utilizados como dados de estimação dentro do *System Identification Toolbox*. Portanto, com o *System Identification* aberto criou-se os *data object* para cada relação entrada/saída como observa-se na Figura 35.

Figura 35 – Criando *data object*.

Fonte: Autoria própria.

O intervalo de amostragem é definido através do número de leituras ocorridas por segundo (dado fornecido na primeira linha da *Command Window* após cada aquisição).

O gráfico dos dados importados pode ser visualizado ao marcar a opção '*Time plot*', atentando-se que para estimar um modelo correto os dados de estimação devem ser colocados no quadro '*Working Data*' e os dados de validação no quadro '*Validation Data*'. Para colocá-los nas respectivas caixas, basta clicar e arrastar o dado até o local desejado. A Figura 36 apresenta onde devem estar alocados cada dado coletado além de apresentá-los no gráfico ao lado.

Figura 36 - Exibição de dados importados no System Identification Toolbox

Fonte: Autoria própria.

Após realizar todo o procedimento de aquisição e preparação dos dados, pode-se começar a escolher os modelos para o processo estudado. A ferramenta possui diversos modelos que podem ser utilizados, desde os mais simples como uma função de transferência até os mais complexos como modelos não lineares. Porém, nesse experimento é utilizado e estimado apenas alguns modelos mais simples, com o objetivo de facilitar o entendimento e a introdução à ferramenta.

Ao clicar na aba '*Estimate*' o usuário tem diversas opções de modelos que podem ser estimados. Ele deve procurar, de forma iterativa, um modelo que melhor representa o processo e que pode satisfazê-lo. Pois, em diversos casos há modelos diferentes que podem de forma satisfatória representar o mesmo processo. Permitindo ao usuário escolher aquele que melhor o satisfaz. Devido a esse fator, geralmente, ele deve utilizar modelos com os quais já tenha mais conhecimento do mesmo, para que a compreensão e a análise ocorram facilmente. Este projeto foca apenas nos modelos de funções de transferências. Ao escolher determinado modelo a ser estimado, o aluno deve então pré-determinar iterativamente, ou com algum conhecimento prévio do processo, ordens e parâmetros do modelo.

Como por exemplo, em um modelo de função de transferência ele deve escolher o número de polos e zeros como mostra a Figura 37, e em modelos polinomiais o usuário tem que determinar a ordem dos polinômios arbitrários $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ e $F(z)$, sendo eles representados como n_a , n_b , n_c , n_d e n_f respectivamente na ferramenta e o aluno deve também determinar o n_k . Sendo este o parâmetro de atraso de resposta (*delay*).

Figura 37 - Janela de estimação de uma Função de Transferência.

Fonte: Autoria própria.

Após realizar algumas estimativas de sua preferência pode então compará-las de acordo com o erro, para então escolher aquela que irá atendê-lo melhor. É possível realizar o mesmo processo com os modelos de função de transferência. Porém nos modelos de função de transferência é necessário apenas determinar o número de polos e zeros, e posteriormente decidir qual função de transferência representa satisfatoriamente o sistema. A Figura 38 apresenta algumas funções de transferências estimadas no quadro de modelos, mostrando a porcentagem de adequação de cada uma delas, com o único clique sobre cada um deles para melhor visualizar a adequação das funções de transferências.

Figura 38 - Exemplo de Estimações de Função de Transferência.

Fonte: Autoria própria.

As funções de transferências são nomeadas automaticamente como tf1, tf2, tf3 e podem ser parametrizadas como sendo de primeira, segunda e terceira ordem respectivamente. É possível visualizar se possuem uma porcentagem de adequação satisfatória e se estão muito próximas uma da outra. Utilizando dados do SAD é possível compará-la com a equação do modelo estimado. A Figura 39 apresenta a janela de informações de tf1 para obter a função de transferência do modelo estimado e compará-la com a teórica.

Figura 39 - Janela de informações da função de transferência tf1

Fonte: Autoria própria.

É possível repetir todo procedimento, para ratificar todos os resultados obtidos. Pois, em muitos casos para uma melhor estimativa de modelos a aquisição de dados deve ser feita novamente e compará-los com os modelos anteriores.

Após escolhido qual melhor resultado, utilizou-se a ferramenta Simulink do Matlab para que possa simulá-lo em comunicação com o programa SCADA.

6.1 Simulink

É uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas personalizáveis de blocos como pode-se observar na Figura 40.

O *software* oferece alta integração com o ambiente MATLAB. É muito utilizado na teoria de controle e processamento de sinais para projeto e simulação multidomínios.

Figura 40 - Exemplo de tela usada no Simulink

Fonte: Autoria própria.

Em concomitância, o supervisório foi sendo construído para comunicação com o Simulink como será apresentado no exemplo a seguir.

6.2 Indusoft

O *software* Indusoft Web Studio é um conjunto de ferramentas de automação (orientação de objetos) que possibilita o desenvolvimento de aplicações IHM, SCADA, para sistemas embarcados e de instrumentação [37]. Podendo ser utilizado o supervisório Indusoft Web Studio e sua tecnologia Web para tirar vantagem de conexões de internet e intranet, cita-se algumas vantagens:

- Minimizando Tempo – Visualize qualquer aplicação de sua área de trabalho ou de seu telefone celular usando Internet Explorer ou intranet incluindo XML;
- Linguagem Fácil – Linguagem UNICODE: operadores imediatamente entendem a linguagem;
- Otimizando custos – Desenvolva uma aplicação uma vez e use plataformas diferentes para rodá-la, Windows CE, Windows Mobile, Windows XP Embarcado, e edição Server.
- Flexibilidade – Mais de 250 *drivers* disponíveis para *download*, OPC (cliente e server), e TCP/IP;
- Fácil resolução de Problemas – Entenda alarmes rapidamente, visualize na sua tela, ou via e-mail, PDA, telefones celulares ou *web browsers*;
- Integração Total – Relacionado com ERP e sistemas “*back-office*” usando conexão com base de dados relacional;
- Redução de Intervalos – Use tecnologias abertas, como ActiveX e .NET para visualizar documentações, reparar vídeos ou mensagens de áudio.

Em situação convencional, ou seja, em uma produção, automação ou controle de processos industriais tem-se os diversos dispositivos equipamentos em diferentes níveis de rede, conversando entre si cada um com seu tipo de protocolo e segurança, como mostra a Figura 41 [38].

Este trabalho utiliza somente da comunicação OPC entre os dois *softwares* (Simulink e Indusoft). Pois se trata de um simulador de uma operação nuclear, que no caso do reator IPEN/MB-01 como na Figura 43 parte destacada [39].

Figura 43 - Exemplo de comunicação OPC Client e OPC server.

Fonte: Matrikon (2020)

Na Figura 44 é apresentado dois exemplos de telas da IHM do supervisor Indusoft construídas para o simulador do reator nuclear IPEN/MB/01.

Figura 44 - Exemplos de telas-IHM construídas no Indusoft

Fonte: Autoria própria.

Acionando o comando “run” em ambos *softwares* (Simulink e Indusoft) tem-se as respostas na IHM em função das entradas manipuladas também na IHM. Neste caso, as telas da Figura 45, demonstram o resultado das reatividades Inversa e Inhour e o coeficiente alfa da configuração escolhida de uma determinada operação realizada anteriormente.

Figura 45 - Resposta no tempo na IHM do Indusoft SCADA.

Fonte: Autoria própria.

Também há a possibilidade de obter-se algumas informações dinâmicas através do Simulink como vê-se uma resposta de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) do reator IPEN/MB-01 como mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Exemplo de resposta de controle PID no Simulink.

Fonte: Autoria própria.

7. RESULTADOS

O simulador foi desenvolvido com o objetivo de ser uma ferramenta de ensino e aprendizagem a ser utilizada durante o programa de treinamento de alunos de graduação e pós graduação, bem como reciclagem de operadores do IPEN/MB-01. Desta forma a obtenção dos resultados foi realizada através da viabilidade da identificação de sistemas através de resultados empíricos obtidos pelas diversas operações realizadas no reator. Diante disto, como exemplo de viabilidade da identificação de sistemas do Matlab em comunicação com o supervisor SCADA, obteve-se três situações distintas:

1 Resultado de experimentos realizados no reator tais como reatividades inversa e Inhour e o coeficiente alfa em função da temperatura do moderador como mostra a Figura 47:

Figura 47 – Respostas de reatividade Inhour, Inversa e coeficiente para a configuração 338.

Fonte: Autoria própria.

Podendo ser alterado a configuração do núcleo, como por exemplo mostrado na configuração 337 da Figura 48.

Figura 48 – Respostas de reatividade Inhour, Inversa e coeficiente para a configuração 337.

Fonte: Autoria própria.

2 Também pode-se obter através do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) resultados dos canais nucleares obtidos nos experimentos do reator como mostra as Figuras 49 e 50 a seguir:

Figura 49 – Resultados dos canais 3,4, 5 e 6 para a configuração 338.

Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Resultados dos canais 9 e 10 para a configuração 338.

Fonte: Autoria própria.

3 Ainda foram criados sinóticos mostrando alguns sistemas de operação contidos no manual do operador do reator IPEN MB/01, como mostra a Figura 51. Sendo o desenho original do manual de operação [40] e a Figura 52 o resultado obtido no SCADA:

Figura 51 – Sistema de Tratamento STAA do Manual de Operação

Anexo I: Fluxograma Simplificado do STAA (Tratamento).

Fonte: IPEN/MB-01(2015).

Figura 52 – Sinótico do Sistema de Tratamento STAA no SCADA

Fonte: Autoria própria.

O mesmo acontece na Figura 53, sendo o desenho original do manual de operação [40] e na Figura 54 o resultado obtido no SCADA.

Figura 53 – Sistema de Retratamento STAA do Manual de Operação

Anexo I: Fluxograma Simplificado do STAA (Retratamento).

Fonte: IPEN/MB-01(2015).

Figura 54 – Sinótico do Sistema de Retratamento STAA no SCADA

Fonte: Autoria própria.

Este procedimento simplificado permite que a operação seja realizada dentro de condições e limites operacionais especificados, sendo considerado uma operação normal.

8. CONCLUSÃO

O simulador é um programa computacional desenvolvido para sistemas mono ou multiusuários. Ele realiza simulação das principais variáveis operacionais de um reator, permite também fácil navegação entre as telas da IHM fornecendo uma supervisão globalizada dos processos neutrônico, térmicos e hidráulicos se implementados. Sua principal intenção é mostrar a viabilidade da integração de um sistema supervisório e um *software* matemático através de dados utilizando o recurso da identificação de sistemas e do programa Simulink para o SCADA através de OPC.

Os benefícios e vantagens do uso do simulador, baseado em computadores pessoais, durante os programas de treinamento de operadores e estudantes de graduação e pós graduação de reator são:

A habilidade para treinar a operação da manipulação operacional.

A redução de risco para os equipamentos do reator e de pessoal.

A habilidade de repetir a operação ou experimento tantas vezes quanto necessário para entendimento e retenção.

Prover treinamento para pessoal administrativo ou de engenharia quem não tem uma familiaridade com automação e informações disponíveis na sala de controle.

9. TRABALHOS FUTUROS

Finalizando de modo resumido, este projeto de pesquisa visa dar uma contribuição para futuros trabalhos, seja para aprimoramento, implementação em outros centros ou em novos núcleos ou reatores. A contribuição a princípio é de um ambiente virtual simulado que não utiliza sinais externos provindos das variáveis do reator IPEN/MB-01. Mas que em trabalhos futuros tem total condição de interfaceamento com a instrumentação e controle de sua operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, ***Experience in the use of Systematic Approach to Training (SAT) for nuclear power plant personnel, Vienna***, 1999. (Technical Document Series, 1057)
- [2] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. ***Nuclear power plant simulators for use in operator training and examination***. 2009(ANSI/ANS-3.5).
- [3] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. “***Reactor Simulator Development***,” (Training Course Series, 12). (2001).
- [4] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. “***Selection, Specification, Design and Use of various Nuclear Power Plant Training Simulators***,” Technical Document Series,995 (1998).
- [5] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, ***Use of control room simulators for training of nuclear power plant personnel***, September 2004. (Technical Document Series, 1411).
- [6] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, ***Recruitment, Qualification and Training of Personnel for Nuclear Power Plants***, Vienna, 2002. (Safety Standards Series, NS-G-2.8).
- [7] MIETTINEN, J. ***Nuclear Power Plant Simulators: Goals and Evolution***. 2008. (THICKET 2008 – Session III – Paper 07).
- [8] ELETROBRÁS 2019. ***Energia nuclear no mundo***. Disponível em <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-nuclear-no-mundo.aspx>> acesso em: 12 de Junho de 2020.
- [9] BRASIL NUCLEAR 2009. ***Reatores de pesquisa nucleares do Brasil***. Disponível em <<http://brasilpotencianuclear.blogspot.com.br/2009/05/reatores-de-pesquisas-nucleares-no.html>> acesso em: 10 de outubro de 2019.
- [10] IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) 2020. ***Reator IEA-R1***. Disponível em <https://www.ipen.br/portal_por/portal_interna.php?secao_id=729> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [11] IEN (Instituto de Engenharia Nuclear) 2020. ***Reator Argonauta***. Disponível em <<http://www.ien.gov.br/index.php/principais-instalacoes/57-pagina-interna/159-argonauta>> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [12] CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) 2020. ***Reator Triga IPR-R1***. Disponível em <<http://www.cdtm.br/instalacoes-de-grande-porte/reator-triga-ipr-r1>> acesso em: 16 de junho de 2020.

- [13] IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) 2020. **Reator de Pesquisa IPEN-MB/01.** Disponível em https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=723 acesso em: 16 de junho de 2020.
- [14] **Experimentos na Fase de Comissionamento - Comparação com a Metodologia de Cálculo.** Relatório Interno RELT 003.R00, outubro de 1998.
- [15] SOARES, A. J. **Reactor instrumentation experience at IPEN-CNEN/SP, Research Reactor Instrumentation and Control Technology.** International Atomic Energy Agency, 4-8 December 1995. (Technical Document Series, 973).
- [16] MAIORINO, RUBENS, BITELLI, U. IPEN/MB-01: **Um reator nuclear projetado e construído no Brasil.** Revista dos END, N. 23, 1988. Folheto IPEN 1062.
- [17] PASQUALETO, H. **Programa de Treinamento para Operadores de Reatores.** Relatório Interno CTM-SP, 1999.
- [18] CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de operadores de reatores nucleares.** Norma CNEN-NE-1.01, outubro de 1979. Resolução CNEN- 12/79.
- [19] BAANG, D.; SUH, Y. S.; KIM, Y.K. **Research Reactor Power Control System** Design by Mathlab/Simulink
- [20] MUHAMAD, S.B.S.; BAHRAIN, M.H.B. **Virtual Environments Simulation in Research Reactor,** (2017). Disponível em <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4972941> acesso em: 10 de outubro de 2019.
- [21] TOSKAN, SNOJ, L.; D.; MALEC, J. **PC BASED RESEARCH REACTOR SIMULATOR .**
- [22] ARAFA, A.; SALEH, H. I.; ASHOUB, N. **Development of an educational nuclear research reactor simulator.** Kerntechnik 79 (2014) 518–527, DOI:10.3139/124.110446
- [23] AGHINA, M. A.; MOL A. C.; ALMEIDA, A. A.; PEREIRA, C. M.; VARELA, T. F.; CUNHA, G. G. **Full scope simulator of a nuclear power plant control room using 3D stereo virtual reality techniques for operators training,** 2007.
- [24] CARVALHO, R.P. **Desenvolvimento de um simulador de treinamento para operadores do reator de pesquisa IEA-R1.** 2006, 100p.
- [25] LAGE A. M. F, MESQUITA A. Z., and FELIPPE A. A. M. **Design of a Digital System for Operational Parameters Simulation of IPR-R1 Triga Nuclear Research Reactor.** INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2017, Belo Horizonte, 22-27 Oct 2017. p. 10-23.

- [26] IAEA (International Atomic Energy Agency) 2020. **Nuclear Reactor Simulators for Education and Training**. Disponível em <<https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors/nuclear-reactor-simulators-for-education-and-training>> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [27] WNN (World Nuclear News) 2016. **Russia launches simulator at Rostov 3**. Disponível em <<http://www.world-nuclear-news.org/NN-Russia-launches-simulator-at-Rostov-3-22071601.html>> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [28] INDUSOFT WEB STUDIO 2012. **FENASUCRO**. Disponível em <<http://www.indusoft.com/blog/2012/08/10/indusoft-welcomes-all-users-of-indusoft-web-studio-to-attend-fenasucro-this-august/>> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [29] MATHWORKS 2020. **MatLab frente a resultados**. Disponível em <<https://la.mathworks.com/discovery/matlab-vs-r.html>> acesso em: 16 de junho de 2020.
- [30] MAZALLI, D.Z.G.; SILVA, F.V. **Desenvolvimento de simulador virtual integrado aplicado ao treinamento operacional de processos químicos industriais**. Outubro, SC(COBEQ), 2014.
- [31] INDUSOFT WEB STUDIO 2012. **Thin Client Solutions Webinar**. Disponível Em< <http://www.indusoft.com/Marketing/Article/ArtMID/684/ArticleID/244/Thin-Client-Solutions-Webinar>> acesso em: 16 de Junho de 2020.
- [32] AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas – técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas lineares**. 4. Ed. UFMG, 2014, 776p.
- [33] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: PEARSON – Prentice Hall, 2010. 824p.
- [34] BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. N.Y.: JOHN WILEY & SONS, 1998. 849p.
- [35] LJUNG, LENNARD. **System Identification Toolbox –User’s Guide**, Mathworks, 2019, 1246p.
- [36] UFPR - Universidade Federal do Paraná. **Métodos de reamostragem**. Disponível em < <http://cursos.leg.ufpr.br/ML4all/apoio/reamostragem.html> > acesso em: 16 de junho de 2020.
- [37] JOINES, J. A. ROBERTS, S. D. **Fundamentals of Object-Oriented Simulation**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, December 13-16, 1998, Washington DC. Proceedings... Washington DC: ACM, 1998.
- [38] PROFIBUS.ORG.BR. **Tutorial desenvolvido pela National Instruments**. Disponível em <<http://www.profibus.org.br/news/fevereiro2012/tutorial>> acesso em: 16 de junho de 2020.

- [39] OPC FOUNDATION. ***OPC Unified Architecture: Overview and Concepts***. 2017.
- [40] IPEN – INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. ***Manual de Operação do Reator IPEN/MB-01***, 2015.

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, Inovações e Comunicações.