

Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das
Radiações, Minerais e Materiais**

**SISTEMA DIGITAL PARA SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS
NEUTRÔNICOS DO REATOR
NUCLEAR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1**

Antonio Juscelino Pinto

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre.

Belo Horizonte
2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das
Radiações, Minerais e Materiais**

**SISTEMA DIGITAL PARA SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS
NEUTRÔNICOS DO REATOR
NUCLEAR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1**

Antonio Juscelino Pinto

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente – CTMI

Linha de Pesquisa: Geoquímica e Geologia em Recursos Minerais e Meio Ambiente

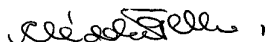
Orientadora: Dra. Clédola Cássia Oliveira de Tello

Coorientador: Dr. Amir Zacarias Mesquita

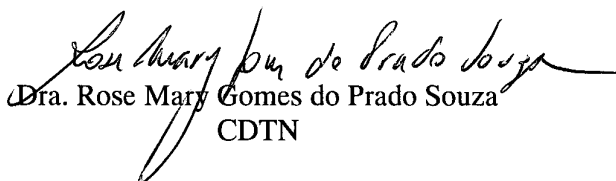
Belo Horizonte
2010

“A presente dissertação de mestrado, intitulada **“Sistema digital para simulação de parâmetros neutrônicos do Reator Nuclear de Pesquisa Triga IPR-1”**, de autoria de **Antônio Juscelino Pinto**, foi defendida e aprovada em 29 de julho de 2010, pela Banca Examinadora abaixo assinada.

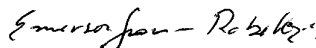
Belo Horizonte, 29 de julho de 2010



Profª. Drª. Clédola Cássia Oliveira de Tello
CDTN - Orientadora



Dra. Rose Mary Gomes do Prado Souza
CDTN



Dr. Emerson Giovani Rabello
CDTN

DEDICATÓRIA

À minha Família.

À minha mãe Alzira.

À minha esposa Iria.

À minha filha Mariana.

EPÍGRAFE

“O que quer que você possa fazer ou sonha que pode, comece. A ousadia traz consigo o talento, a capacidade e a magia. Comece agora. (Goethe)”.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas contribuíram para o êxito deste trabalho, destaco minha gratidão:

A Deus por ter nos dado a vida...

À Pesquisadora e Orientadora Dra. Clédola Cássia Oliveira de Tello, pelo constante incentivo, desde a primeira matéria isolada.

Ao Pesquisador e Coorientador Dr. Amir Zacarias Mesquita, por todo seu empenho na realização deste trabalho.

À Pesquisadora Dra. Rose Mary Gomes do Prado Souza, pela valiosa ajuda em neutrônica, sem a qual este trabalho não poderia ser realizado.

Ao Pesquisador Dr. Emerson Giovani Rabello pelo apoio e incentivo.

Ao Pesquisador Dr. Vanderley de Vasconcelos, pelo incentivo e pelos ensinamentos no uso dos recursos de usabilidade e interface homem-máquina.

Aos Engenheiros Denis Henrique Bianch Scaldaferri e Eduardo Tadeu Stehling Saraiva pela disponibilidade e grande ajuda no entendimento do programa LabVIEW[®], sem a qual este trabalho não poderia ser realizado.

Ao Pesquisador Dr. Donizete Anderson de Alencar, pelo incentivo e sugestões.

Ao Pesquisador Dr. Hugo Moura Dalle pela ajuda no entendimento dos parâmetros neutrônicos.

Ao Chefe do Serviço de Gerência de Rejeitos - SEGRE, Dr. Rogério Pimenta Mourão que permitiu que este trabalho fosse desenvolvido dentro da programação do CDTN.

Ao Diretor do CDTN, Dr. Sérgio Almeida Cunha Filgueiras pelo apoio e incentivo.

A todos os servidores do grupo de trabalho SEGRE e demais servidores do CDTN pelo apoio e incentivo.

Ao Amigo do laboratório do Reator TRIGA IPR-R1, Paulo Fernando Oliveira, pela foto da maquete do reator, pela constante disponibilidade, e pelos ensinamentos e explicações sobre as características da instalação do Reator.

Ao Fausto Maretti Junior e ao Luiz Otávio Ivanenko Sette Câmara pelo apoio e incentivo.

Às colegas Lenira, Nívia e Virgínia da Biblioteca do CDTN, pela presteza e ajuda na pesquisa bibliográfica.

À minha família, meu Pai Olinto, minha Mãe Alzira e meus Irmãos Maria, Terezinha, Geraldo, José e Raimundo.

À Minha Esposa Maria Iria Soares e minha filha Mariana Isabela Soares Pinto

Aos meus familiares, amigos e incentivadores Geraldo Moreira Soares, Maria da Graças Moreira Oliveira, Isabela Moreira Oliveira, Cristina Maria Soares e Nilo Correia Lima Filho.

Ao CDTN/CNEN, Empresa que eu Amo e Respeito, e que possibilita o crescimento profissional e pessoal de seus funcionários.

À FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores da Pós Graduação do CDTN, pela paciência carinho e incentivo.

À secretária Maria das Graças Pinho e ao Engenheiro Fabio Silva pela grande ajuda na formatação dos documentos.

Aos amigos da turma de mestrado CDTN 2008, pelo acolhimento e ensinamentos.

Aos amigos da secretaria do curso de Pós Graduação do CDTN pelo apoio administrativo e incentivo.

SISTEMA DIGITAL PARA SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DO REATOR NUCLEAR DE PESQUISA TRIGA IPR-1

Antonio Juscelino Pinto

RESUMO

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 Mark I, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), é um reator do tipo piscina refrigerado à água leve. Os reatores TRIGA (Training, Research, Isotope, General Atomics) foram projetados para pesquisa, treinamento e produção de radioisótopos. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) recomenda o uso de interfaces amigáveis e seguras para o monitoramento e controle dos parâmetros operacionais dos reatores nucleares. Inserido neste contexto, um sistema para simulação da evolução do fluxo de nêutrons do reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 (Sistema Simulador TRIGA) foi desenvolvido, utilizando o software LabVIEW®, considerando o moderno conceito de instrumentos virtuais (VIs) por meio de processador eletrônico e interface visual em monitor de vídeo, cujo objetivo é auxiliar no treinamento de operadores de reatores, permitindo estudar, observar e analisar o comportamento e a tendência de alguns dos processos que acontecem em um reator. Deste modo, os parâmetros de operação do reator podem ser simulados e seus relacionamentos visualizados, auxiliando no entendimento de como estas variáveis estão interligadas e se comportam, promovendo melhor conhecimento dos processos do reator TRIGA IPR-R1. São apresentados cenários de utilização do Sistema, demonstrando que se podem usar valores determinados em qualquer um dos parâmetros, verificando seu efeito nos demais. Portanto o Sistema Simulador TRIGA possibilitará o estudo de parâmetros que afetam a operação do reator, sem a necessidade de usar a instalação, evitando riscos e minimizando custos e tempo de operação.

Palavras-chave: Parâmetros Neutrônicos, LabVIEW®, Instrumentos Virtuais, Simulação, Reator TRIGA IPR-R1.

DIGITAL SIMULATION SYSTEM OF NEUTRON PARAMETERS OF THE TRIGA IPR-R1 NUCLEAR RESEARCH REACTOR

Antonio Juscelino Pinto

ABSTRACT

The IPR-R1 TRIGA Mark I nuclear research reactor, at the Nuclear Technology Development Center (CDTN), is a pool type reactor cooling by light water. TRIGA reactors (Training, Research, Isotope, General Atomics) were designed for research, training and radioisotope production. The International Atomic Energy Agency (IAEA) recommends the use of safety and friendly interfaces for monitoring and controlling the operational parameters of the nuclear reactors. In this context, a system to simulate the neutron evolution flux of the TRIGA IPR-R1 reactor (TRIGA Simulator System - Sistema Simulador TRIGA) was developed using the LabVIEW[®] software, considering the modern concept of virtual instruments (VIs) using electronic processor and visual interface in video monitor, with the objective of assisting the reactor operator training, allowing to study, to observe, and to analyze the behavior, and the tendency of some processes occurring in the reactor. Consequently the reactor operation parameters can be simulated and their relations can be visualized, supporting on the understanding of the interrelation of these parameters and their behavior, promoting a better knowledge of TRIGA IPR-R1 reactor processes. Some scenarios are presented to demonstrate that it is possible to use predetermined values in any parameters to verify its effect in the other ones. Therefore the TRIGA Simulator System (Sistema Simulador TRIGA) will allow the study of parameters, which affect the reactor operation, without the necessity of using the facility, avoiding risk, and reducing costs and operation time.

Key words: Neutronic parameters, LabVIEW[®], Virtual Instruments, Simulation, Reactor TRIGA IPR-R1.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Reatores em operação por país (ELETRONUCLEAR, 2009)	6
FIGURA 2 – Treinamento na Mesa de Controle do Reator TRIGA PSBR (PSU, 2000)	7
FIGURA 3 – Primeiro registro de criticalidade de um reator (U.S. DOE, 1982)	8
FIGURA 4 – Alunos do mestrado recebem aula no reator Argonauta (IEN, 2009).	11
FIGURA 5 – Reator IPEN/MB-01 (GONÇALVES, 2008)	12
FIGURA 6 – Reator TRIGA IPR-R1 – Detalhes do poço (MESQUITA et al, 2006) e do núcleo com o reator ligado (MESQUITA, 2007)	13
FIGURA 7 – Detalhe da instrumentação da mesa de controle do reator TRIGA IPR-R1	14
FIGURA 8 – Sistema de aquisição de dados do reator TRIGA IPR-R1 (MESQUITA, 2005)	15
FIGURA 9 – Mesa de controle computadorizada típica de um reator nuclear (TEIXEIRA, 2006)	15
FIGURA 10 – Esquema representando o reator TRIGA IPR-R1 (CDTN, 2007a)	18
FIGURA 11 – Distribuição da instrumentação (MESQUITA, 2005)	19
FIGURA 12 – Posição das barras de controle no núcleo do reator TRIGA IPR-R1 (MESQUITA, 2005)	21
FIGURA 13 – Gráfico de Inhour (CDTN, 1997)	27
FIGURA 14 – Fluxograma da metodologia usada no desenvolvimento do Sistema Simulador TRIGA	41
FIGURA 15 – Painel frontal de um instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW	43
FIGURA 16 – Diagrama de blocos de um instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW	44
FIGURA 17 – Diagrama de blocos do VI gera curva da reatividade x posição de barra	48
FIGURA 18 – Diagrama de blocos do evento que controla o reposicionamento da barra de Regulação	48
FIGURA 19 – Diagrama de blocos do VI que gera a curva do Inhour	49
FIGURA 20 – Diagrama de blocos do evento que controla o cursor da curva de Inhour	50
FIGURA 21 – Diagrama de blocos do VI gerador crescimento neutrônico	51
FIGURA 22 – Diagrama de blocos do evento que gerencia cursores no VI Crescimento Neutrônico	51
FIGURA 23 – Diagrama de blocos do evento que gerencia as escalas de potência	52
FIGURA 24 – Diagrama de blocos do evento que gerencia o painel de controle	53
FIGURA 25 – Diagrama de bloco do evento Botão Ajuda	54
FIGURA 26 – Diagrama de bloco do evento sobe barra de Regulação	55
FIGURA 27 – Diagrama de bloco do evento desce barra de Regulação	55
FIGURA 28 – Diagrama de bloco do evento scram na barra de Regulação	56
FIGURA 29 – Diagrama de bloco do evento scram de emergência	56
FIGURA 30 – Guia painel de controle do Sistema Simulador TRIGA	58
FIGURA 31 – Tela de Ajuda	59
FIGURA 32 – Tela controle das barras	60
FIGURA 33 – Reatividade versus posição da barra de Regulação	61
FIGURA 34 – Curva da equação de Inhour	62
FIGURA 35 – Comportamento do Canal Linear	63
FIGURA 36 – Comportamento do canal Logarítmico	63
FIGURA 37 – Registro da ocorrência do efeito da temperatura	64
FIGURA 38 – Obtenção da Reatividade por meio da posição da barra de Regulação	65
FIGURA 39 – Obtenção do período por meio da reatividade conhecida	66
FIGURA 40 – Apresentação do crescimento neutrônico	67
FIGURA 41 – Obtenção da Reatividade em função do período conhecido	68

FIGURA 42 – Obtenção da nova Posição da barra de Regulação em função da Reatividade.	68
FIGURA 43 – Obtenção do crescimento da potência	69
FIGURA 44 – Obtenção da reatividade em função do período conhecido	70
FIGURA 45 – Obtenção da reatividade em função da posição da barra de regulação	71
FIGURA 46 – Tela de Instalação do Sistema Simulador TRIGA.....	80
FIGURA 47 – Guia Painel de Controle.....	81
FIGURA 48 – Guia Controle das Barras.....	82
FIGURA 49 – Tela Reatividade Versus Posição de Barra de Regulação	83
FIGURA 50 – Gráfico da equação do Inhour.....	84
FIGURA 51 – Comportamento do canal Logarítmico	85
FIGURA 52 – Comportamento do Canal Linear.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grupos de nêutrons atrasados – (CDTN, 1997).....	25
Tabela 2 – Dados da Barra de Regulação (SOUZA, 2009).....	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ρ	Reatividade
β_{ef}	Beta Efetivo
δk	Variação do Fator de Multiplicação
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
C.I.C.	Câmara de Ionização Compensada
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CRCN-NE	Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste
CRCN-CO	Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i>
CTORP	Curso de Treinamento de Operadores em Reatores de Pesquisa
DLL	<i>Dynamic Link Libraries</i>
DT	Tempo de Dobramento ou Tempo de Duplicação
ELETRONUCLEAR	Eletronuclear S.A.
GPB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
HP	Hewlett-Packard
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IEEE-488	Padrão para Barramento de Comunicações Digitais
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
IHM	Interface Homem Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPR-R1	Instituto de Pesquisas Radioativas – Reator 1
IRD	Instituto de Radioproteção e dosimetria
k	Fator de Multiplicação de Nêutrons
LABVIEW	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench
LAPOC	Laboratório de Poços de Caldas
NI	National Instruments
PLC	<i>Programmable Logic Control</i>
PNB	Programa Nuclear Brasileiro
PSP	<i>Publish and Subscribe Protocol</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactors</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>

SQL	<i>Structured Query Language</i>
T	Período
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>
VISA	<i>Virtual Instrument System Architecture</i>
VXI	<i>VMEbus eXtensions for Instrumentation</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	3
2.1	Objetivos	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
2.3	Justificativa.....	3
3	REATORES NUCLEARES	5
3.1	Reatores de Potência	5
3.2	Reatores de Pesquisa	6
3.3	Evolução da Instrumentação e Controle dos Reatores Nucleares	7
3.4	Reatores de Pesquisa no Brasil	10
4	REATOR TRIGA IPR-R1 DO CDTN.....	13
4.1	Principais Atividades Realizadas no Reator TRIGA IPR-R1.....	16
4.1.1	Curso CTORP.....	16
4.1.2	Ativação neutrônica.....	16
4.1.3	Produção de radioisótopos.....	17
4.1.4	Pesquisas	17
4.2	Operação, Controle e Instrumentação do Reator IPR-R1	17
4.2.1	Medidas de temperatura.....	19
4.2.2	Medidas de vazão	20
4.2.3	Barras de controle	20
4.3	Parâmetros do Reator TRIGA IPR-R1.....	22
4.3.1	Meio multiplicador e fator de multiplicação	23
4.3.2	Período e reatividade	24
4.3.3	Contribuição dos nêutrons atrasados.....	25
4.3.4	Medidas de reatividade – Equação de Inhour	26
4.3.5	Tempo de duplicação (DT) e tempo de decuplicação (dt)	28
4.3.6	Moderação	29
4.3.7	Coeficiente de temperatura	29
5	INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL.....	31
5.1	Generalidades.....	31
5.2	Interação Humano-Computador e Usabilidade	33
5.2.1	Estratégia de desenvolvimento da interface	34
5.2.2	O uso de cores	35
5.2.3	Configuração de telas de Software.....	36

5.3	O LabVIEW e a Instrumentação Virtual.....	38
5.3.1	Características gerais.....	38
5.3.2	Vantagens.....	39
6	METODOLOGIA.....	41
6.1	Estudo e Seleção do Suporte Computacional	42
6.2	Estudo e Seleção dos Parâmetros do Reator TRIGA.....	45
6.3	Condições de Contorno Essenciais para o Uso do Sistema Simulador TRIGA	45
6.4	Desenvolvimento do Programa	46
6.4.1	Guia “Reatividade x Posição da Barra de Regulação”	46
6.4.2	Guia “Equação do Inhour”	48
6.4.3	Guia “Crescimento Neutrônico”	50
6.4.4	Guia “Painel de Controle” do Simulador TRIGA.....	52
6.4.5	Guia “Controle das Barras”	54
7	RESULTADOS.....	57
7.1	Guia “Painel de Controle” do Sistema Simulador TRIGA.....	58
7.2	Guia “Controle das Barras”	59
7.3	Guia “Reatividade x Posição da Barra de Regulação”	60
7.4	Guia “Equação de Inhour”	61
7.5	Guia Crescimento Neutrônico.....	62
7.6	Aplicações do Sistema Simulador TRIGA	64
7.6.1	Cenário 1 – Geração do crescimento neutrônico em função da posição de barra	65
7.6.2	Cenário 2 – Reposicionamento de barra em função do período do processo.	67
7.6.3	Cenário 3 – Reatividade inserida insuficiente.	69
8	CONCLUSÕES.....	72
9	TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
	APÊNDICE - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA SIMULADOR TRIGA.....	79

1 INTRODUÇÃO

Diante das preocupações com os cenários de aquecimento global e segurança no fornecimento de energia, os países estão se posicionando mais favoravelmente à energia nuclear. O que era medo se tornou esperança. Duas décadas após sua desaceleração, a energia nuclear está novamente em expansão para enfrentar o preço do petróleo e o aquecimento global.

Assim sendo, a atual conjuntura da energia nuclear no mundo apresenta os seguintes dados. Na França quase 80 % da energia elétrica produzida provém de usinas nucleares, na Suécia são 45 %, no Japão 24 % e nos Estados Unidos 19 %. No mundo, existem aproximadamente 440 usinas nucleares em operação, mais de 30 plantas em fase de construção e cerca de 200 usinas em processo de estudos ou projetos (IEA, 2009).

No Brasil, a Usina Nuclear Angra 1 encontra-se em operação desde 1983 e fornece ao sistema elétrico brasileiro a potência de 657 MW. Angra 2, iniciou sua geração no final do ano 2000 e entrega ao sistema mais 1.300 MW. Em 2008, a produção de eletricidade foi de 14 TWh ou 3,12 % da energia elétrica do país (ELETRONUCLEAR, 2009). E no final de 2009, o Governo Federal anunciou a retomada das obras para construção da Usina Nuclear Angra 3, com a expectativa de construção de outras usinas nucleares no Brasil.

Além da produção de energia elétrica, o renascimento do uso e aplicação da energia nuclear em todo o planeta também em outros segmentos, como na medicina para a produção de radiofármacos, na indústria, na irradiação de alimentos, demanda e demandará treinamento especializado de profissionais para desempenhar estas atividades em instalações radiativas e nucleares. Para que elas sejam realizadas com segurança, confiabilidade, qualidade e credibilidade é essencial a utilização de instrumentação que atenda a estes requisitos.

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), começou a operar em 1960 e foi o segundo reator nuclear instalado no país. Dentre suas aplicações está o treinamento de profissionais que atuam na área nuclear.

Neste contexto, um sistema para simulação da evolução da potência do reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 (Sistema Simulador TRIGA) foi desenvolvido com o intuito de auxiliar no treinamento de operadores de reatores, permitindo estudar, observar e analisar o comportamento e a tendência de alguns dos processos que acontecem em um reator. Deste

modo, os parâmetros de operação do reator podem ser simulados e seus relacionamentos visualizados sem a necessidade de colocar o reator em operação.

O Sistema Simulador TRIGA foi desenvolvido utilizando o software LabVIEW®, aplicando o conceito de instrumentos virtuais (VI). Foram desenvolvidos os diversos VIs com as curvas usadas no Sistema, por exemplo, a equação da curva de calibração integral real, que relaciona a posição da barra de Regulação com a reatividade inserida por ela no processo, e a equação da curva de Inhour.

Estes VIs permitem ao usuário visualizar e analisar a evolução do fluxo de nêutrons, em função do tempo de operação, do período e da potência inicial, tanto para o canal linear, quanto para o canal logarítmico, e a relação entre o reposicionamento da barra de Regulação no reator e a reatividade real inserida no núcleo.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 Objetivos

Desenvolver e disponibilizar um sistema, denominado Simulador TRIGA, por meio de processador eletrônico e interface visual em monitor de vídeo, usando instrumentos virtuais, para simular os parâmetros relacionados ao fluxo de nêutrons do reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1. O Sistema Simulador TRIGA permitirá simular e apresentar a evolução temporal da população de nêutrons do IPR-R1, possibilitando o estudo de parâmetros que afetam a operação do reator, sem a necessidade de usar a instalação, evitando riscos, minimizando custos e tempo de operação, otimizando e melhorando a sua aplicação, auxiliando aos operadores deste reator e de reatores de potência no estudo e entendimento da relação entre estes parâmetros e seus efeitos no desempenho global do reator.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar e selecionar os parâmetros relacionados ao fluxo de nêutrons;
- Definir o suporte computacional para o Sistema Simulador TRIGA;
- Desenvolver o Sistema Simulador TRIGA, inserindo as equações e comandos relativos aos parâmetros selecionados;
- Simular o comportamento neutrônico;
- Elaborar o manual do usuário para utilizar o Sistema Simulador TRIGA.

2.3 Justificativa

Diante do cenário que associa aquecimento global, aumento da demanda de energia e segurança em seu suprimento, os países conscientes direcionam um novo olhar para a energia nuclear. Diante disto, além da manutenção dos reatores em operação, tem aumentado o número de reatores em construção e vários estão em fase de projeto em todo o mundo. No Programa Nuclear Brasileiro (PNB) é prevista a construção de até oito novas usinas nucleares, além de Angra 3, até 2022 (BRASIL, 2007a). Deste modo, haverá a necessidade, no curto e médio prazo, de pessoal qualificado em todos os setores da energia nuclear.

Existem três reatores de pesquisa que podem ser utilizados para estudos e formação de pessoal na área nuclear no Brasil, sendo insuficientes para a demanda diante deste cenário. Deste modo, sistemas virtuais, nos quais seja possível realizar simulações e estudos de comportamento dos reatores, sejam eles de potência ou de pesquisa, são de essencial importância para suprir estas necessidades e apoiar este avanço na área nuclear no país. Além disso, estes sistemas permitem a economia de recursos financeiros e humanos, uma vez que podem ser utilizados independentemente do reator.

Estas simulações permitem também avaliar os efeitos de valores extremos nas diversas variáveis sem qualquer risco, pois não se utiliza a instalação física e, desta forma, pode-se adquirir conhecimento de todas as variáveis inerentes ao processo e suas implicações, o que é de extrema importância para a operação segura dos reatores (IAEA, 2008).

A utilização de monitores de vídeo, de melhor desempenho, para simulação e acompanhamento dos parâmetros operacionais, é importante na operação normal do reator e fundamental para a realização de treinamento de usuários. Conforme a IAEA (1999), os sistemas de instrumentação e controle de um reator nuclear são os “olhos e ouvidos” do operador, assim quanto mais fácil a visualização mais segura é a operação.

A simulação das variáveis operacionais do reator TRIGA IPR-R1 está em sintonia com os objetivos do CDTN em adequar seus laboratórios às exigências das normas, mostrando confiabilidade em seus resultados, além de contemplar às recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) para a operação segura de reatores de pesquisa.

3 REATORES NUCLEARES

A maior vantagem ambiental da geração elétrica por usinas nucleares é a não utilização de combustíveis fósseis, evitando o lançamento na atmosfera dos gases responsáveis pelo aumento do aquecimento global e outros produtos tóxicos. Usinas nucleares ocupam áreas relativamente pequenas, podem ser instaladas próximas aos centros consumidores e não dependem de fatores climáticos para o seu funcionamento. Os dois tipos principais de reatores nucleares são reatores de potência e os reatores de pesquisa, em geral de pequeno porte. Os fundamentos de operação de reatores nucleares são apresentados em Mello et al. (1968) e Lamarsh (2001) e a evolução dos sistemas de controle e instrumentação utilizados em reatores nucleares, tanto de potência quanto de pesquisa, é descrita em IAEA (1998). Os reatores de potência são utilizados como fonte de calor para a produção de energia elétrica e os reatores de pesquisa como fonte de nêutrons para pesquisas, análises e formação de pessoal.

3.1 Reatores de Potência

A fissão do átomo de urânio é a técnica empregada para a geração de eletricidade em usinas nucleares. De acordo com o relatório *Key World Energy Statistics*, os reatores nucleares respondiam, em 2007, por 13,8% da produção de energia elétrica no mundo (IEA, 2009). Isso coloca a energia nuclear como a quarta maior fonte, atrás do carvão, do gás natural e da água.

Existem atualmente em operação 436 reatores comerciais, em 31 países, que geram 370.260 MW de energia. Entre os maiores parques geradores, destacam-se os Estados Unidos, com 104 unidades, a França, com 59 reatores, e o Japão, com 55 (FIG. 1). Existem atualmente 264 reatores em operação do tipo PWR (Pressurized Water Reactors) com capacidade total de 243.051 MW, o que corresponde a 61% da capacidade mundial instalada por fonte nuclear. Em 2008, os Estados Unidos foi o país que mais gerou energia por fonte nuclear, sendo responsável por 32% da produção total desse tipo de energia no mundo. Também destacaram-se: França (17%), Japão (9%), Alemanha (6%), Rússia (6%), Coreia do Sul (6%), Canadá (3%), Ucrânia (3%) e China (1,85%). O Brasil foi responsável por 0,52% da geração de energia por fonte nuclear no mundo, em 2008 (ELETRONUCLEAR, 2009).

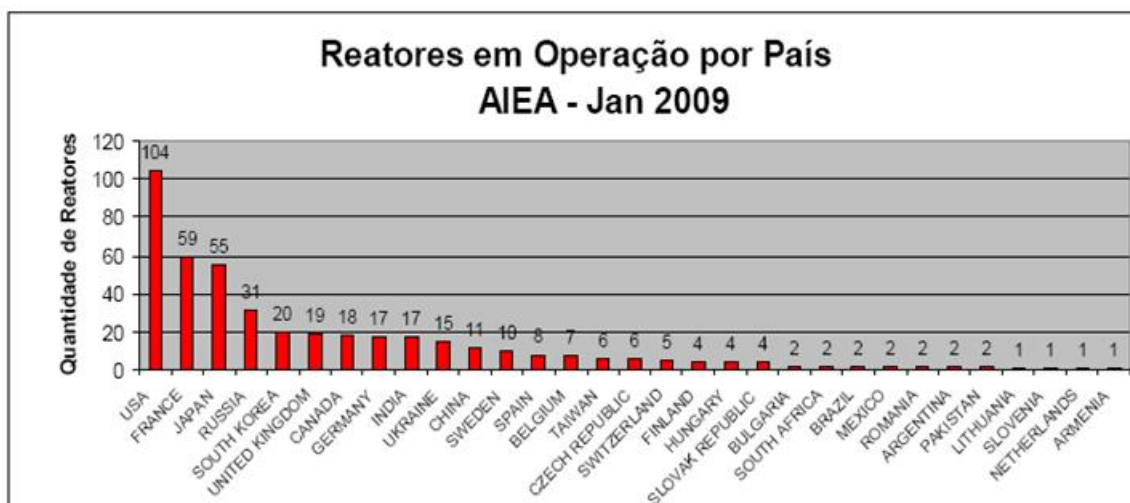


FIGURA 1 – Reatores em operação por país (ELETRONUCLEAR, 2009)

No Brasil, os reatores de potência são operados pela Eletrobras Termonuclear S.A. – Eletrobras Eletronuclear. A Usina Angra 1 encontra-se em operação desde 1983 e disponibiliza ao sistema elétrico brasileiro a potência de 657 MW. Angra 2, após longos períodos de paralisação nas obras, iniciou sua geração em 2000, sua potência é de 1.350 MW. Em 2008, a produção de eletricidade foi de 14 TWh ou 3,12% da energia elétrica do país. No final de 2009, o Governo Federal anunciou a retomada das obras da Usina Nuclear Angra 3, que é praticamente uma réplica de Angra 2, incorporando os avanços tecnológicos ocorridos desde a construção desta Usina, principalmente, quanto ao controle e à instrumentação, estando prevista para gerar 1.405 megawatts (ELETRONUCLEAR, 2009). Existe também a expectativa da construção de outras usinas nucleares nas regiões Sudeste e Nordeste, como consta no Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007b).

3.2 Reatores de Pesquisa

Os reatores de pesquisa mais conhecidos são os reatores TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomics*), conforme indica sua sigla, eles foram desenvolvidos, principalmente, para treinamento e pesquisas.

Os reatores TRIGA são caracterizados pela sua segurança intrínseca devido, principalmente, a dois fatores relacionados à transferência de calor, são eles (MESQUITA, 2005):

- O grande coeficiente negativo de temperatura/reatividade, o que significa que um aumento da potência leva a um consequente aumento da temperatura da mistura

combustível-moderador, causando o aparecimento de uma reatividade negativa que amortece gradualmente a taxa de aumento de potência e esta tende a se estabilizar;

- O sistema passivo de remoção de calor do núcleo, que permite operar em potências de até 500 kW, em estado estacionário, com resfriamento apenas por circulação natural da água da piscina.

Portanto, os reatores TRIGA são bastante apropriados para a formação de pessoal e pesquisas experimentais em termo-hidráulica, neutrônica e instrumentação. Estes reatores estão, em sua maioria, instalados em universidades e centros tecnológicos. Atualmente, existem dezenas de reatores tipo TRIGA instalados pelo mundo, sendo que em torno de 40 estão em operação, 15 desligados e cerca de 10 em processo de descomissionamento. Na FIG. 2 mostra-se um treinamento na sala de controle do reator TRIGA da Universidade da Pensilvânia (PSU, 2000).



FIGURA 2 – Treinamento na Mesa de Controle do Reator TRIGA PSBR (PSU, 2000)

3.3 Evolução da Instrumentação e Controle dos Reatores Nucleares

Desde a primeira criticalidade de um reator nuclear realizada por Fermi e colaboradores, em 1942 na Universidade de Chicago, já havia a preocupação de monitoração do crescimento dos parâmetros envolvidos na reação em cadeia. Na FIG. 3 tem-se o registro da primeira reação em cadeia.

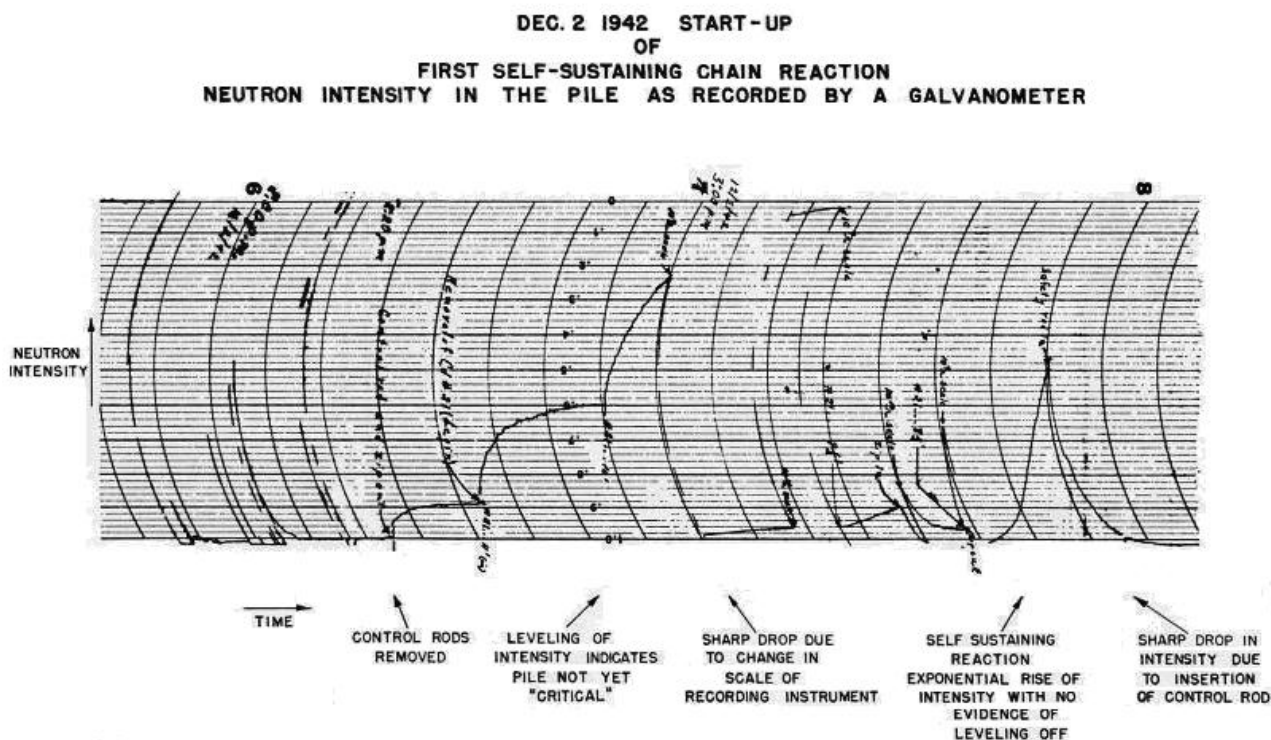


FIGURA 3 – Primeiro registro de criticalidade de um reator (U.S. DOE, 1982)

De modo geral, a evolução dos sistemas de controle utilizados nos reatores nucleares, tanto de potência quanto de pesquisa, segue a tendência ocorrida nos outros processos da indústria convencional. A seguir é apresentada, de modo resumido, a evolução da instrumentação de monitoramento e controle dos reatores nucleares.

Dos anos 50 a 60, nos primeiros reatores nucleares, os instrumentos de medida utilizavam válvulas eletrônicas. A visualização das variáveis e o respectivo arquivamento eram feitos em registradores gráficos e a lógica de controle e o acionamento dos equipamentos eram realizados por meio de relés eletromagnéticos.

Nas décadas de 60 e 70 surgem os instrumentos transistorizados discretos em estado sólido. A evolução dos parâmetros operacionais era observada em monitor de vídeo *CRT (Cathode Ray Tube)*, o arquivamento era realizado em registradores gráficos e a atuação no processo feito por meio de relés.

A partir de 1970 consolidou-se a utilização dos transistores em praticamente todos os circuitos eletrônicos e inicia-se a difusão das técnicas digitais e utilização dos circuitos integrados, ou seja, vários componentes eletrônicos encapsulados em um único volume. Os sistemas de controle eram analógicos e os principais instrumentos de medida passaram a ser digitais, isto

é, possuíam recursos de memória, podendo assim serem programados. O acionamento dos equipamentos e sistemas de proteção ainda acontece pela atuação de relés.

Já nos anos 80, os circuitos integrados dominam a eletrônica e a informática encontra-se em ampla expansão. Além dos instrumentos de medida, inicia-se a transformação digital dos sistemas de proteção e segurança. Os instrumentos digitais permitem a utilização de *hardware* e *software* para atuação no controle do processo. A atuação nos equipamentos ainda é realizada pela atuação de relés, mas toda a lógica de controle é realizada por sistemas digitais (computador). As mesas de controle são dotadas de monitores de vídeo CRT, para visualização dos parâmetros operacionais, e sistemas computadorizados para arquivamento dos valores destes parâmetros. Inicia-se também a interligação dos computadores por meio de redes. Os registradores gráficos, em muitos casos, não são mais utilizados.

A partir de 1998 com a ampliação da utilização dos controladores lógicos programáveis (PLCs), que surgiram na indústria automotiva americana na década de 70, os sistemas digitais passam a ser utilizados em todo o processo de controle, inclusive no acionamento das barras de controle realizado por motores de passo (GENERAL ATOMICS, 2008). Os relés não são mais utilizados para a lógica e quando estão presentes atuam somente no processo final. A visualização dos parâmetros continua a ser realizada em monitores de vídeo. As mesas de controle são dotadas de computadores ou PLCs para o controle e um ou mais computadores são utilizados para o sistema supervisório.

Hoje em dia, com a imensa evolução da eletrônica e da informática, tanto em *hardware* quanto em *software*, no mercado nacional e internacional existem disponíveis diversos recursos para monitoração, aquisição, arquivamento e controle das variáveis industriais. Por exemplo, pode-se citar o uso de portas USB (Universal Serial Bus), dos microcontroladores, os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, abreviadamente SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que são ferramentas que utilizam *software* para monitorar e supervisionar instalações industriais. Sendo que para esta aplicação, uma poderosa ferramenta para simulação, monitoração e controle de processos atualmente é o *software* LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*), que trás consigo juntamente com uma infinidade de recursos, o conceito de instrumentos virtuais aumentando a economia, a produtividade, a precisão e o desempenho (Pinto et al. 2009a e 2009b).

3.4 Reatores de Pesquisa no Brasil

A Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN – possui diversas unidades, nas quais são realizadas pesquisas: o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), o Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), o Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO) e o Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC). Três delas possuem reatores nucleares de pesquisa, são elas: o IEN, no Rio de Janeiro, com o reator Argonauta, o IPEN, em São Paulo, com os reatores IEA-R1 e IPEN/MB-01, e o CDTN, em Belo Horizonte, com o reator TRIGA IPR-R1. 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 e o projeto, construção e comissionamento do Reator de Pesquisa Multipropósito Brasileiro (RMB) (BRASIL, 2007a; 2010).

De modo geral, as pesquisas nestes reatores podem ser divididas em duas áreas principais: transferência de calor (termo-hidráulica) e física de reatores (neutrônica). Já as aplicações são normalmente em caracterização de materiais por análise por ativação neutrônica, fabricação de radioisótopos e formação de pessoal.

O reator Argonauta, instalado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, com potência licenciada de 500 W, vem sendo utilizado desde 1965, em pesquisas envolvendo nêutrons nas áreas de física de reatores e de engenharia nuclear. Mais de 70 alunos de instituições e universidades brasileiras obtiveram seus títulos de mestre ou doutor utilizando este reator no desenvolvimento de suas pesquisas. Atualmente, entre as principais linhas de pesquisas, estão incluídos os ensaios não destrutivos com nêutrons térmicos nas áreas de biologia, indústria, meio ambiente e segurança pública nacional. Também são produzidos radioisótopos (^{56}Mn , ^{140}La , ^{75}Se e ^{82}Br) para utilização como traçadores em pesquisas nas áreas do meio ambiente e industrial (BRASIL, 2005; IEN, 2010). A FIG. 4 mostra o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear.



FIGURA 4 – Alunos do mestrado recebem aula no reator Argonauta (IEN, 2009).

Os reatores IEA-R1 (5 MW) e IPEN/MB-01 (0,1 kW) estão instalados no IPEN e no centro tecnológico da marinha em São Paulo respectivamente. O IEA-R1 é um reator de pesquisa do tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve, utilizando grafite como refletor. Foi projetado e construído pela empresa norte-americana Babcock & Wilcox, em 1956. Desde 1957, vem sendo utilizado extensivamente na produção de radioisótopos, em análise de materiais por ativação, em experimentos científicos que utilizam tubos de irradiação e no treinamento de pessoal (TERREMOTO, 2004). O reator IPEN/MB-01 (FIG. 5) é um reator nuclear genuinamente brasileiro, concebido por pesquisadores e engenheiros do IPEN, financiado e construído pela Marinha do Brasil. Ele é um reator de potência zero, que atingiu sua primeira criticalidade em 1988.

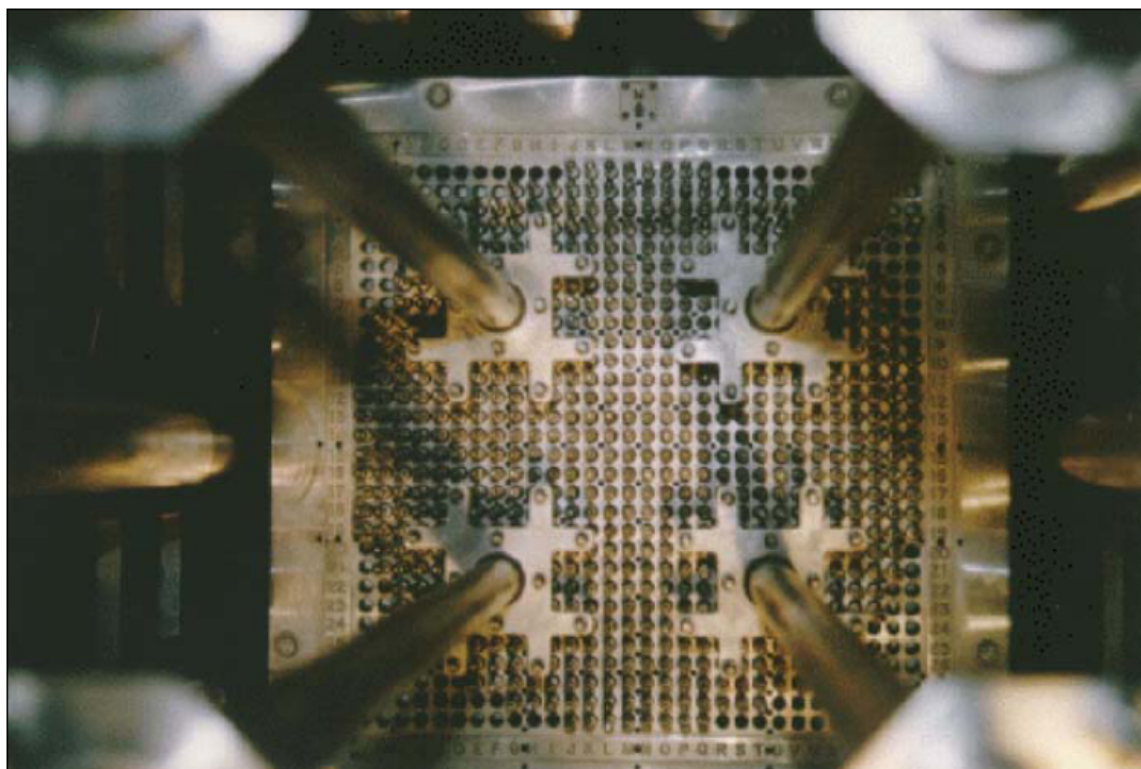


FIGURA 5 – Reator IPEN/MB-01 (GONÇALVES, 2008)

O reator TRIGA IPR-R1, instalado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, opera atualmente com a potência máxima licenciada de 100 kW.

No reator TRIGA IPR-R1, em seus 50 anos de operação, foram desenvolvidas cerca de 20 dissertações e quatro teses. Treze destes trabalhos foram na área de neutrônica, sendo quatro trabalhos em termo-hidráulica, existindo, portanto, grande potencial para pesquisas a serem realizadas nestas duas áreas (MESQUITA, 2010).

4 REATOR TRIGA IPR-R1 DO CDTN

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 foi adquirido da General Atomics pelo Governo do Estado de Minas Gerais em 1960, por meio do programa do governo dos EUA “Átomos para a Paz”. Foi instalado no antigo Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), atual Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), um dos institutos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). 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, (DALLE, 2005), podendo operar por vários anos na realização de pesquisas e análises, na produção de radioisótopos e em treinamentos (MESQUITA, 2010). Na FIG. 6 são mostradas duas fotografias do poço e do núcleo do reator TRIGA IPR-R1, nas quais se pode ver a radiação de Cerenkov quando o reator está crítico.



FIGURA 6 – Reator TRIGA IPR-R1 – Detalhes do poço (MESQUITA et al, 2006) e do núcleo com o reator ligado (MESQUITA, 2007)

Inicialmente, a potência térmica máxima do reator TRIGA IPR-R1 era de 30 kW, em regime contínuo, e 100 kW, em regime intermitente, devido a limitações do sistema de refrigeração. Com a troca do sistema de refrigeração o reator passou a operar a 100 kW em regime contínuo. Em 2002 foram realizadas modificações no núcleo e acrescentaram-se novos elementos combustíveis, permitindo que a potência atinja níveis de 250 kW (SOUZA et al, 2002 a, b)

O reator TRIGA IPR-R1 é um reator de pesquisas do tipo piscina, refrigerado por circulação natural de água leve (desmineralizada) e seu combustível é uma liga metálica de urânio com o moderador, hidreto de zircônio (U-ZrH), contendo de 8,0 % a 8,5 % em peso de urânio enriquecido a 20 % em ^{235}U (CDTN, 2007a, b). O núcleo do reator TRIGA IPR-R1 tem a

forma de um reticulado cilíndrico, onde estão atualmente instalados 63 elementos combustíveis-moderadores, sendo 59 elementos originais, revestidos com alumínio, e quatro elementos inseridos recentemente com revestimento em aço inoxidável.

O reator TRIGA IPR-R1 teve sua primeira criticalidade em 1960 e utilizava uma mesa de controle à base de válvulas eletrônicas e o registro da potência (fluxo neutrônico) era realizado por meio de um registrador gráfico com carta de 25 cm da Hewlett Packard Co. (HP). Em 1995 o sistema de controle foi trocado. Na mesa de controle do IPR-R1 adotou-se um sistema analógico com atuação por meio de relés eletromagnéticos. Dois registradores gráficos com carta de 10 cm da marca ECIL (FIG. 7) foram inseridos nesta mesa para acompanhamento do fluxo de nêutrons. (CDTN, 2007b).



FIGURA 7 – Detalhe da instrumentação da mesa de controle do reator TRIGA IPR-R1

Um sistema supervisor foi desenvolvido em 2003, utilizando placas de aquisição de dados da Advantech (1994, 1995). Este sistema foi necessário para realização de experimentos termo-hidráulicos e, principalmente, para a realização da calibração da potência térmica do reator (MESQUITA, 2005). Sua implantação foi um grande avanço na instrumentação do reator, mas encontra-se defasado, devido ao rápido desenvolvimento em informática e eletrônica. A versão utilizada do *software* é de 1994, apresentando hoje várias desvantagens como, por exemplo, utilização limitada à plataforma Windows 98. A placa de aquisição de dados utiliza barramento tipo ISA, que não é mais usada nos computadores atuais (FIG. 8).

Atualmente as salas de controle possuem todos os sistemas baseados em microprocessadores e utilizam monitores de vídeo compatíveis com o desenvolvimento da área, semelhante ao exemplo mostrado na FIG. 9. A AIEA recomenda a utilização de equipamentos digitais para melhorar a confiabilidade, aumentar a versatilidade das funções e otimizar a interface homem-máquina (IAEA, 1998 e 1999).

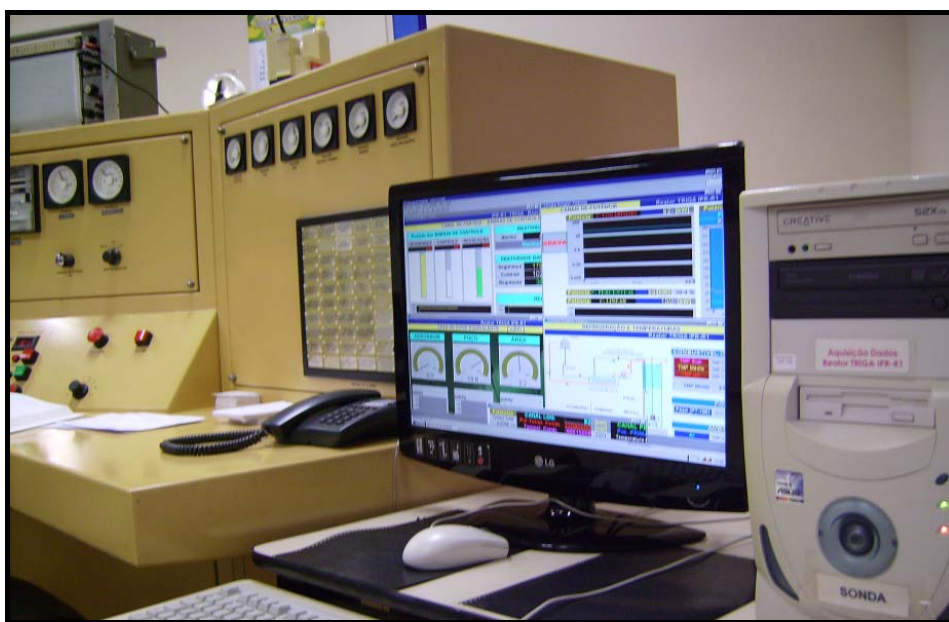


FIGURA 8 – Sistema de aquisição de dados do reator TRIGA IPR-R1 (MESQUITA, 2005)

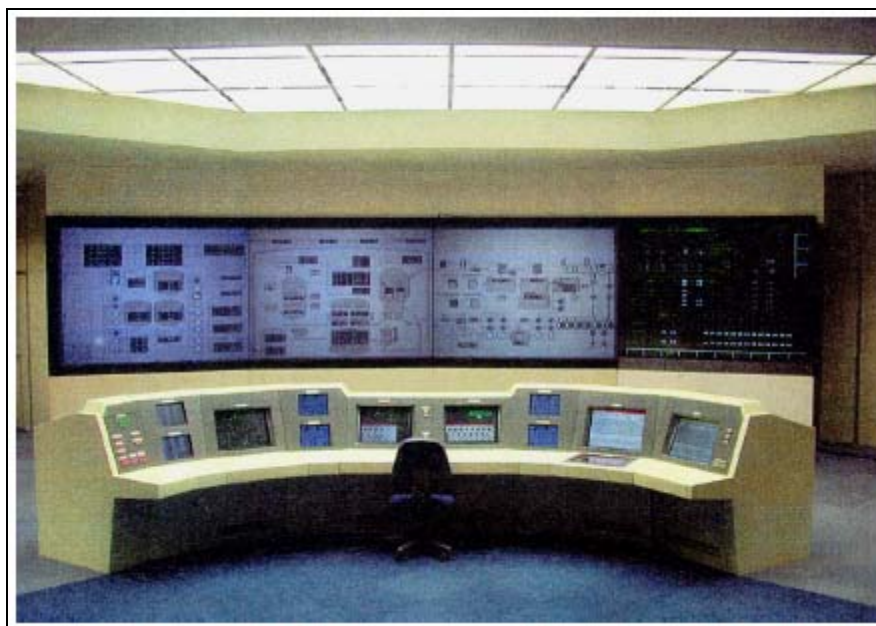


FIGURA 9 – Mesa de controle computadorizada típica de um reator nuclear (TEIXEIRA, 2006)

4.1 Principais Atividades Realizadas no Reator TRIGA IPR-R1

As principais atividades realizadas no CDTN utilizando o reator TRIGA IPR-R1, atualmente, são: treinamento, análises por ativação neutrônica, fabricação de radioisótopos e pesquisa. Nas instalações do reator TRIGA IPR-R1, são realizados cursos, treinamentos e visitas técnicas regulares de professores e estudantes de cursos de ciências exatas. Prevê-se aumento da demanda por treinamento com a construção de novas centrais de potência nos próximos anos. O curso de pós-graduação do CDTN é outro usuário em potencial no desenvolvimento de trabalhos com a utilização do reator TRIGA IPR-R1 não só nas aplicações de ativação neutrônica, mas também em experimentos de física de nêutrons e em outras áreas de utilização.

4.1.1 Curso CTORP.

No CDTN, é ministrado regularmente o Curso de Treinamento de Operadores em Reatores de Pesquisa (CTORP), como parte do treinamento obrigatório dos operadores das centrais nucleares brasileiras (CDTN, 1997).

Neste curso, os futuros operadores de reatores de potência e também de pesquisas têm a primeira oportunidade de se familiarizarem com um reator nuclear. É um curso essencialmente prático no qual são realizadas cerca de 10 operações de partida e controle do reator. A característica principal do curso é a interatividade do aluno com um reator de modo que ele possa efetivamente “ver” o crescimento do fluxo de nêutrons, pela análise das curvas dos registradores gráficos, do movimento das barras de controle, da radiação de Cerenkov e da localização dos detectores de nêutrons, por meio da observação direta do núcleo.

O curso aborda todos os aspectos importantes para a operação do reator, incluindo sua instrumentação, a análise de seus parâmetros principais, experiências de laboratório de física nuclear, instrumentação nuclear e radioquímica, normas e procedimentos de segurança, proteção radiológica (CNEN, 2005) e gerência de rejeitos radioativos (CNEN, 1985).

4.1.2 Ativação neutrônica.

A técnica de ativação neutrônica aplica-se a pesquisas nos mais diversos campos, permitindo análises precisas de 70 % dos elementos químicos. No CDTN ela é usada em trabalhos dirigidos às áreas ambiental, industrial, biomédica, de alimentos e de geologia. As amostras

são irradiadas por nêutrons nos dispositivos disponíveis no reator TRIGA IPR-R1, ou seja, a mesa giratória, tubo central e tubo pneumático. A análise espectrométrica da radiação gama emitida pelas amostras ativadas, que é única para cada elemento, permite determinar os componentes dessas amostras e suas respectivas concentrações (LIESER, 1997).

4.1.3 Produção de radioisótopos.

Os radioisótopos são produzidos no reator TRIGA IPR-R1 pela irradiação de elementos estáveis por nêutrons. Os radioisótopos produzidos são aplicados, em sua maioria, em estudos ambientais e industriais. Sua principal utilização é como traçadores, por exemplo, em estudos de ciclos hidrológicos ou outros processos que não permitam manipulação direta do meio estudado. Por emitir radiação, o elemento ativado, incorporado ao sistema, pode ser detectado pelos instrumentos e ter seu comportamento rastreado. Como está impregnado no meio em estudo, pode-se inferir o mesmo resultado para todo o processo ou fenômeno estudado. Utilizam-se como traçadores, radioisótopos de meia-vida curta (algumas horas ou dias), de modo que depois de certo tempo não exista mais radiação significativa no meio.

4.1.4 Pesquisas

Algumas *pesquisas* foram realizadas em suas instalações, como exemplos citam-se: a determinação do espectro de nêutrons realizada por Santoro (1975). Mais recentemente, foram realizados experimentos neutrônicos para subsidiar as atividades de aumento da potência para 250 kW (SOUZA et al. 2002 a, b), estudos teóricos em física de nêutrons (DALLE, 2005) e o trabalho executado por Zangirolami (2009) de levantamento do fluxo neutrônico nos terminais de irradiação. Com relação à transferência de calor têm-se os trabalhos teóricos efetuados por Fortini (2004) e Veloso (2005) e a investigação experimental realizada por Mesquita (2005).

4.2 Operação, Controle e Instrumentação do Reator IPR-R1

O calor acumulado na água do poço é removido por circulação forçada pelo sistema de refrigeração dotado de circuito primário e circuito secundário. O circuito de refrigeração forçada foi projetado para diminuir os níveis de radiação na sala do reator nas operações com potências acima de 50 kW. Na FIG. 10 apresenta-se a seção longitudinal do reator TRIGA IPR-R1, na qual podem ser vistos, dentre outros dispositivos, as barras de controle e as câmaras detectoras de nêutrons. A FIG. 11 mostra o diagrama do circuito de refrigeração

forçada com os locais de medidas dos parâmetros neutrônicos, de refrigeração e de radioproteção. Como se pode ver a água do poço é refrigerada pelo circuito que troca o calor, em última instância na torre de refrigeração. Assim, a temperatura dos combustíveis, no estado estacionário, depende da temperatura do ambiente.

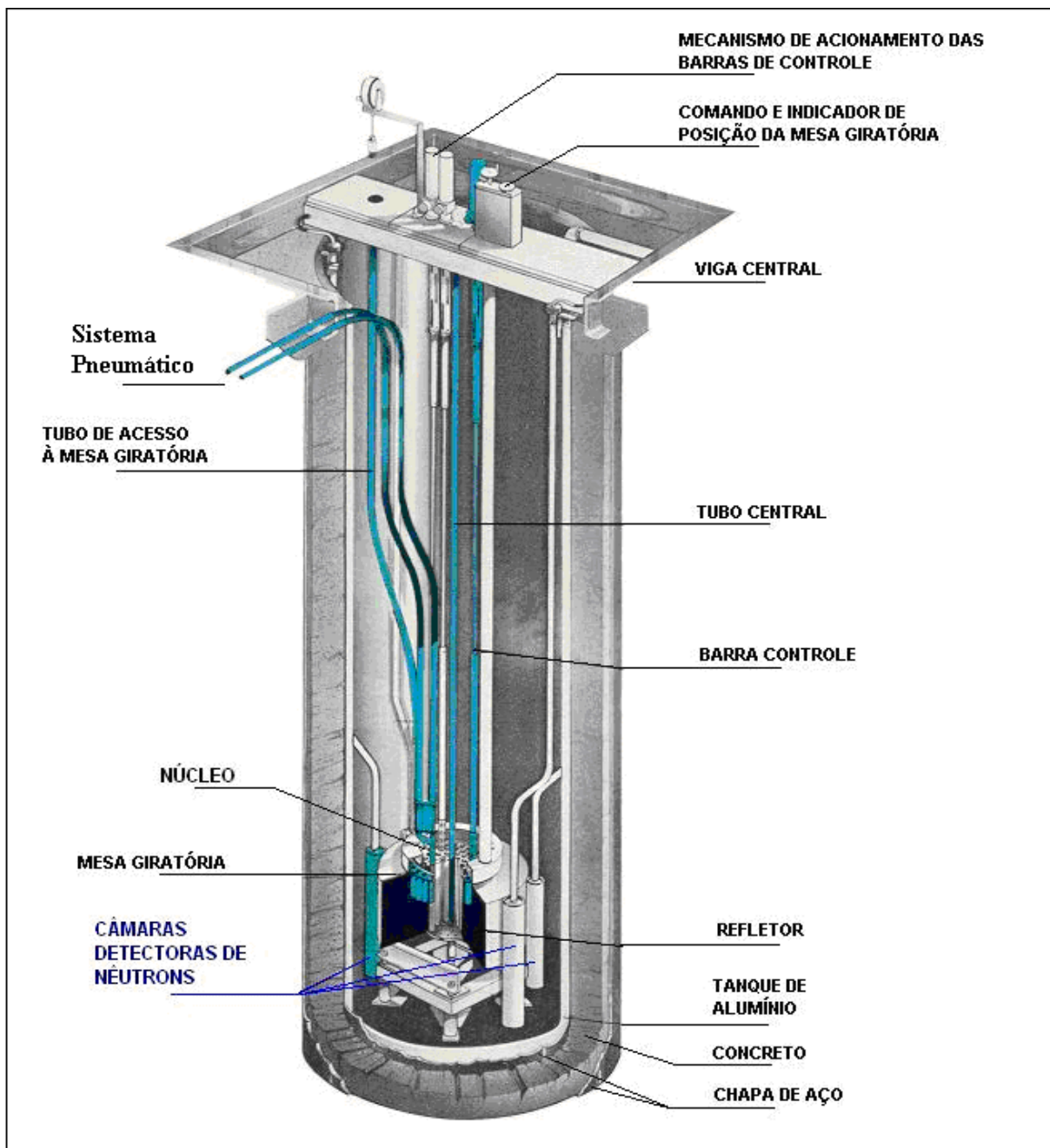


FIGURA 10 – Esquema representando o reator TRIGA IPR-R1 (CDTN, 2007a)

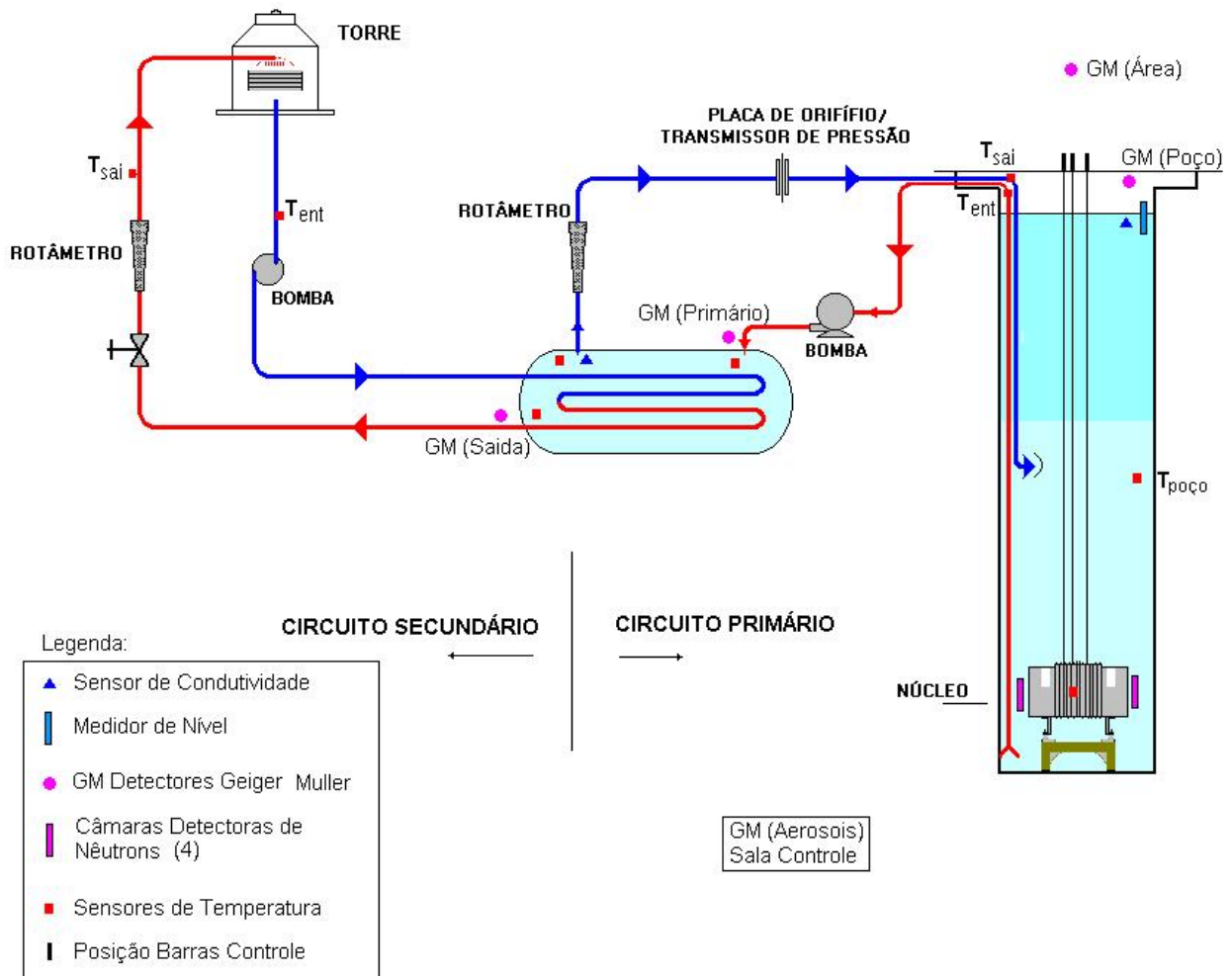


FIGURA 11 – Distribuição da instrumentação (MESQUITA, 2005)

4.2.1 Medidas de temperatura

Existem cinco termorresistores de platina (PT-100) distribuídos no circuito de refrigeração do reator TRIGA, conforme mostrado na FIG. 11: no poço, na entrada e na saída do circuito primário de refrigeração, na entrada e na saída do circuito secundário de refrigeração.

Os termorresistores são de três fios, possuem isolamento mineral, sendo montados em tubo de aço inoxidável de 8 mm de diâmetro. Os sinais dos termorresistores são enviados para os indicadores digitais situados na mesa de controle cujas saídas analógicas retransmitem os sinais para o sistema de aquisição de dados.

4.2.2 Medidas de vazão

A vazão do circuito primário de refrigeração é medida por meio de um conjunto composto de placa de orifício e transmissor de pressão diferencial. A leitura desta vazão é apresentada em dois indicadores digitais, um no painel da mesa de controle e um na sala do circuito de refrigeração. O sinal de corrente elétrica do transmissor de pressão, proporcional à vazão, passa pelos dois indicadores e por um resistor de $1,00\ \Omega$ (1 %) no sistema de aquisição de dados.

4.2.3 Barras de controle

O controle da potência do reator TRIGA IPR-R1 é realizado pela movimentação axial de três barras de controle no núcleo em uma faixa de aproximadamente de 35 cm. As posições totalmente inseridas correspondem a um número arbitrário igual a aproximadamente 150 e as posições totalmente retiradas correspondem ao número 900. As barras de controle são constituídas de carboneto de boro e movimentam-se em tubos-guia de alumínio, perfurados e fixados na grade inferior do núcleo. Na FIG. 12 tem-se o diagrama do núcleo, mostrando a posição das barras de controle (CDTN, 2007 a, b). No IPR-R1 as três barras de controle são:

Barra de Segurança (Posição C7): projetada para atuar nos casos de emergência, provocando um desligamento rápido do reator. Durante a operação ela se encontra totalmente extraída.

Barra de Controle (controle grosso) (Posição C1): destinada a compensar grandes variações de reatividade, como as decorrentes de envenenamento (reatividade negativa) por produtos de fissão, queima de combustível (em longo prazo), envenenamento por dispositivos experimentais etc.

Barra de Regulação (controle fino) (Posição F16): destinada a compensar pequenas variações de reatividade como aquelas devido a pequenas variações de temperatura, pequenos envenenamentos por amostras introduzidas etc.

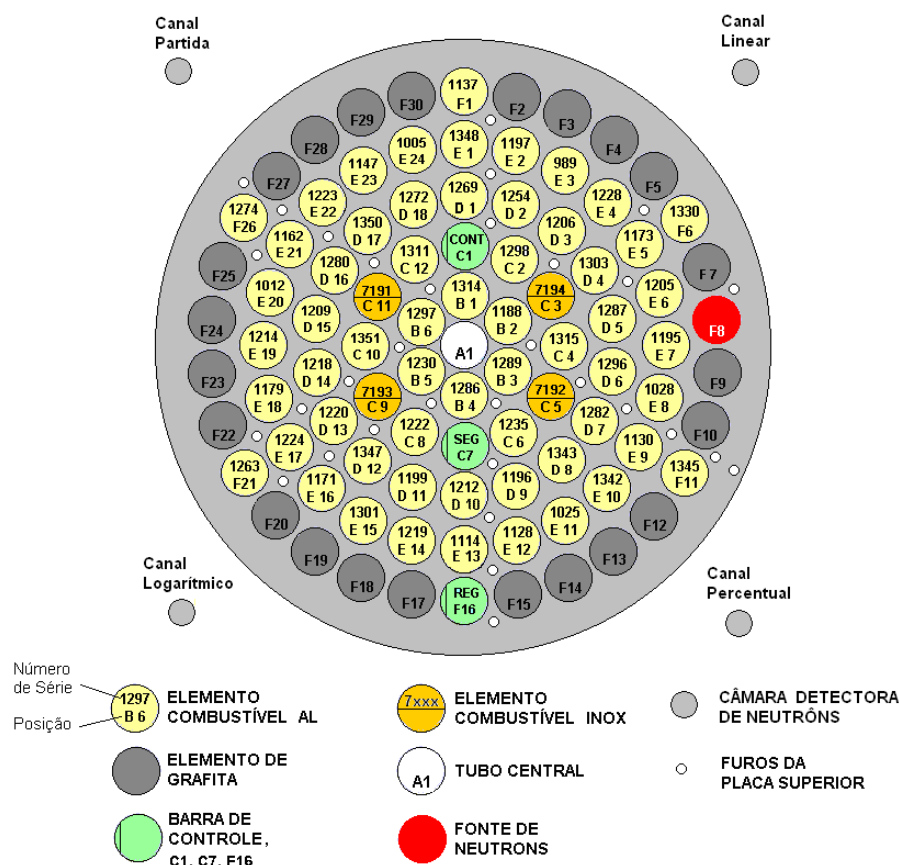


FIGURA 12 – Posição das barras de controle no núcleo do reator TRIGA IPR-R1 (MESQUITA, 2005).

As barras de controle do reator permitem ajustar o valor do k (fator de multiplicação de nêutrons) do sistema, tornando-o maior que 1 ($k > 1$) nas subidas de potência, igual a 1 ($k = 1$) em potência estacionária e menor que 1 ($k < 1$) nas reduções de potência ou no desligamento (CDTN, 1997, 2007 a, b).

Estas alterações de k ocorrem essencialmente por variações da absorção de nêutrons no núcleo. Retirando-se as barras do núcleo, diminuem-se as absorções e o k aumenta; introduzindo-as no núcleo, aumentam-se as absorções e o k diminui.

A eficiência de uma barra de controle, em termos de sua capacidade de alterar a reatividade do sistema, depende do valor do fluxo no local de inserção. De acordo com este conceito, a Barra de Regulação deverá ter menor eficiência no controle da reatividade que a Barra de Controle e a de Segurança. Assim, a Barra de Regulação (F16) desloca-se na periferia do núcleo (anel F), enquanto a Barra de Controle (C1) e a de Segurança (C7) deslocam-se mais próximas ao centro (anel C) (FIG. 12).

4.3 Parâmetros do Reator TRIGA IPR-R1

A monitoração da potência dos reatores nucleares normalmente é feita por meio de detectores nucleares, os quais são calibrados por meios térmicos.

No reator TRIGA IPR-R1, existem quatro câmaras sensíveis aos nêutrons, posicionadas em torno do núcleo para medidas de fluxo neutrônico. O tipo de câmara usada e sua posição com relação ao núcleo determinam a faixa de fluxos de nêutrons medidos, conforme descrito a seguir (CDTN, 2007 a e b):

- Canal de Partida - Consiste em uma câmara de fissão revestida com ^{235}U , com sua eletrônica associada, incluindo um amplificador de pulso que alimenta um circuito com indicador logarítmico, monitorando a evolução da taxa de nêutrons na partida do reator, correspondente a taxas de contagem de 1 a 10^5 cps. Deste modo denomina-se Canal de Partida a instrumentação nuclear, composta de detector, circuitos associados e medidores, que monitora o nível neutrônico na faixa inicial de partida.

Durante a fase da partida, o nível de nêutrons é relativamente baixo e insuficiente para ser medido com precisão por um detector operado em regime de corrente. Neste caso, é necessário usar um detector em regime pulsado, ou seja, um detector que conte os pulsos individualmente. O nível de nêutrons será, então, proporcional à taxa de contagem do detector.

- Canal Logarítmico – O Canal Logarítmico cobre a faixa intermediária da potência. Ele consiste em uma câmara de ionização compensada e sua eletrônica associada, que alimenta um amplificador logarítmico. O sinal vai para os medidores de potência que indicam valores dentro de uma faixa de nove décadas (de 10^{-3} a 10^6 W). Um medidor logarítmico cobrindo nove décadas dificilmente poderá fornecer leituras com precisão. A finalidade do Canal Logarítmico é fornecer valores precisos da taxa de variação do nível de potência e também proporcionar o desligamento automático do reator em caso de períodos muito curtos.

O detector de nêutrons usado no Canal Logarítmico é uma câmara de ionização compensada (C.I.C.) operada em regime de corrente, constituída de dois volumes separados: um, com revestimento de boro, sensível a nêutrons e gama; e outro sem revestimento que é sensível aos gama. A câmara é operada de tal forma que a corrente

gama do volume não revestido cancela a corrente gama do volume revestido, resultando em uma medida devida apenas aos nêutrons.

A compensação pode ser efetuada colocando a câmara sob um fluxo gama puro na qual sua resposta deve ser nula. Assim, para uma câmara bem compensada, qualquer que seja o nível de radiação gama, a corrente fornecida será unicamente proporcional ao número de nêutrons.

- Canal Linear – O detector deste canal consiste em uma câmara de ionização compensada que alimenta um amplificador linear. O sinal vai para o comutador de escalas (10^{-3} a 10^5 W) em que se pode alterar a sensibilidade da medida, permitindo medir com precisão desde o nível da fonte até o nível de potência máxima.
- Canal de Potência Percentual (PP) – O detector consiste em uma câmara de ionização não compensada, que envia o sinal aos indicadores de potência calibrados, em porcentagem, de 0 a 100% da potência máxima.

4.3.1 Meio multiplicador e fator de multiplicação

A fissão de um núcleo de ^{235}U por um nêutron libera, em média, 2,5 nêutrons e proporciona o desenvolvimento de reações em cadeia em um meio que contenha átomos de ^{235}U . Este meio chama-se meio multiplicador.

A evolução da população de nêutrons em um meio multiplicador é caracterizada pelo fator de multiplicação k . Assim em um sistema multiplicador, no interior do qual se tenham induzido fissões, por exemplo, por meio de uma fonte externa de nêutrons (removida em seguida), define-se o fator de multiplicação k do sistema como a razão entre o número de nêutrons de fissão de uma geração e o número de nêutrons de fissão da geração precedente.

Neste caso, se $k_{\text{ef}} = 1$ o sistema é crítico e a população de nêutrons é estacionária, isto é, não varia; se $k_{\text{ef}} > 1$, o sistema é supercrítico e a população de nêutrons cresce com o tempo e, finalmente, se $k_{\text{ef}} < 1$, o sistema é subcrítico e a população de nêutrons decresce com o tempo.

Para um dado sistema, o valor de k vai depender da competição entre processos que produzem nêutrons (fissões) e os processos que causam perdas de nêutrons (absorções e fugas) (CDTN, 1997).

4.3.2 Período e reatividade

Para um reator crítico ($k=1$), a população de nêutrons, o nível de potência e o fluxo de nêutrons em um dado local permanecem estacionários. Entretanto, se a partir de um instante $t = 0$, eleva-se bruscamente o valor de $k = 1$ para $k = 1 + \delta k$, as grandezas acima crescem com o tempo.

Considerando que todos os nêutrons produzidos por fissão têm a mesma duração média ℓ ("*neutron generation time*"), o crescimento neutrônico é dado por uma exponencial, mostrada na Equação 1 (CDTN, 1997):

$$N(t) = N_0 \times e^{t/T} \quad (1)$$

Na qual a constante T , denominada período do reator, é o tempo necessário para que sua potência se multiplique por um fator $e \cong 2,72$, e é dada pela Equação 2:

$$T = \ell / \delta k \quad (2)$$

Considerando que todos os nêutrons sejam liberados instantaneamente no processo de fissão (nêutrons prontos), o tempo médio ℓ que separa duas gerações consecutivas corresponde à soma do tempo de moderação com o tempo de difusão (percurso) como nêutron térmico. Este tempo ℓ depende da composição e da configuração do núcleo e está, em geral, compreendido entre $10\mu s$ e $1ms$ (reatores térmicos), e é específico para cada reator. No caso do reator TRIGA IPR-R1, este tempo é da ordem de $100\mu s$ (CDTN, 1997).

Nestas condições, pode-se verificar que o crescimento exponencial seria extremamente rápido, mesmo para valores relativamente pequenos de δk (variação do fator de multiplicação), como no exemplo abaixo (CDTN, 1997):

Considerando $\delta k = 0,001$ e $\ell = 100 \mu s$, tem-se conforme mostrado na Equação 3:

$$T = \frac{\ell}{\delta k} = \frac{100 \times 10^{-6} s}{0,001} = 0,1 s \quad (3)$$

Assim, neste exemplo, após o tempo $t = 1\text{s}$, a população de nêutrons crescerá por um fator (Equação 4):

$$e^{t/T} = e^{1/0,1} = e^{10} \cong 2 \times 10^4 \quad (4)$$

Um crescimento tão rápido, como o do exemplo (cerca de 20.000 vezes em 1s), seria virtualmente incompatível com o controle do reator.

4.3.3 Contribuição dos nêutrons atrasados

O fato de alguns poucos nêutrons gerados por fissão só aparecerem com um atraso sensível, em relação ao instante da fissão, faz com que alta taxa de crescimento da população neutrônica, prevista no item anterior, sofra uma redução considerável (MELLO, 1968).

Estes nêutrons, designados nêutrons atrasados, têm sua origem associada à desintegração radioativa de certos produtos de fissão (precursores) e, conseqüentemente, o atraso com que são emitidos é condicionado pela meia-vida dos precursores.

Reconhece-se, atualmente, a existência de um número considerável de precursores, mas na prática consideram-se seis grupos efetivos de nêutrons atrasados. Cada grupo é caracterizado pela meia-vida t_i (ou pela constante de desintegração λ_i) do precursor e pela proporção β_i de nêutrons do grupo em relação ao número de nêutrons de fissão. A TAB. 1 apresenta dados de nêutrons atrasados para fissão térmica do ^{235}U .

Tabela 1 – Grupos de nêutrons atrasados – (CDTN, 1997)

GRUPO I	PROPORÇÃO β_i (%)	MEIA-VIDA t_i (s)	CONSTANTE DE DESINTEGRAÇÃO λ_i (s⁻¹)	ENERGIA E_i (KEV)
1	0,022	55	0,013	250
2	0,145	22	0,032	560
3	0,131	6,0	0,12	430
4	0,242	2,2	0,31	620
5	0,083	0,50	1,39	420
6	0,027	0,18	3,85	-

$$\beta = \sum \beta_i = 0,65\%$$

As frações β_i (individualmente) e a fração total $\beta = \sum \beta_i$ de nêutrons atrasados dependem do núcleo fissil e também do tipo de fissão (por nêutrons térmicos ou por nêutrons rápidos). Assim para um dado reator, é usual definir-se um β efetivo (β_{ef}) que atende às diversas possibilidades de fissão, bem como às fugas de nêutrons (os nêutrons atrasados, possuindo energias menores que a energia média do espectro de fissão de nêutrons prontos, têm menor probabilidade de fuga). No caso do reator TRIGA IPR-R1 adota-se um β_{ef} igual a 0,79 % ou $\beta_{ef} = 0,0079 \cong 0,008$.

4.3.4 Medidas de reatividade – Equação de Inhour

É essencial relacionar o período (T) com a grandeza chamada reatividade, representada por ρ , para que se possa acompanhar o crescimento da potência com o tempo.

Por definição:

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (5)$$

considerando:

$$k-1 = \delta k \quad \text{e} \quad k = 1 + \delta k$$

tem-se:

$$\rho = \frac{\delta k}{1 + \delta k}$$

Desta forma a reatividade (ρ) é a medida do desvio em relação ao equilíbrio do balanço neutrônico de um reator nuclear, ou com outras palavras, é uma medida do quanto o reator está afastado da criticalidade ($k = 1$). Sendo que para um reator crítico temos $\rho = 0$.

Em cinética de reatores, a equação que relaciona a reatividade (ρ) com o período (T), considerando a presença dos grupos de nêutrons atrasados, é a equação do "Inhour", definida pela Equação 6:

$$\rho = \frac{\delta k}{1 + \delta k} = \frac{\ell}{T(1 + \delta k)} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (6)$$

Sendo: ρ = Reatividade
 δk = Variação do fator de multiplicação
 T = Período
 β_i = Proporção de nêutrons do grupo
 λ_i = Constante de desintegração

O estudo e a obtenção dos valores da correlação entre uma reatividade específica (ρ) e o período (T) correspondente podem também ser obtidos por meio da análise do gráfico de Inhour, como apresentado na FIG. 13.

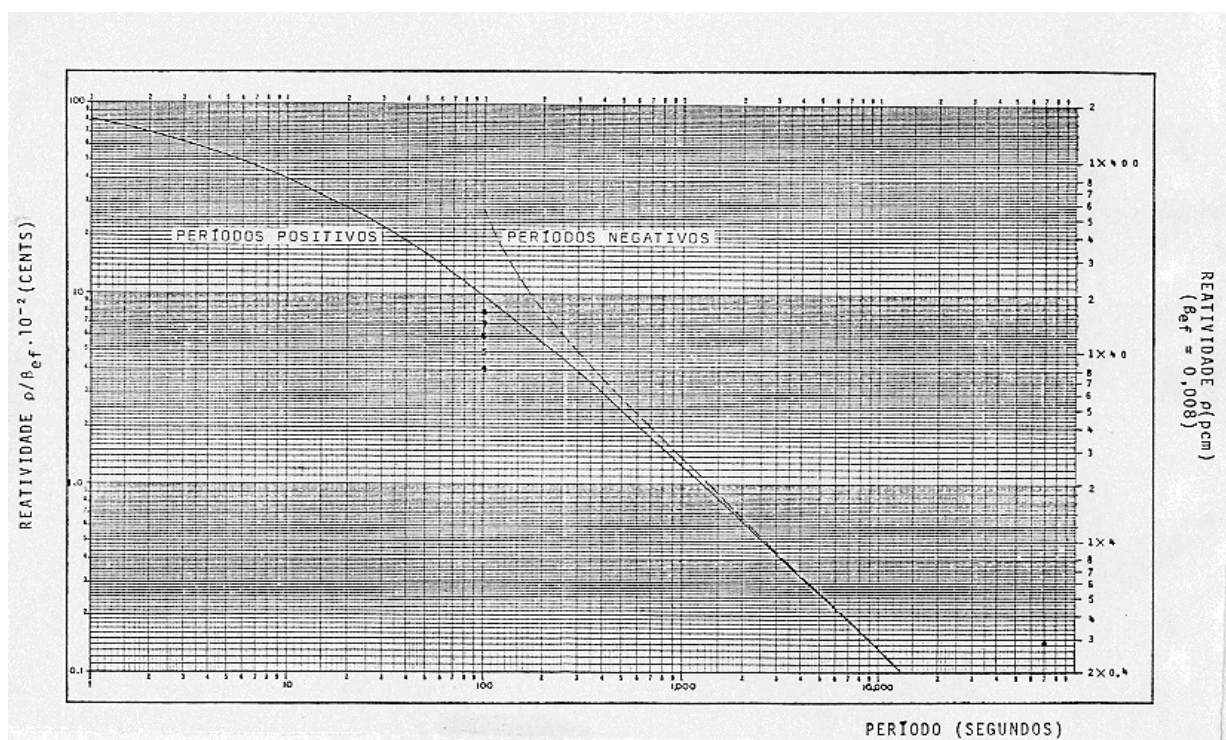


FIGURA 13 – Gráfico de Inhour (CDTN, 1997)

Historicamente, a unidade “inhour” é definida como a reatividade ρ_0 que corresponde a um período estável de 1 hora ($T=3.600s$). Portanto, 1 inhour corresponde a um crescimento de potência muito lento. A equação exponencial utilizada para o cálculo da variação da potência e a equação do Inhour são válidas apenas quando o período do reator for estável (constante).

A reatividade (ρ) é um número puro, adimensional. É usual, contudo, exprimi-la em termos de um valor fixo ρ . Neste caso, usam-se correntemente as unidades pcm (por cem mil) e \$ (dólar).

- Caso 1 - reatividade expressa em pcm (ρ pcm)

$$\rho_{\text{pcm}} = 10^5 \rho \quad (7)$$

Se, por exemplo, a reatividade é o valor de 0,0001 então, para expressar esta reatividade de forma mais prática, isto é, em pcm, multiplica-se o valor desta reatividade por 10^5 assim tem-se $0,0001 \times 10^5 = 10 \text{ pcm} = 10 \text{ por cem mil}$.

- Caso 2 - reatividade expressa em \$ (dólar) (ρ \$)

Pode-se também expressar a reatividade em \$ (dólar). Neste caso divide-se o valor puro de reatividade pelo valor do β efetivo (β_{ef}) que no caso do reator TRIGA-IPR R1 é 0,008, lembrando que o β_{ef} é o valor que leva em consideração a proporção de nêutrons de cada grupo dos nêutrons atrasados em relação ao número de nêutrons de fissão.

Desta forma tem-se (Equação 8):

$$\rho_{\$} = \frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} \quad (8)$$

Como exemplo:

Sendo uma reatividade $\rho = 0,0001$:

$$\text{Reatividade em \$} = \rho_{\$} = \frac{0,0001}{0,008} = 0,0125\$ \quad (9)$$

Assim, tem-se uma reatividade de 0,0125 \$ ou multiplicando-se por 100:

$$0,0125 \$ \times 10^2 = 1,25 \text{ cents.}$$

4.3.5 Tempo de duplicação (DT) e tempo de decuplicação (dt)

O período (T) de um reator caracteriza a taxa de crescimento relativo da população de nêutrons ao se introduzir uma reatividade, de forma que a cada intervalo de tempo igual a um período (T), a população de nêutrons cresce por um fator $e \cong 2.72$.

Por motivos práticos, usa-se também o chamado tempo de duplicação (D.T.), que é o tempo requerido para se duplicar a população de nêutrons ou a potência (Equação 10) ou para dividir por dois se estiver diminuindo.

$$DT=0,693 T \text{ ou } T=1,44 DT \quad (10)$$

Em alguns casos, como nos reatores de potência, usa-se também o tempo de decuplicação (d.t.) que é o tempo requerido para aumentar a população de nêutrons por um fator 10, (Equação 11).

$$d.t.=2,3 T \text{ ou } T=0,435 d.t. \quad (11)$$

4.3.6 Moderação

Moderação é o processo no qual ocorre a redução da energia dos nêutrons por meio de choques com núcleos mais leves, como o hidrogênio. Quando ocorre a fissão, os nêutrons saem com a energia de alguns MeV, entretanto para provocar novas fissões no ^{235}U o nêutron deve estar com a mesma energia do meio, ou seja, a mesma energia do núcleo que vai absorvê-lo na faixa de 0,1 eV. A probabilidade de ocorrer fissão no ^{235}U é muito maior para os nêutrons térmicos.

4.3.7 Coeficiente de temperatura

Qualquer variável que afete o valor do k_{ef} irá alterar o valor da reatividade ρ . Essas variações de reatividade produzidas por inserção ou retirada de barras de controle (absorvedoras) são necessárias para operação normal do reator e são feitas por comando externo. Entretanto, existem outros tipos de causas intrínsecas ao funcionamento do reator que provocam variações da reatividade (independente do controle humano), como por exemplo, a temperatura, a pressão, a formação de produtos de fissão etc.

No reator TRIGA IPR-R1, a partir de potência da ordem de 1 kW, a potência sobe e tende novamente a se estabilizar, ao invés de subir indefinidamente. Este comportamento é explicado pela perda de reatividade, provocada pelo aquecimento do elemento combustível durante a elevação da potência. A razão entre a variação da reatividade e a variação da temperatura do combustível é conhecida como *coeficiente pronto de temperatura*. No caso dos reatores TRIGA, em que se tem o combustível (^{235}U) misturado com o moderador (hidreto de zircônio), este coeficiente é negativo e a resposta é rápida aos aumentos de temperatura, tornando estes reatores inerentemente seguros. O valor negativo do coeficiente de temperatura deve-se principalmente a (LAMARSH & BARATTA, 2001):

- Perda de moderação devido à transferência de energia cinética dos átomos de hidrogênio para os nêutrons.
- Expansão térmica do moderador, os núcleos de hidrogênio ficam mais longe uns dos outros piorando a moderação e aumentando a probabilidade de fuga.
- Efeito Doppler, ocorre um alargamento dos picos de ressonância dos nêutrons, de forma que aumenta a possibilidade dos nêutrons prontos, que estão sendo moderados, serem capturados pelos núcleos de ^{238}U e produzirem plutônio, ao invés de serem moderados e produzirem novas fissões.

5 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

5.1 Generalidades

A rápida adoção dos computadores pessoais (Personal Computer – PC) nos últimos 20 anos propiciou uma revolução na instrumentação para simulação, teste, medição e automação. Um grande desenvolvimento resultante da presença do PC é o conceito de instrumentação virtual, o qual oferece vários benefícios para engenheiros e pesquisadores que buscam aumento na produtividade, na precisão e no desempenho.

Um instrumento virtual consiste em um computador industrial, ou uma estação de trabalho (*Workstation*), equipado com um *software* aplicativo e *hardware* adequado, como placas *plug-in* e *drivers*, que juntos desempenham as funções dos instrumentos tradicionais. Instrumentos virtuais representam uma revolução nos sistemas de instrumentação tradicionais, focados em *hardware* para sistemas centrados em *software* que exploram o poder computacional, a produtividade, a visualização gráfica e as funcionalidades de conectividade dos computadores de mesa e estações de trabalho. Embora o PC e a tecnologia de circuito integrado tenham proporcionado avanços significantes nas últimas duas décadas, é o *software* que realmente permitiu que esta plataforma de *hardware* fosse utilizada para criar instrumentos virtuais, oferecendo condições favoráveis para criar soluções inovadoras e reduzir significativamente os custos quando comparado com a instrumentação tradicional. Com instrumentos virtuais é possível construir sistemas de simulação e medição, que se adequam exatamente às necessidades (sistemas definidos pelo usuário), não se limitando às funções fixas dos instrumentos tradicionais (definido pelo fabricante), podendo com versatilidade construir suas aplicações.

As ferramentas de programação, *hardware* de aquisição de dados e o computador pessoal, são os componentes essenciais para instrumentação virtual. A sinergia entre eles oferece vantagens que não podem ser obtidas com a instrumentação tradicional.

Instrumentos tradicionais independentes, por exemplo, osciloscópios e geradores de forma de onda, são muito eficientes, porém são caros e projetados somente para desempenhar uma ou mais tarefas definidas pelo fabricante, porém o usuário geralmente não pode expandí-los ou personalizá-los. Os controles do instrumento, o circuito interno e as funções disponíveis para o usuário são inerentes ao instrumento. Além disso, tecnologias especiais e componentes de

custo elevado devem ser desenvolvidos para construir esses instrumentos, tornando-os muito caros e de adaptação lenta.

Instrumentos virtuais, por serem baseados em computadores, inerentemente tiram proveito das últimas tecnologias incorporadas a eles. Esses avanços tecnológicos em seu desempenho estão rapidamente cobrindo a lacuna entre instrumentos tradicionais e os PCs, incluindo potentes processadores, como o Intel Core 2 Duo[®], sistemas operacionais e tecnologias, como o Microsoft Windows XP[®] e Windows 7[®]. Além disso, oferecem fácil acesso a ferramentas fundamentais como a Internet. Os instrumentos tradicionais frequentemente apresentam falta de portabilidade, enquanto instrumentos virtuais implementados em *notebooks* incorporam automaticamente sua portabilidade natural.

Exceto por componentes e circuitos especializados encontrados nos instrumentos tradicionais, sua arquitetura geral é muito similar a de um instrumento virtual baseado em PC. Ambos requerem um ou mais microprocessadores, portas de comunicação (por exemplo, serial, USB e GPIB) e capacidade de apresentação de dados, bem como módulos de aquisição de dados. O que os tornam diferentes é a flexibilidade, ou seja, a possibilidade de modificar e adaptar o instrumento para necessidades particulares. Um instrumento tradicional pode conter um circuito integrado para desempenhar um conjunto particular de funções de processamento de dados. Em um instrumento virtual, essas funções são desempenhadas pelo *software* executado pelo processador do PC. Pode-se ampliar o conjunto de funções facilmente, limitado apenas pela capacidade computacional do *software* e do processador utilizado.

Existe uma grande variedade de dispositivos disponíveis que podem ser conectados ao computador ou acessados por meio de uma rede. Esses dispositivos oferecem uma grande variedade de funções de aquisição de dados com um custo significativamente mais baixo, quando comparado com dispositivos dedicados. Com o avanço tecnológico dos circuitos integrados, os componentes eletrônicos disponíveis comercialmente estão ficando cada vez mais baratos e versáteis, o mesmo acontecendo com as placas que os utilizam. Acompanham esses avanços tecnológicos, o aumento nas taxas de aquisição de dados, exatidão da medida, precisão e melhor isolamento do sinal.

Dependendo da aplicação, o *hardware* escolhido pode conter entrada ou saída analógica, entrada ou saída digitais, contadores, temporizadores, filtros, amostragem simultânea e

capacidade de geração de formas de onda. A ampla gama de placas e dispositivos poderia incluir qualquer uma destas funcionalidades ou uma combinação delas.

O *software* é o componente mais importante de um instrumento virtual. Com a ferramenta de *software* correta, engenheiros e pesquisadores podem, com extrema eficiência, criar suas próprias aplicações, projetando e integrando rotinas, que um processo em particular requer. Eles podem também criar uma interface de usuário apropriada que melhor se adéque à aplicação e àqueles que irão interagir com ela, definindo como e quando os dados são adquiridos, seu processamento, sua manipulação, seu armazenamento e como os resultados são apresentados ao usuário.

Com um *software* eficiente pode-se construir inteligência e capacidades de tomada de decisão para o instrumento, de modo que ele se adapte, ou quando o sinal medido muda inadvertidamente, ou quando mais ou menos o poder de processamento é exigido.

Uma importante vantagem que o *software* fornece é a capacidade de trabalhar em módulos. Quando se deparam com um projeto grande, desenvolvedores geralmente abordam a tarefa quebrando-a em unidades funcionais solucionáveis. Essas subtarefas são mais gerenciáveis e fáceis de testar, reduzindo as dependências que podem causar um comportamento inesperado. Pode-se projetar um instrumento virtual para solucionar cada sub tarefa e, então, integrá-las como um sistema completo para solucionar a aplicação maior. A facilidade com a qual se pode realizar essa divisão de tarefas depende muito da arquitetura do *software* subjacente.

Um instrumento virtual não está limitado a um único PC. De fato, com os recentes desenvolvimentos em tecnologias de rede e Internet é muito comum instrumentos utilizarem o poder de conectividade para compartilhar tarefas. Exemplos típicos incluem supercomputadores, dispositivos de monitoramento e controle, bem como visualização de dados ou resultados de múltiplas localidades.

5.2 Interação Humano-Computador e Usabilidade

Para que o uso de aplicativos desenvolvidos seja eficiente e eficaz, deve-se considerar a interface humano-computador dos sistemas computacionais. Esta interface influencia na satisfação, no conforto e eficiência dos usuários, nos custos de treinamentos, no suporte técnico e na operação e, em alguns casos, na própria segurança da instalação e dos operadores.

Usabilidade é um termo usado para definir a facilidade com a qual os usuários podem utilizar uma ferramenta ou objeto a fim de realizar uma tarefa específica e importante. Na interação humano-computador e na ciência da computação, usabilidade normalmente refere-se à simplicidade e à facilidade com que uma interface ou um programa de computador pode ser utilizado. A usabilidade está diretamente relacionada à capacidade do *software* em permitir que o usuário alcance suas metas de interação com o sistema (ISO, 1997).

5.2.1 Estratégia de desenvolvimento da interface

O desenvolvimento de uma, toda e qualquer interface com o usuário, deve permitir a realização de sucessivos ciclos de “análise/concepção/testes”, com a necessária retroalimentação dos resultados dos testes, de um ciclo a outro. A estratégia consiste em, a cada ciclo, identificar e refinar continuamente o conhecimento sobre o contexto de uso do sistema e as exigências em termos de usabilidade da interface. Na sequência dos ciclos constroem-se versões intermediárias da interface do sistema que são submetidas a testes de uso, em que os usuários simulam a realização de suas tarefas. Inicialmente, eles participam de simulações grosseiras da interface e com o avanço do desenvolvimento recorre-se à protótipos e versões acabadas do sistema, em simulações cada vez mais fidedignas. O objetivo é avaliar a qualidade das interações e levar em conta os resultados dessas avaliações para a construção de novas versões das interfaces. Se implementada desde o início do desenvolvimento, esta estratégia pode reduzir o risco de falhas conceituais do projeto, garantindo que, a cada ciclo, o sistema responda cada vez melhor às expectativas e às necessidades dos usuários em suas tarefas (ISO, 1999).

Existem diversos modos de apresentar as informações, sendo que para cada situação deve haver uma modalidade mais adequada. A escolha da modalidade depende das necessidades como:

- Natureza da informação – Simples ou complexa;
- Tipo de informação - Qualitativa ou precisa;
- Apresentação da informação – Qualitativa ou faixas de operação;
- Uso da informação – Imediato ou médio prazo;
- Domínio da informação - Exclusiva, privada ou pública;
- Acesso à informação - Para especialistas ou leigos;
- Receptor da informação – Fixo ou móvel;

➤ Características ambientais – Iluminação, ruído etc.

Uma cuidadosa análise da tarefa pode fornecer as diretrizes para esta seleção. Isso pode levar à escolha entre mostradores visuais ou auditivos, dependendo das características da informação, posição do receptor em relação à fonte e das condições ambientais. Por exemplo, se a natureza da informação for complexa e o ambiente ruidoso, recomenda-se informação visual. Contudo, se o receptor ficar andando ou se a situação exigir uma ação imediata, a modalidade auditiva será a mais indicada (IIDA, 2005).

5.2.2 O uso de cores

As cores são muito importantes no desenvolvimento de interfaces gráficas, porque elas causam impacto e despertam o interesse pela informação contida em documentos e gráficos, sendo que a cor é a primeira coisa que os usuários observam no aplicativo, mesmo antes de utilizá-lo. As cores nem sempre são mostradas da mesma maneira como foram projetadas, diferindo de um dispositivo para outro, devido a vários fatores envolvidos na geração da cor, como por exemplo, a iluminação, contraste, forças magnéticas, brilho, entre outros (IIDA, 2005).

A cor é um importante fator auxiliar no processo de comunicação porque ela contribui das seguintes formas:

- enfatiza informações importantes;
- identifica estruturas e subdivisões;
- retrata objetos naturais de forma realista;
- apresenta o tempo e o progresso de uma operação;
- propicia melhor captação de memória;
- reduz erros de interpretação;
- aumenta a compreensão;
- aumenta a credibilidade e a aparência;
- visando o processo de aprendizado, a cor é mais eficiente do que o preto/branco.

5.2.3 Configuração de telas de Software

Segundo diferentes estudos realizados, alguns parâmetros básicos devem ser levados em consideração na configuração das telas em salas de controle, como a densidade da informação nas telas; sua codificação e seu agrupamento. Estes parâmetros orientam a definição geral da configuração, que deverá ainda, durante seu desenvolvimento, ser testada com os operadores (SANTOS & ZANBERLAN, 1992).

A Ergonomia possui hoje um ferramental para avaliação das configurações de programas. Utilizando pré-testes é possível aprimorar o diálogo do ser humano com o computador e reduzir, em muito, o tempo de aprendizagem.

Seis fatores devem ser respeitados para obter-se boa configuração das telas:

- A lógica da sequência - Respeitar a lógica do operador na atividade que será cumprida e não impor a lógica rígida do programa.
- O espaço - Prever espaços e pontos de referência para reagrupar as informações em unidades de informação, aumentando a quantidade de informação tratada na unidade de tempo. O congestionamento de informações na diagramação da tela implicará em erros.
- A pertinência da informação retida - Uma das causas do congestionamento é o desejo do projetista em querer colocar todas as informações na tela. O objetivo é o de reduzir a informação ao que é pertinente ao sujeito e à tarefa exercida.
- A consistência - Trata-se da coerência interna das representações utilizadas no interior de cada tela e entre as telas.
- O agrupamento - Trata do agrupamento sobre a tela dos itens e dados em inter-relação.
- A simplicidade - As telas devem ser simplificadas ao máximo. Isto não significa dizer que elas não podem ter um nível alto de complexidade ou de detalhes, mas somente quando a tarefa exige. Pode ser útil prever uma estruturação de formatos, indo do mais geral e simplificado ao mais detalhado.

Na configuração das telas devem-se respeitar as seguintes regras:

- Adaptação às características da população.
- Ligação da informação com ação - Os comandos e informações relativos a uma mesma manobra devem estar próximos.
- Verificação - O agrupamento das informações deve favorecer o diagnóstico, quer dizer, facilitar a identificação das configurações significativas.
- Evidenciar a informação - As informações mais importantes para a segurança e as informações mais consultadas devem se encontrar nas zonas frequentemente percorridas pelos olhos na tela (quarto superior esquerdo, se a tela contém numerosas informações e, na parte central, se a tela não tem muitas informações).
- Regra de homogeneidade - As convenções utilizadas devem ser as mesmas para os dispositivos equivalentes:
 - Mesma estratégia de exploração visual;
 - Mesma graduação para todos os registradores, correspondendo a mesma mínima e máxima;
 - Mesmo sentido de variação;
 - Mesmas abreviações.
- Divisão das informações na tela - A divisão das informações por telas é fundamental no controle do processo. Se essa divisão for mal feita os operadores terão que trocar várias telas durante a resolução de um problema, o que é fonte de fadiga visual, impondo grande esforço de memorização e tornando difícil a constituição da representação do estado da unidade. Devem-se detectar as ligações funcionais entre as informações, em relação à atividade dos operadores.

5.3 O LabVIEW e a Instrumentação Virtual.

O LabVIEW[®] é o *software* da National Instruments (2010), que foi desenvolvido para controle e monitoração de processos, aquisição de dados e simulação, por meio de instrumentação virtual, entre outras aplicações.

5.3.1 Características gerais

O LabVIEW[®] é adequado para trabalhos na área da instrumentação virtual porque ele fornece um ambiente de desenvolvimento de aplicações de fácil uso, projetado especificamente para atender às necessidades dos usuários. Por meio de funcionalidades, ele pode ser facilmente integrado a uma grande variedade de plataformas de *hardware* ou *software*. Ao desenvolver o *software* de um instrumento virtual, alta produtividade é garantida porque o ambiente de desenvolvimento gráfico, LabVIEW[®], possui forte integração com *hardware*. Projetado para desenvolvimento de sistemas de testes, de simulação de medição e de controle, o *software* de instrumentação virtual inclui ampla funcionalidade para entradas e saídas de qualquer tipo.

Software de instrumentação virtual requer ferramentas abrangentes de análise e processamento de sinal, porque a aplicação não está concluída com a aquisição dos dados. Aplicações de medição em alta velocidade em sistemas de monitoramento de máquinas e sistemas de controle normalmente requerem análise de ordem para avaliação dos dados de vibração. Controle em malha fechada pode precisar de médias ponto-a-ponto para controlar algoritmos e manter a estabilidade. Além disso, para bibliotecas de análises avançadas, já inclusas no LabVIEW[®], existem pacotes adicionais de *software*, como os *toolkits* LabVIEW[®] *Signal Processing*, o LabVIEW[®] *Sound and Vibration* e o LabVIEW[®] *Order Analysis* para complementar as análises disponíveis.

O LabVIEW[®] possui bibliotecas prontas para integrar instrumentos tradicionais, dispositivos de aquisição de dados, controle de movimento, sistemas de visão, dispositivos GPIB/IEEE 488 e serial/RS-232, controladores lógicos programáveis CLPs, entre outros, para construir uma solução completa de medição e automação. Ele também incorpora os maiores padrões de instrumentação como o VISA, um padrão para GPIB, serial, e instrumentação VXI, PXI e *software* e *hardware* baseados no padrão CompactPCI do PXI Systems Alliance; drivers IVI para instrumentação virtual intercambiável; e VXI *plug&play*, um *driver* padrão para

instrumentos VXI. Adicionalmente oferece funcionalidades para incorporar *software* ActiveX, *dynamic link libraries* (DLLs) e bibliotecas compartilhadas (*shared libraries*) de outras ferramentas. Além disso, pode-se compartilhar códigos desenvolvidos em LabVIEW® como uma DLL, executável ou usando ActiveX. Existe uma variedade de opções para comunicação e padrões de dados, como TCP/IP, conectividade com banco de dados SQL e formato de dados XML (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010). Um grande número de fabricantes de *hardware* e *software* desenvolve e mantém centenas de bibliotecas e *drivers* de instrumentos para ajudar o usuário a facilmente utilizar seus produtos com LabVIEW®.

5.3.2 Vantagens

O LabVIEW® oferece aos usuários ambiente gráfico de programação interativo e objetivo, sendo possível projetar instrumentos virtuais personalizados, criando uma interface gráfica para o usuário na tela do computador por meio da qual é possível:

- operar o programa de instrumentação,
- controlar o *hardware* selecionado,
- analisar os dados adquiridos e
- exibir resultados.

A maioria dos sistemas computacionais utiliza alguma variação do sistema operacional Microsoft Windows. No entanto, outras opções oferecem claras vantagens para certos tipos de aplicações. O desenvolvimento em tempo real continua a crescer rapidamente na maioria das indústrias, ao passo que o poder computacional vem sendo oferecido em produtos cada vez menores e mais especializados. Minimizar perdas resultantes da troca para uma nova plataforma é importante e escolher o *software* certo para este propósito é um fator-chave.

O LabVIEW® reduz esta preocupação porque é compatível com a maioria dos sistemas operacionais e também compila código para execução no sistema operacional de tempo real ETS Pharlap da VenturCom e VxWorks da Wind River Systems pelo Módulo LabVIEW® Real-Time. Dada a importância de sistemas legados, a National Instruments (2010) continua a disponibilizar versões antigas deste *software* para sistemas operacionais Windows. Os instrumentos virtuais desenvolvidos em uma plataforma podem ser portados para qualquer outra plataforma LabVIEW® simplesmente abrindo o instrumento virtual (exceto funções que não são compatíveis com o sistema operacional de destino).

Estas aplicações são portáteis entre plataformas, o que permite que o trabalho desenvolvido hoje seja aplicável no futuro. À medida que novas tecnologias computacionais emergem, migrar aplicações para novas plataformas e sistemas operacionais torna-se uma tarefa simples e sem grandes desafios. Portanto, como os instrumentos virtuais criados independem da plataforma, o usuário reduz o tempo de adequação.

Podem-se desenvolver facilmente aplicações distribuídas com LabVIEW[®], mesmo em diferentes plataformas. Com ferramentas de servidor de fácil manuseio, podem-se distribuir tarefas de processamento intenso para outras máquinas para execução mais rápida, ou para criar aplicações de monitoramento remoto e controle. Tecnologias de servidores podem simplificar o desenvolvimento de grandes aplicações executadas em múltiplos computadores. Além disso, ele inclui tecnologias de padrão de redes como TCP/IP e incorpora também um protocolo robusto chamado de *Publish and Subscribe Protocol* (PSP).

Ele possui centenas de ferramentas integradas de visualização para apresentar os dados na interface de usuário do instrumento virtual para mapeamento e gráficos, bem como visualização 2D e 3D. O usuário pode reconfigurar instantaneamente atributos da apresentação de dados, como cores, tamanho da fonte, tipos de gráficos, entre outros, bem como rotacionar dinamicamente e utilizar recursos como *zoom* e *pan* nesses gráficos, com o mouse (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

6 METODOLOGIA

Na FIG.14 apresenta-se o fluxograma que descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do *Sistema Simulador TRIGA*.

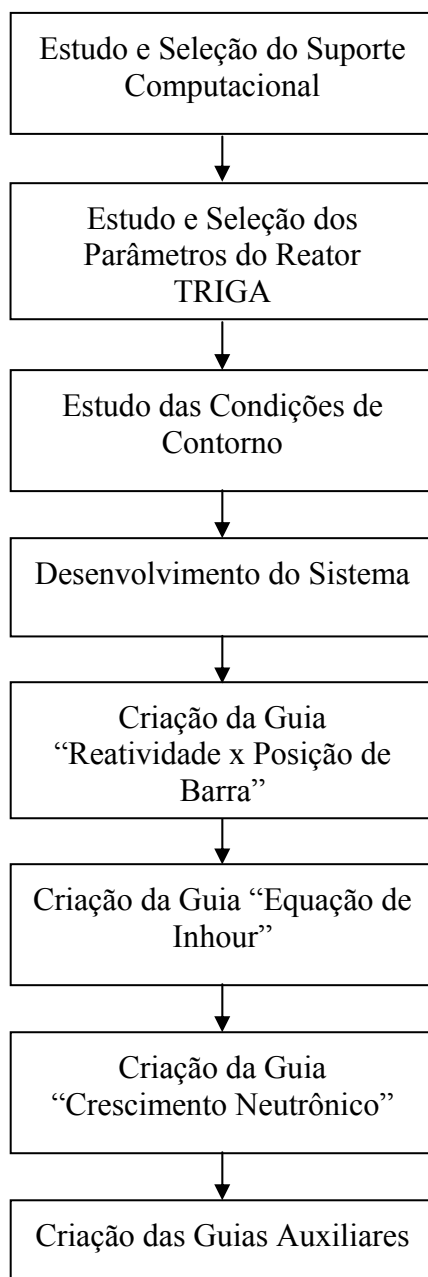


FIGURA 14 – Fluxograma da metodologia usada no desenvolvimento do Sistema Simulador TRIGA

6.1 Estudo e Seleção do Suporte Computacional

Nos estudos iniciais para o desenvolvimento deste trabalho, a ferramenta utilizada foi o software InduSoft Web Studio, que é uma coleção de ferramentas de automação que possibilita o desenvolvimento de aplicações IHM (Interface Homem-Máquina), e SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para sistemas de instrumentação. O supervisor InduSoft Web Studio com sua tecnologia Web possibilita a monitoração e controle de instalações industriais, como também possui a vantagem de conexões via internet por meio de protocolo TCP-IP. Testes preliminares haviam sido desenvolvidos utilizando um sistema de aquisição de dados composto por fonte de alimentação, dois conversores, um analógico digital modelo ADAM 4018 e um do padrão 485/232 modelo ADAM 4520, ambos desenvolvidos por Advantech (1998 a, b) e o *software* sistema supervisor InduSoft Web Studio desenvolvido pela InduSoft (2004). (GUZELLA, 2010). Entretanto esta ferramenta trabalha com *hard key* e licença dedicada para cada aplicação, o que dificultou a utilização deste recurso

O CDTN adquiriu o software LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*), versão 8.6, desenvolvido pela National Instruments, (2007). Para uso em diversos laboratórios e instalações e, por ser compatível com os sistemas computacionais adotados no CDTN, adquiriu-se licença para utilização em 50 computadores. Além de ser o software mais utilizado hoje em dia para monitoração, controle, simulação e aquisição de dados em aplicações industriais e em controle de reatores (PEDERSON, 2005; TIGLIOLE, 2008), é compatível com os modernos sistemas operacionais como, por exemplo, Windows XP e Seven. Para melhorar o entendimento e o uso das potencialidades do LabVIEW® foram feitos cursos de treinamento.

Devido a este cenário, adotou-se o uso do LabVIEW® para o desenvolvimento deste trabalho, que oferece controle direto do hardware das placas de aquisição de dados. Ele é programado com uma série de ícones gráficos, os quais são conectados com “fios”. A combinação das Placas DAQ (Data Acquisition) adequadas e este *software* possibilitam a criação de instrumentos virtuais (VI – *Virtual Instrument*). Um VI desempenha funções semelhantes aos instrumentos tradicionais e é programado via *software* com flexibilidades e vantagens de manipulação, apresentação e registros dos dados que estão sendo medidos ou simulados.

Os ícones no LabVIEW[®] representam controles e funções disponíveis nos menus do *software*, chamado de programação visual, quebrando o paradigma da linguagem de programação baseada em texto, para uma programação baseada em ícones. A interface do usuário consiste em duas partes, que são o painel frontal e o diagrama de blocos, semelhante aos instrumentos tradicionais, que possuem um painel frontal e a placa de circuito impresso na qual está o circuito eletrônico. No painel frontal do LabVIEW[®] podem-se criar os botões de controles, chaves, *leds* indicadores e *displays* gráficos para apresentar os dados, enquanto que no diagrama de blocos residem os blocos que, adequadamente interligados, constituem o circuito eletrônico.

Pode-se, assim, personalizar os painéis frontais com botões, seletores e gráficos para emular painéis de controles de instrumentos tradicionais, criar painéis de testes personalizados ou representar visualmente o controle e a operação dos processos, como apresentado na FIG. 15. A similaridade entre o padrão de fluxogramas e programas gráficos reduz a curva do aprendizado, diferentemente das tradicionais linguagens de programação em texto.

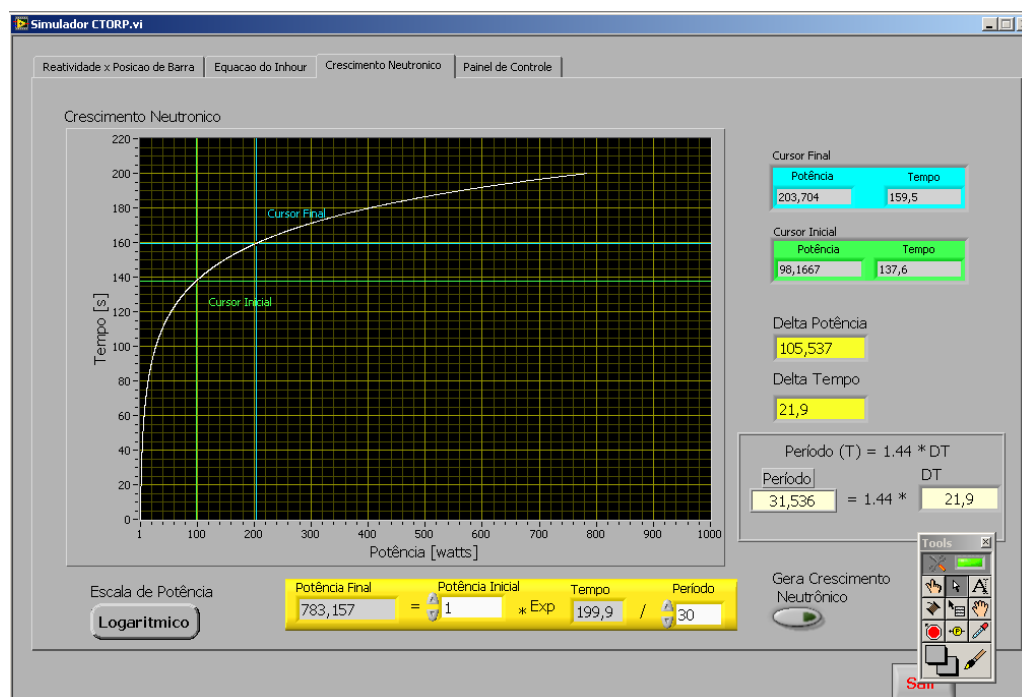


FIGURA 15 – Painel frontal de um instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW

O comportamento dos instrumentos virtuais é determinado conectando-se os ícones para criar diagramas de blocos, como na FIG. 16, que é uma notação natural de projetos desenvolvidos em LabVIEW[®]. Com a programação gráfica podemos desenvolver sistemas com maior

velocidade do que com linguagens de programação convencionais, mantendo o poder e flexibilidade necessários para criar uma variedade de aplicações.

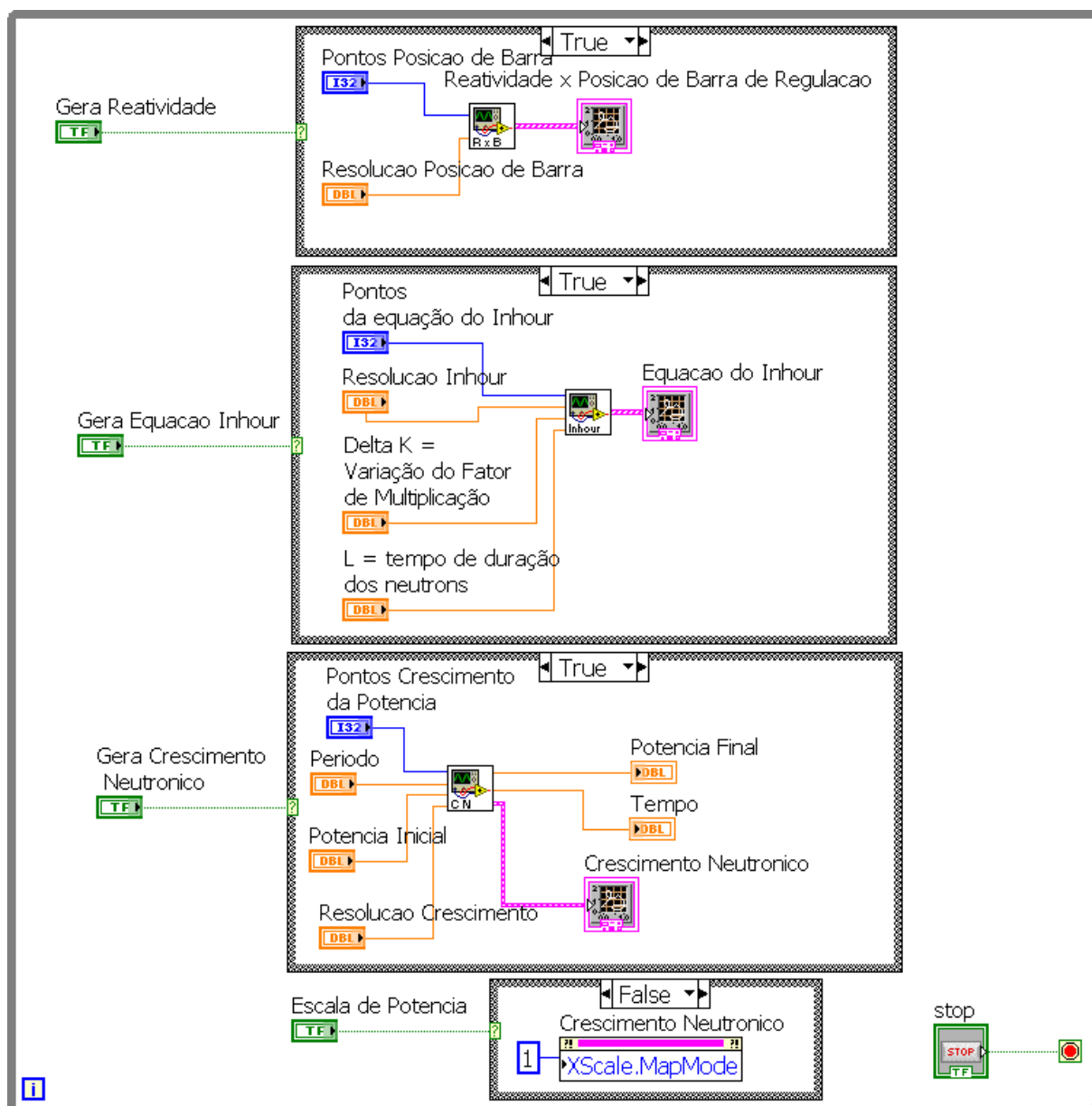


FIGURA 16 – Diagrama de blocos de um instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW

Um *Virtual Instrument* (VI) também possui funções matemáticas e pode calcular a média, desvio padrão e apresentá-los graficamente, possui alarmes que podem ser configurados, indicando ao usuário o status do processo, e realizar o armazenamento dos dados em arquivos para análise posterior. O LabVIEW® pode ser usado para realizar a simulação de sistemas e ele contém infinitos recursos como filtros, processamento de sinal digital e funções estatísticas.

6.2 Estudo e Seleção dos Parâmetros do Reator TRIGA

Em fevereiro e março de 2009, foram realizados experimentos neutrônicos coordenados por Souza (2009) no reator IPR-R1. Além destes foram acompanhadas várias operações do reator IPR-R1, para a familiarização com os diversos parâmetros e características deste reator.

Após o estudo detalhado dos diversos parâmetros relativos à operação do reator TRIGA IPR-R1, foram selecionados os parâmetros operacionais e os conceitos necessários ao desenvolvimento de um programa para a simulação do crescimento neutrônico do reator TRIGA IPR-R1, com o objetivo de contribuir para o entendimento de como se comportam estes parâmetros e os eventos associados aos mesmos. Foram escolhidos para este trabalho o crescimento neutrônico do canal linear e do canal logarítmico; o posicionamento da barra de Regulação no reator; a reatividade inserida no reator; o tempo de dobramento (DT) e o Período (T); a equação do Inhour e a influência do efeito da temperatura no processo.

6.3 Condições de Contorno Essenciais para o Uso do Sistema Simulador TRIGA

No uso desta interface humano-máquina (IHM), desenvolvida usando o software LabVIEW®, é essencial para esta simulação levar em consideração algumas características inerentes ao estudo dos parâmetros neutrônicos que são:

- A equação do Inhour, que relaciona a reatividade (ρ) inserida em reatores, que estão críticos, ou seja, com potência estacionária, na qual reatividade (ρ) = 0 e o fator de multiplicação de nêutrons $k = 1$, com o período (T).
- Que a barra de Segurança se encontre totalmente extraída do reator (posição superior), condição exigida para a operação do reator. Ela possui reatividade suficiente para produzir o *scram* (desligamento) do reator e pode ser movimentada da posição 150 até a posição 890.
- Que a barra de Controle esteja fixa em uma posição intermediária, por exemplo, a posição 500 (condição esta que permite a partida do reator), considerando que ela pode ser movimentada da posição 161 até a posição 890.

- Finalmente, considera-se um limite máximo de potência da ordem de 1 kW, porque após este valor ou nível de potência começa a aparecer no processo o efeito da temperatura, introduzindo reatividade negativa, o qual interfere significativamente no crescimento neutrônico. Este valor limítrofe é adotado somente didaticamente, considerando que o efeito da temperatura pode começar a interferir no processo um pouco antes ou um pouco depois de 1 kW.

6.4 Desenvolvimento do Programa

Na metodologia para a elaboração do *Sistema Simulador TRIGA*, usando o LabVIEW®, foram desenvolvidos os diversos VIs que compõem este programa. Inicialmente, desenvolveram-se os VIs com as curvas usadas na aplicação que foram: o VI que contém a equação da curva integral, relacionando a posição da barra de Regulação com a reatividade inserida por ela no processo; o VI com a curva de Inhour, específica para cada reator, relacionando a reatividade com o período do reator; e o VI com a equação que simula o crescimento neutrônico, tanto para o Canal Linear, como para o Canal Logarítmico. Além destes, foram desenvolvidos diversos outros, por exemplo, os VIs que fazem o gerenciamento da guia “controle das barras” e da guia “painel de controle”, que interligados e associados corretamente, por meio de um mecanismo chamado “estrutura de eventos”, possibilitam o controle de todo o programa.

6.4.1 Guia “Reatividade x Posição da Barra de Regulação”

Segundo Souza (2009), o conhecimento da resposta do reator a movimentos específicos das barras de controle é essencial para a operação segura e eficiente de um reator nuclear. Movimentos de barras de controle são usados para compensar variações resultantes da queima de combustível, transientes devido ao surgimento de produtos de fissão, principalmente, ao envenenamento por xenônio, variações de temperatura no reator, etc. Barras de controle calibradas permitem a determinação da reatividade associada a tais variações nas condições dentro do reator. A reatividade total da barra é a reatividade correspondente à extração completa da mesma.

Um destes experimentos realizados foi a calibração da barra de Regulação, que relaciona a sua posição com a reatividade inserida por ela. Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados da Barra de Regulação (SOUZA, 2009)

Barra de Regulação		
Posição	Reatividade (cents)	$\Delta\rho$
171	0,0	0,0
269	3,8	3,8
368	10,5	6,7
449	17,6	7,1
507	23,4	5,8
567	30,3	6,9
627	38,5	8,2
699	45,5	7,0
798	50,0	4,5
890	51,8	1,8

Condições para a realização deste experimento:

- Configuração do Núcleo: núcleo com 63 elementos combustíveis
- Barra calibrada: Regulação
- Barra de Segurança: UP (totalmente extraída)
- Curso da barra de Regulação: 171 – 890; Ponto médio: 531
- Reator crítico na potência de 25 W

De posse destes dados experimentais, obteve-se por meio do software Math Cad[®], a equação que melhor descreve o ajuste para estes pontos, com o respectivo coeficiente de correlação R^2 , como mostrado na Equação 12:

$$R = -3,2015610^{-7} \cdot x^3 + 5,0244910^{-4} \cdot x^2 - 0,15009 \cdot x + 13,11092 \quad (12)$$

$$R^2 = 0,99817$$

No diagrama de blocos do VI, que gera a curva relacionando reatividade e posição de barra, inseriu-se a Equação 12 (FIG.17). Nesta guia foram também implementados cursores e indicadores que informam ao usuário a simulação da reatividade inserida pela barra de Regulação em função do reposicionamento parcial da mesma, em qualquer posição em que esta for colocada, cujo diagrama de blocos controlador deste evento é mostrado na FIG.18.

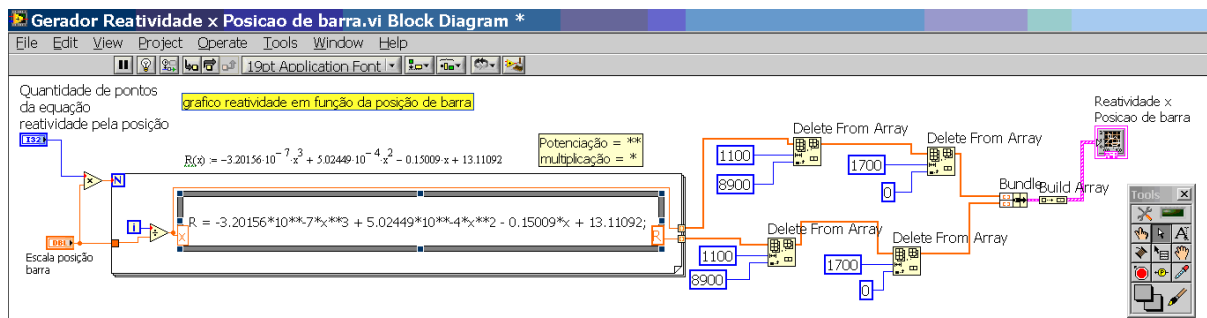


FIGURA 17 – Diagrama de blocos do VI gera curva da reatividade x posição de barra

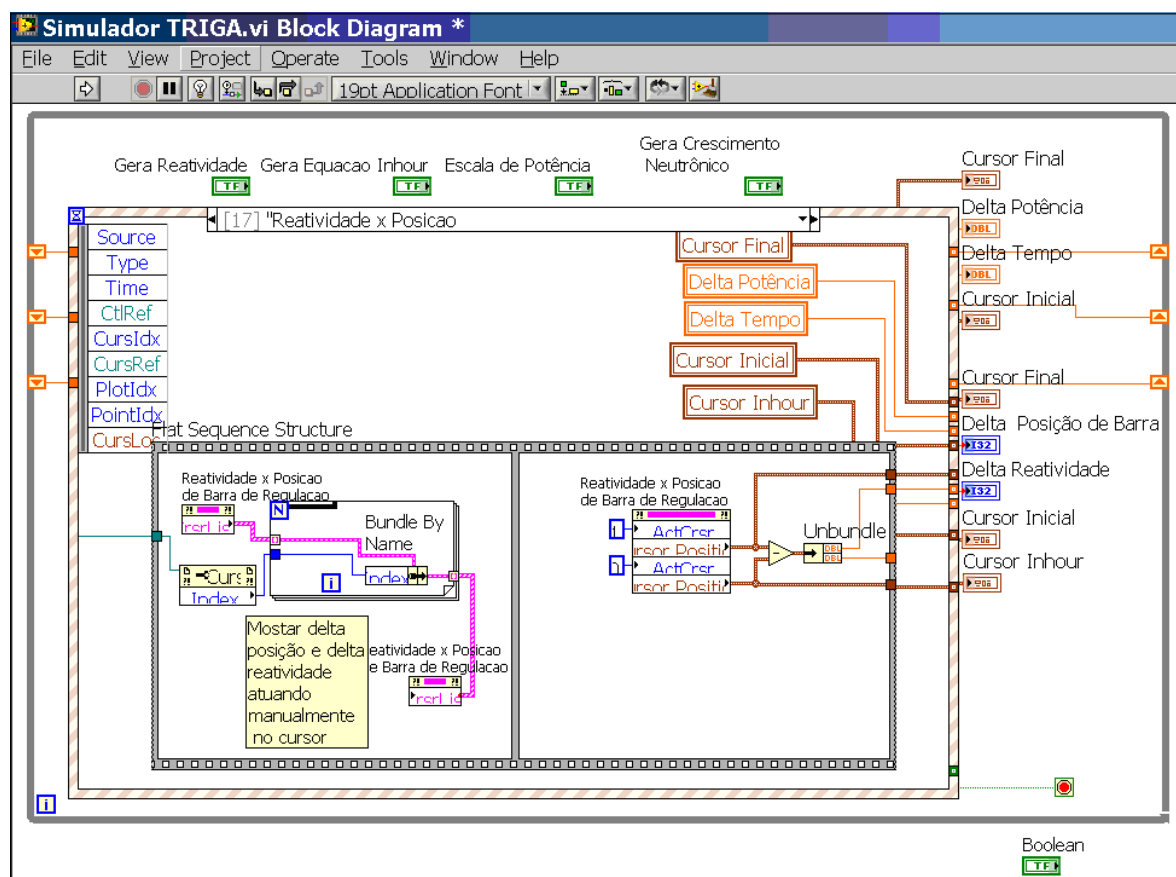


FIGURA 18 – Diagrama de blocos do evento que controla o reposicionamento da barra de Regulação

6.4.2 Guia “Equação do Inhour”

A “*equação do inhour*” é um gráfico essencial na operação dos reatores nucleares. Esta equação foi digitalizada pelo sistema desenvolvido, possibilitando ao usuário obter a velocidade do aumento do fluxo de nêutrons em função da reatividade inserida no processo. Lembrando que esta equação é válida somente para a condição de inserção de reatividade a

partir da criticalidade do reator, ou seja, com a potência estacionária, que como já vimos no item 4.3.4 é fornecida pela equação (6):

$$\rho = \frac{\ell}{T(1 + \delta k)} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (6)$$

A equação do Inhour leva em consideração o tempo médio ℓ que separa duas gerações consecutivas de nêutrons, que no caso do reator TRIGA IPR-R1 é de 100 μ s, a variação do fator de multiplicação de nêutrons (δk), que neste caso considera-se como sendo o valor de 0,001, sendo que estes valores podem ser configurados na tela “painel de controle” do programa. Foram inseridos também neste diagrama de bloco os dados dos seis grupos efetivos de nêutrons atrasados, considerados para o reator TRIGA IPR-R1, como foi mostrado anteriormente na TAB. 1 e pode ser visto no diagrama de blocos da FIG.19.

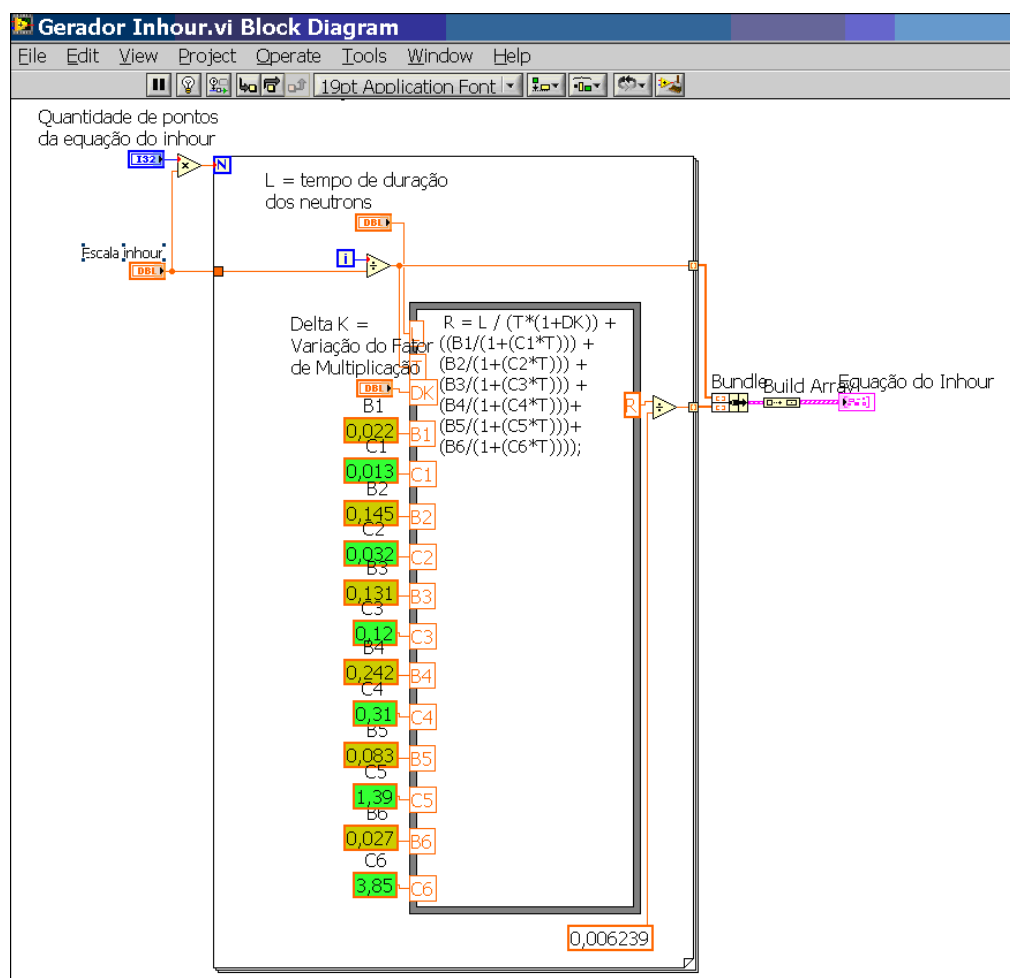


FIGURA 19 – Diagrama de blocos do VI que gera a curva do Inhour

Por meio do uso do cursor e indicadores implementados nesta guia, cujo diagrama de blocos é mostrado na FIG. 20, o usuário obtém a simulação da reatividade em função do período e vice-versa.

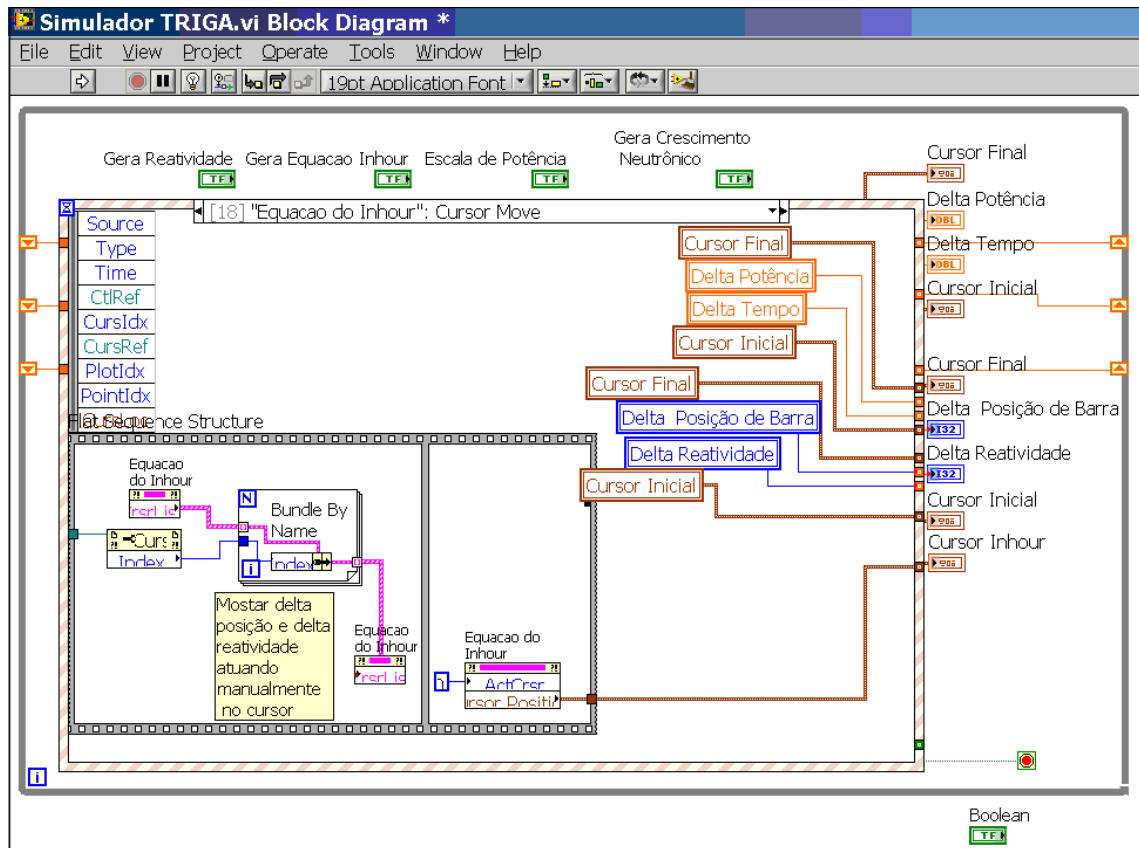


FIGURA 20 – Diagrama de blocos do evento que controla o cursor da curva de Inhour.

6.4.3 Guia “Crescimento Neutrônico”

Considerando que todos os nêutrons produzidos por fissão têm uma mesma duração média ℓ , (e considerando que o efeito temperatura ainda não está interferindo no processo), o crescimento neutrônico pode ser dado pela Equação (1):

$$N(t) = N_0 \times e^{t/T} \quad (1)$$

Na qual:

- $N(t)$ = fluxo de nêutrons ou a potência final.
- N_0 = fluxo de nêutrons ou a potência inicial.
- e = função exponencial.
- t = tempo em segundos para que a potência aumente de N_0 para N .
- T = período estável em segundos.

Na FIG. 21 é apresentado o diagrama de blocos do VI “Gerador Crescimento Neutrônico”, no qual foi inserida a Equação 1. Observa-se que nas telas “Crescimento Neutrônico” foram implementados cursores e indicadores, para o usuário observar e analisar o tempo de dobramento (DT) da potência, recurso utilizado por questões práticas, e o Período (T), cujo respectivo diagrama de blocos pode ser visto na FIG. 22.

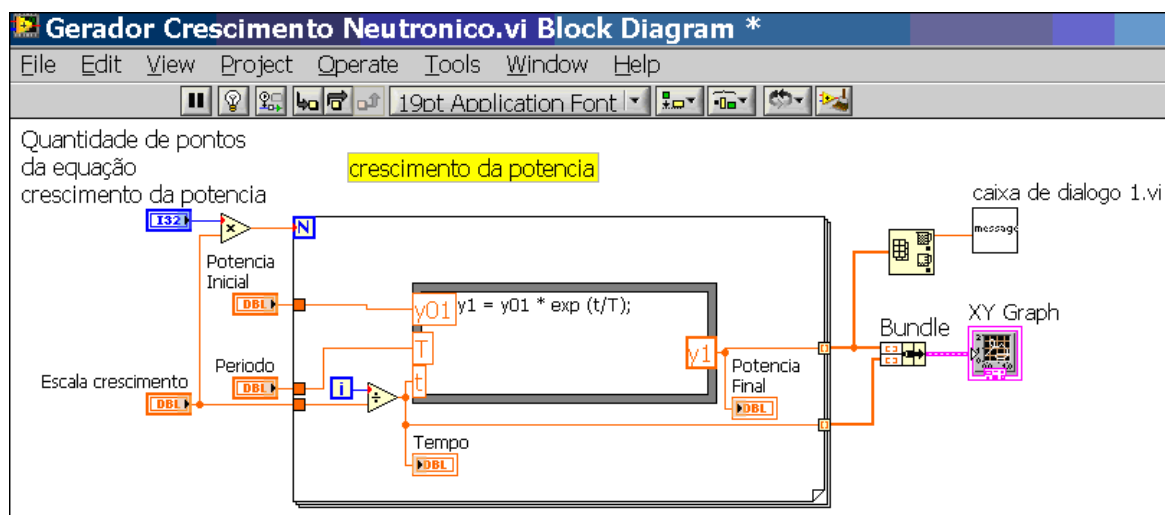


FIGURA 21 – Diagrama de blocos do VI gerador crescimento neutrônico

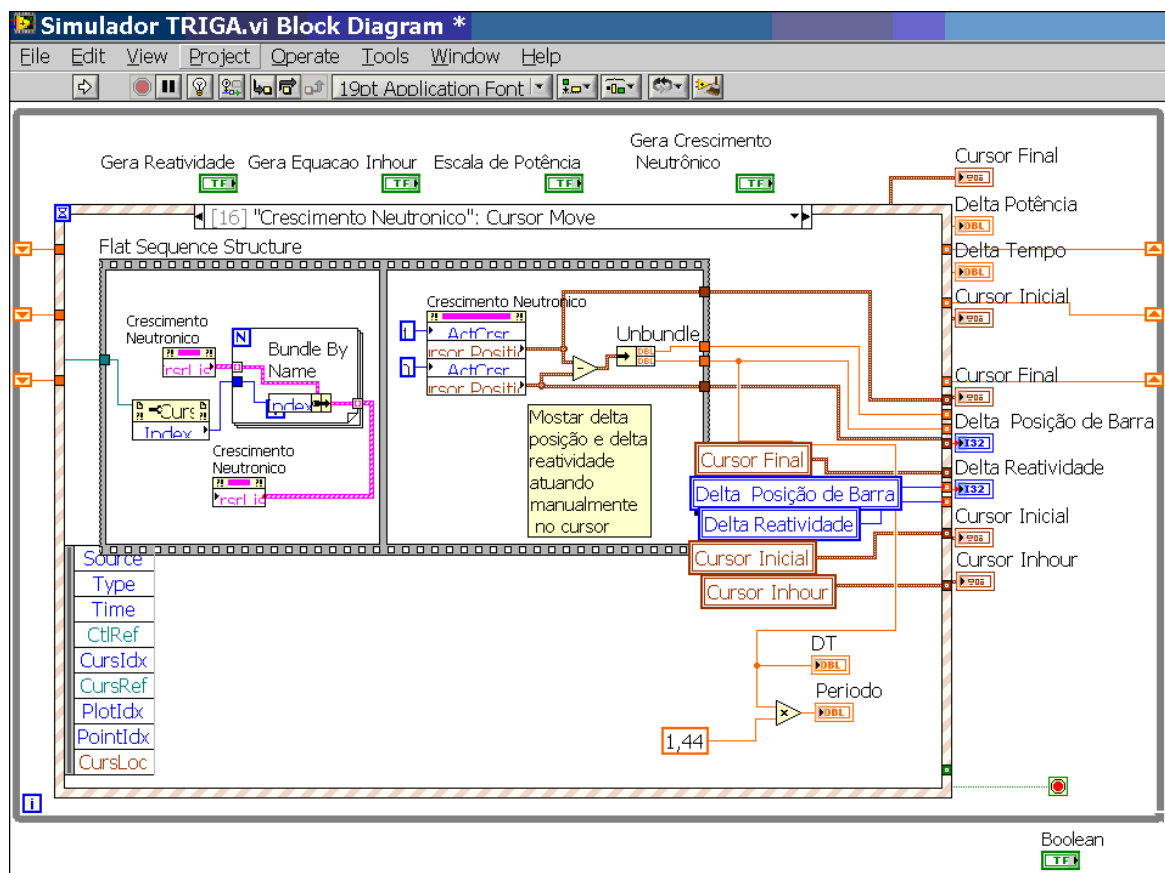


FIGURA 22 – Diagrama de blocos do evento que gerencia cursores no VI Crescimento Neutrônico

Na mesma tela, do painel frontal, no qual é apresentado o crescimento neutrônico, o usuário poderá escolher entre a apresentação do gráfico do canal linear ou do canal logarítmico ao clicar no botão de controle “Escala de Potência”, cujo diagrama de blocos desenvolvido foi implementado e está apresentado no (FIG. 23).

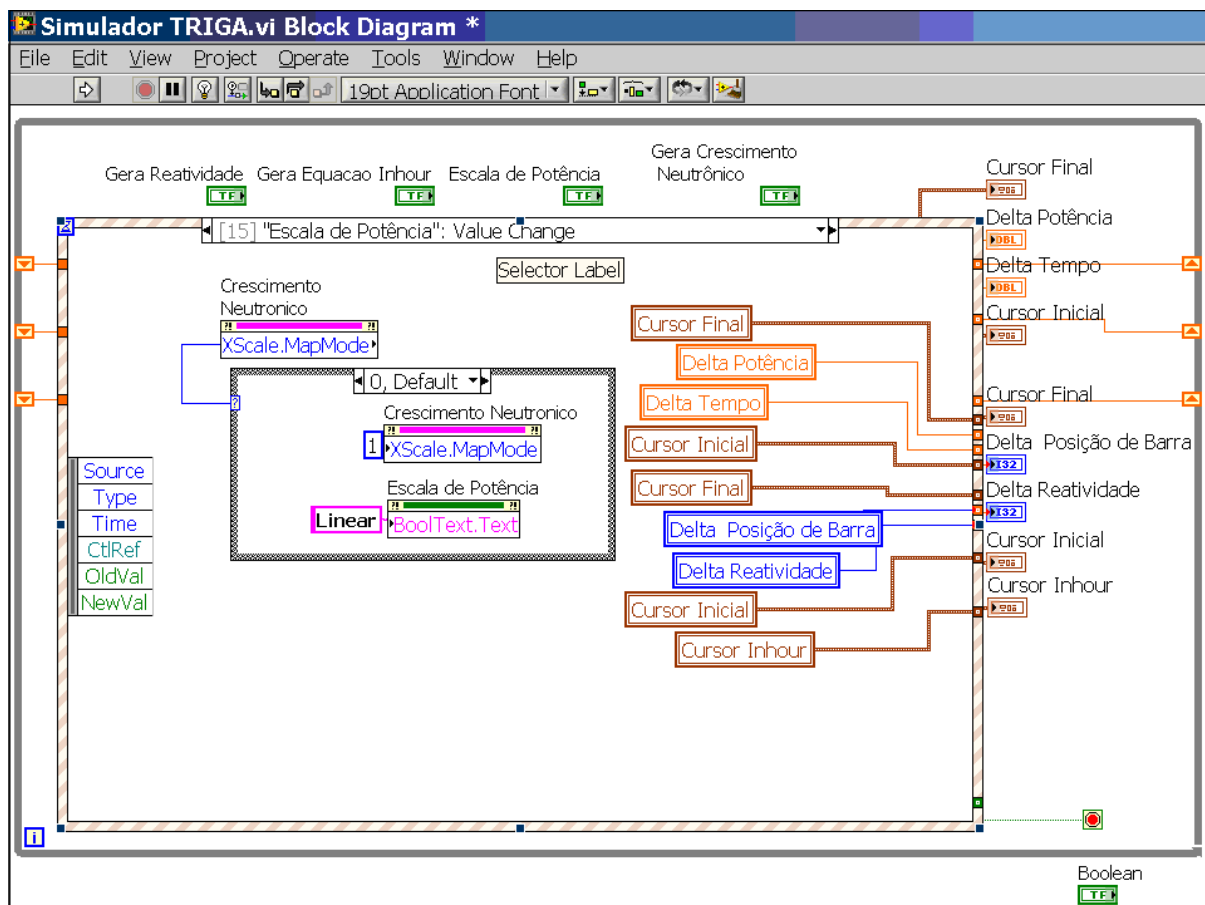


FIGURA 23 – Diagrama de blocos do evento que gerencia as escalas de potência

6.4.4 Guia “Painel de Controle” do Simulador TRIGA

Nesta guia “Painel de Controle” existem somente dois “campos controle” que podem precisar de entrada de valores de acordo a aplicação do *software*, eles são referentes à equação de Inhour:

- O campo controle Delta k, que é a variação do fator de multiplicação, utilizado na digitalização da equação do Inhour. O valor *default* usado como exemplo para o reator TRIGA é 0,001.
- O campo controle L, que indica o tempo médio, em segundos, que separa duas gerações consecutivas de nêutrons. Para o reator TRIGA IPR-R1, este tempo é da ordem de $100\mu s = 0,0001$.

O diagrama de blocos desenvolvido para gerenciar a guia painel de controle, é mostrado na FIG. 24..

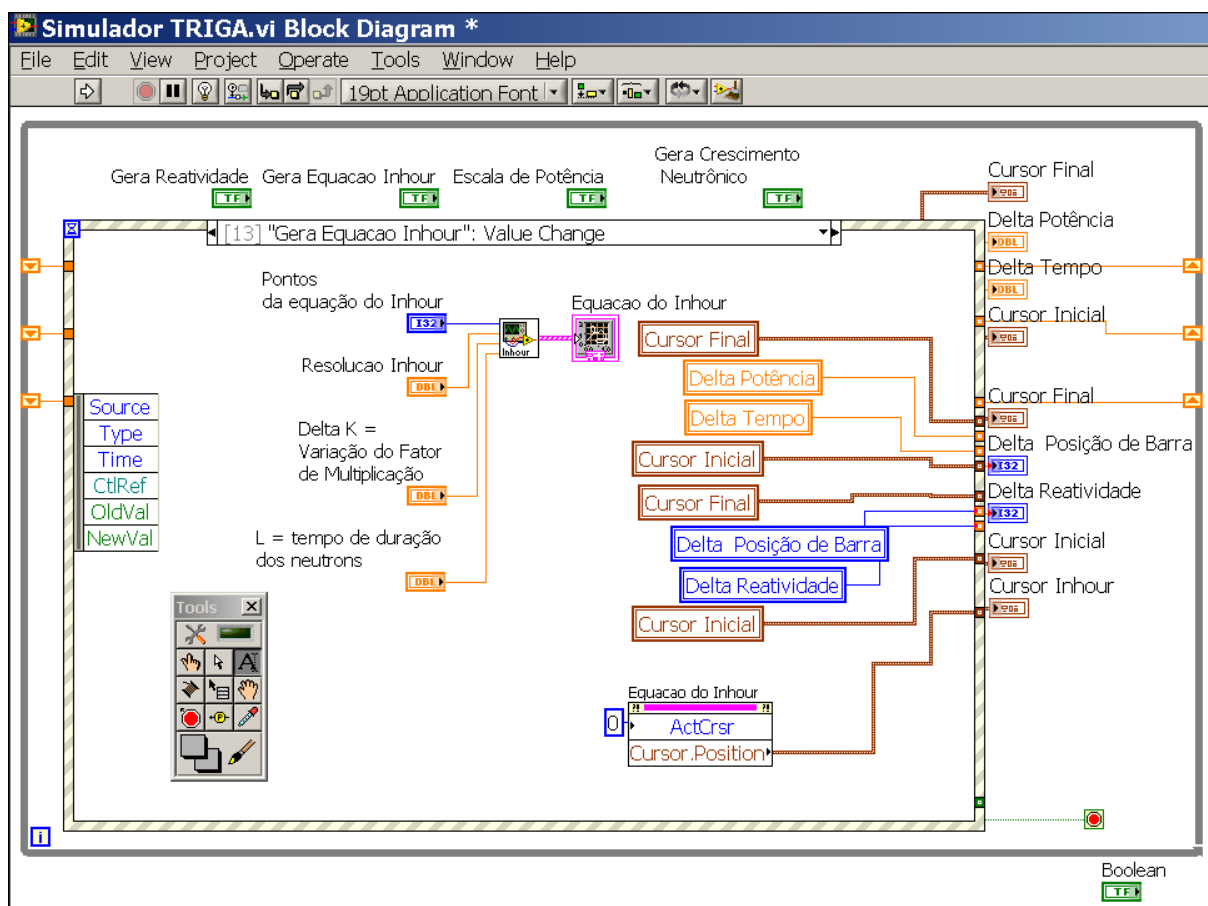


FIGURA 24 – Diagrama de blocos do evento que gerencia o painel de controle

Nesta Guia chamada “Painel de Controle” encontra-se também disponível o botão de controle nomeado de “Ajuda” que, ao ser acessado, apresenta ao usuário as recomendações, dicas e a sequência lógica para utilizar o Sistema Simulador TRIGA e em qual contexto ele está inserido. O Diagrama de blocos mostrando o desenvolvimento deste recurso está apresentado na FIG. 25

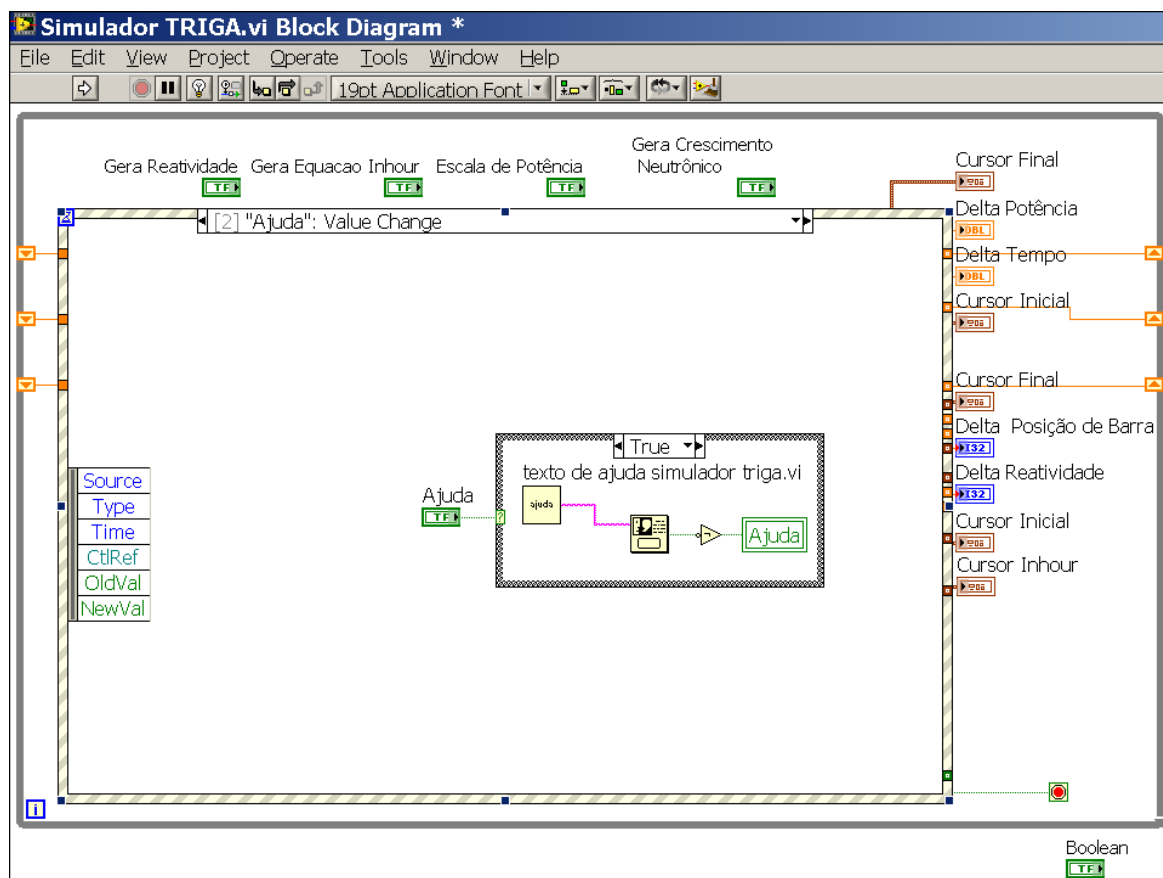


FIGURA 25 – Diagrama de bloco do evento Botão Ajuda

6.4.5 Guia “Controle das Barras”

Na guia chamada “Controle das Barras” foram desenvolvidos recursos para simular o reposicionamento das barras de controle, simulando a introdução e a retirada de barras no núcleo, cada vez que as teclas “Sobe Barra” e “Desce Barra” forem pressionadas, e cujo valor de posição é mostrado no indicador de posição de cada barra. Os diagramas de bloco com os desenvolvimentos destes recursos, para a barra de Regulação são mostrados nas FIG. 26 e 27.

Nesta Tela ainda, foram criados os recursos de simulação do Scram (queda das barras de controle) clicando na tecla “Scram” de cada barra individualmente, ou na tecla “emergência” simulando a queda das três barras ao mesmo tempo (FIG. 28 e 29), respectivamente.

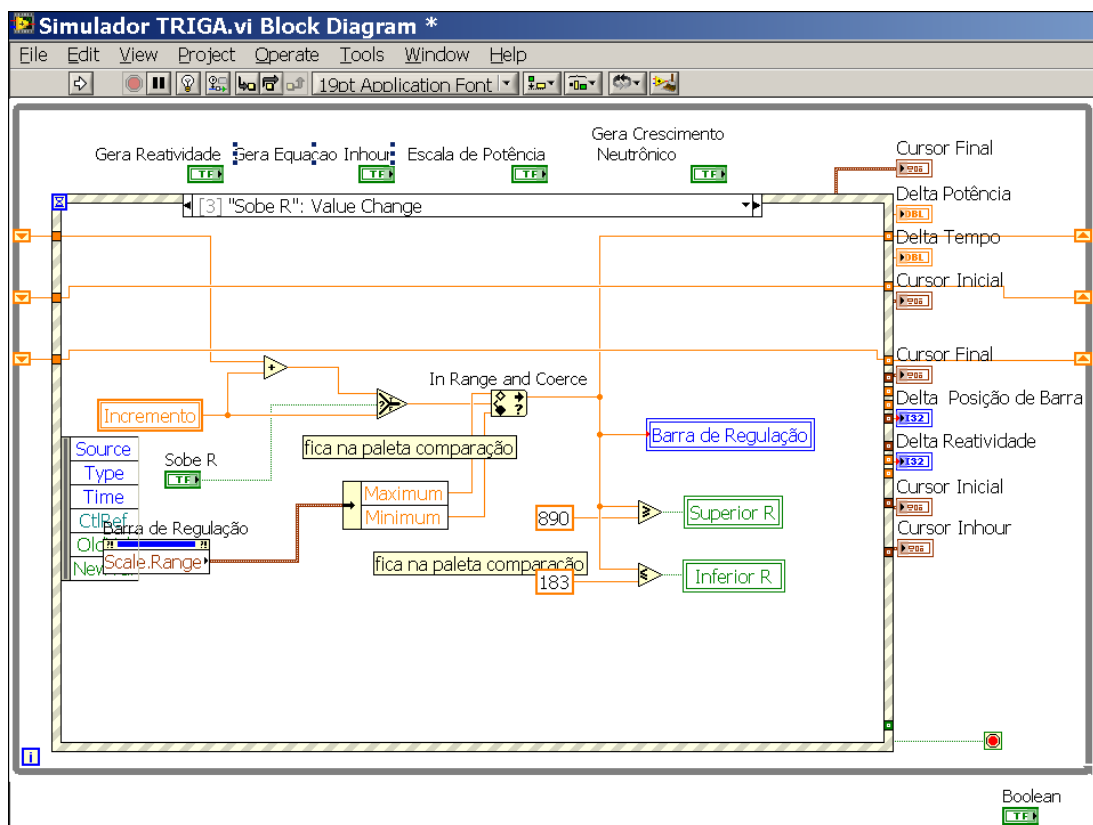


FIGURA 26 – Diagrama de bloco do evento sobe barra de Regulação.

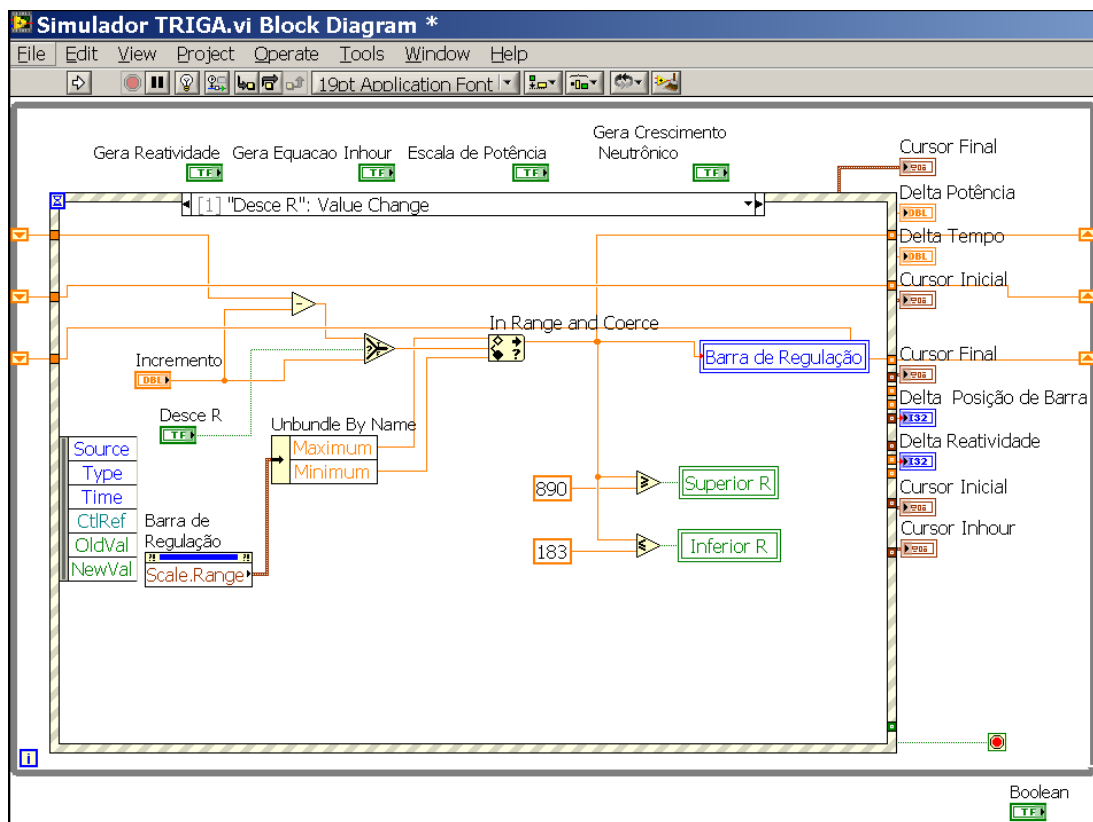


FIGURA 27 – Diagrama de bloco do evento desce barra de Regulação.

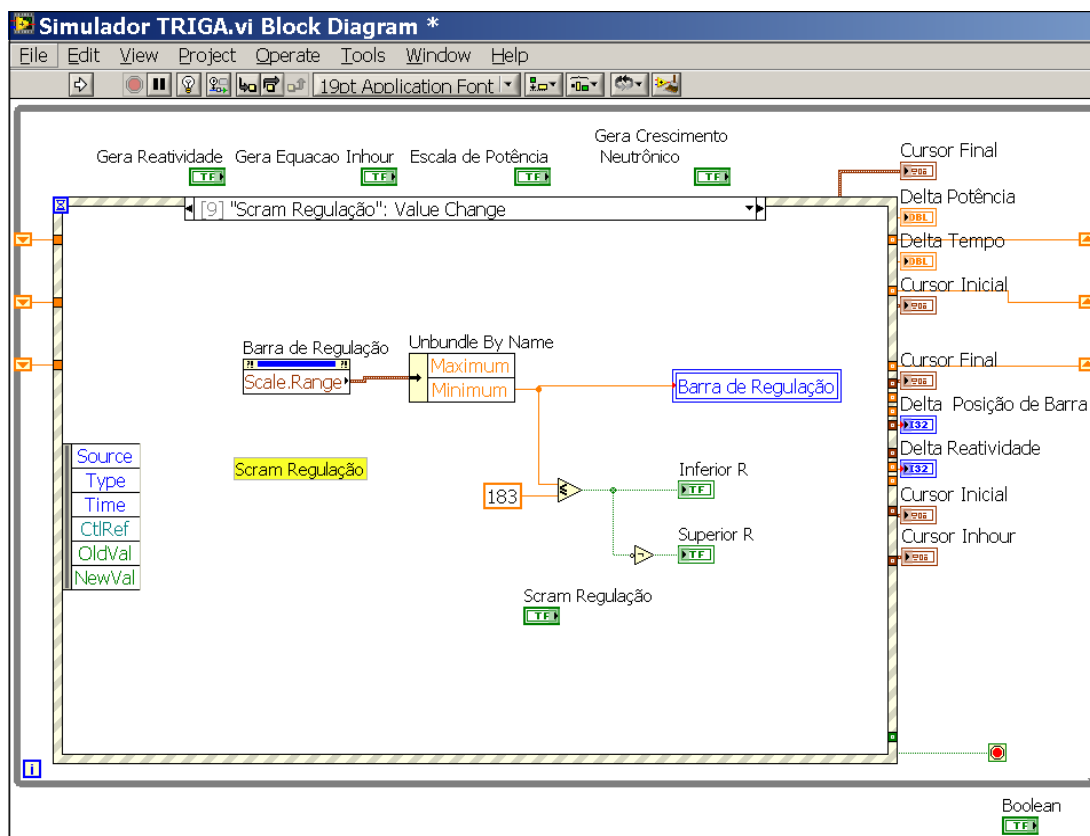


FIGURA 28 – Diagrama de bloco do evento scram na barra de Regulação.

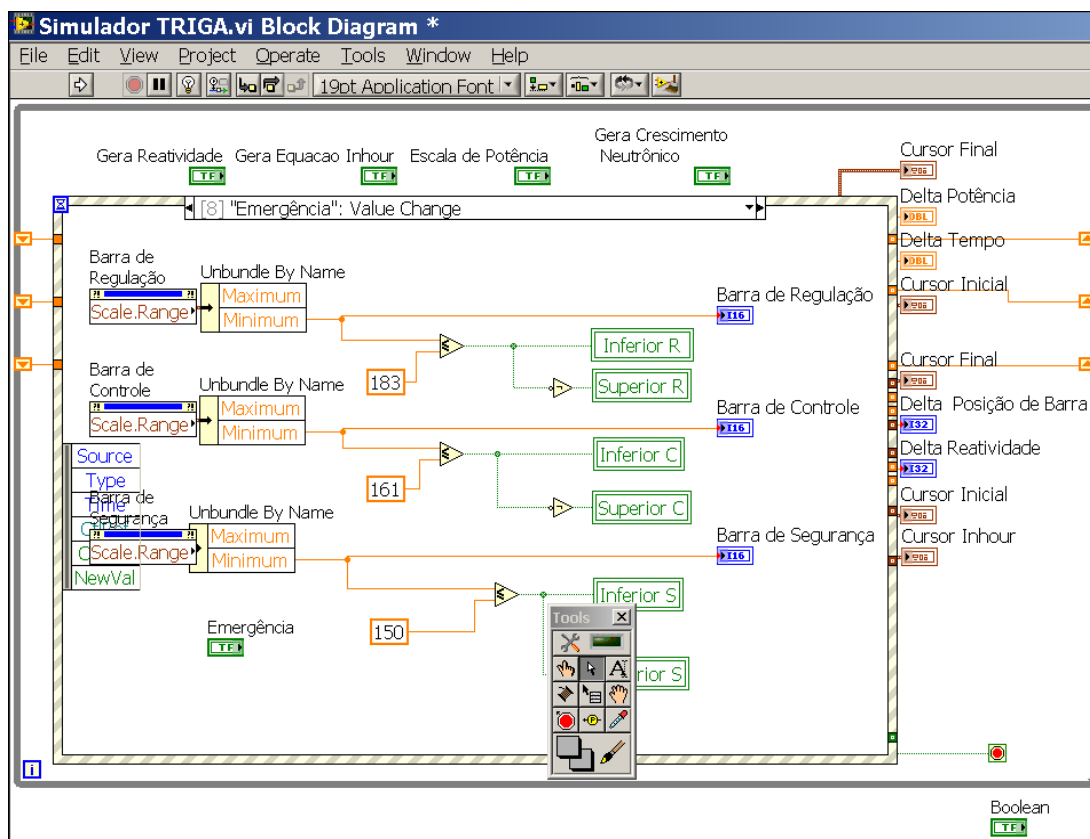


FIGURA 29 – Diagrama de bloco do evento scram de emergência.

7 RESULTADOS

São apresentados a seguir os resultados obtidos durante as etapas do desenvolvimento do *Sistema Simulador TRIGA*.

Determinar a “reatividade” (afastamento da criticalidade) introduzida no núcleo é uma atividade realizada periodicamente em todo reator de pesquisa. Este parâmetro é obtido pelo método do “Período Positivo”, que consiste, resumidamente, em medir o tempo de crescimento da potência, utilizando-se cronômetros para medir o tempo de dobramento da potência, usando-se registradores gráficos de carta. A partir do tempo de dobramento obtém-se o período e pela equação de Inhour, em forma gráfica, obtém-se o valor da reatividade inserida. No sistema desenvolvido o usuário obtém estas informações na guia “crescimento Neutrônico” simplesmente por meio do posicionamento de cursores no gráfico.

Os parâmetros selecionados e introduzidos no Simulador TRIGA foram o crescimento da potência, em função do tempo de operação, do período e da potência inicial, tanto para o canal linear, quanto para o logarítmico; a análise da relação entre o reposicionamento da barra de regulação no reator e a reatividade real inserida no reator por ela; o tempo de dobramento (DT); o Período (T) e a equação do Inhour.

Também foram estudados, e determinados os valores limites usados neste sistema de simulação, por exemplo, o limite máximo de potência da ordem de 1 kW, pois após este nível de potência começa a aparecer no processo o efeito de temperatura, o qual interfere no crescimento neutrônico do reator. Finalmente, o estudo e o entendimento de que o controle do reator é em última instância, realizado pelo movimento das barras de controle e que as barras de Controle e Segurança possuem individualmente reatividade suficiente para produzir o scram do reator (desligamento do reator pelo sistema de proteção).

O conhecimento da equação de Inhour de um reator nuclear, que relaciona a reatividade (ρ) do sistema com o período (T) do mesmo, é muito importante para a operação segura do reator. Esta curva é específica para cada reator e leva em consideração, dentre outras variáveis, os grupos de nêutrons atrasados, sendo que cada grupo é caracterizado pela meia-vida (t_i) (ou pela constante de desintegração λ_i) do precursor e pela proporção β_i de nêutrons do grupo em relação ao número de nêutrons de fissão.

7.1 Guia “Painel de Controle” do Sistema Simulador TRIGA

A partir do diagrama de bloco apresentados nas FIG. 24 e 25, foi criada a guia “Painel de Controle” do programa, na qual o usuário configura os valores de algumas constantes usadas em cada VI desenvolvido na simulação, como, por exemplo, o tempo médio ℓ que separa duas gerações consecutivas de nêutrons, a variação do fator de multiplicação (δk) e também a resolução do simulador (FIG. 30).

Nesta guia encontra-se também disponível um botão de controle nomeado de “Ajuda”, que ao ser acessado, apresenta ao usuário as recomendações, dicas e a sequência lógica de como utilizar o Sistema Simulador TRIGA como mostrado na FIG. 31.

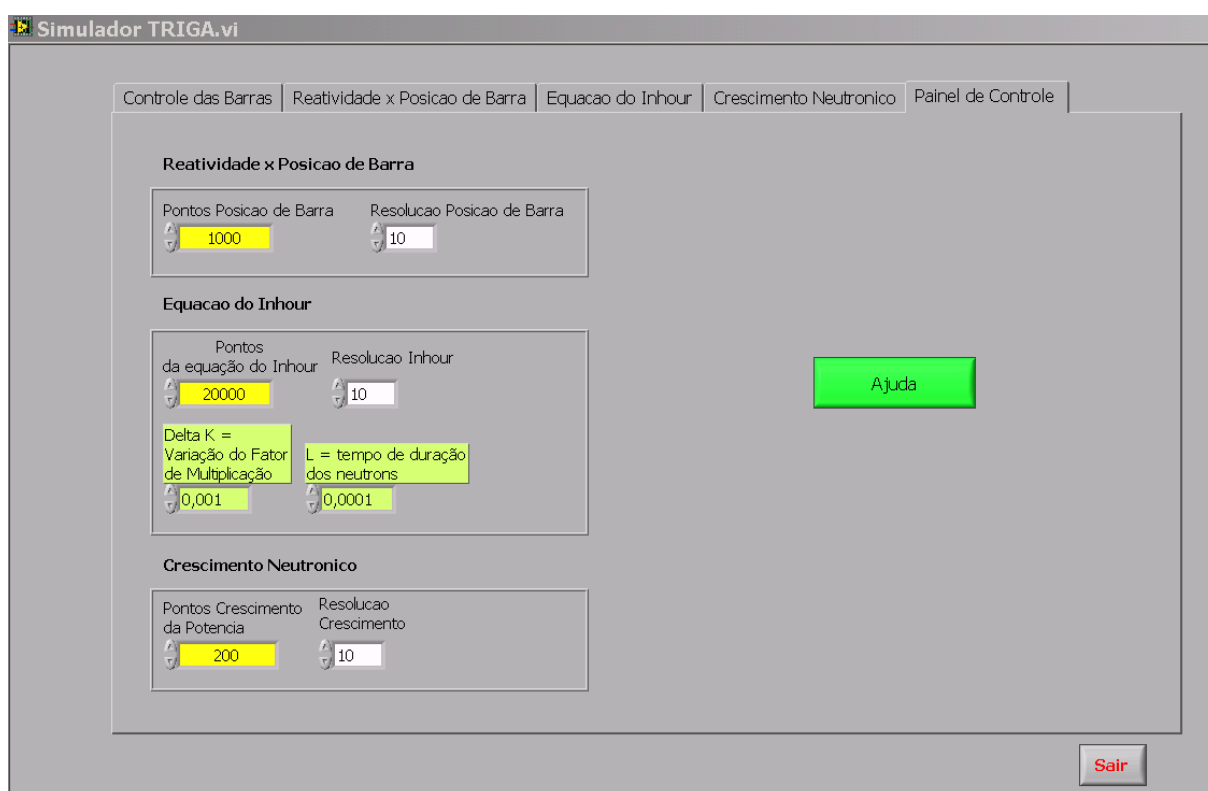


FIGURA 30 – Guia painel de controle do Sistema Simulador TRIGA

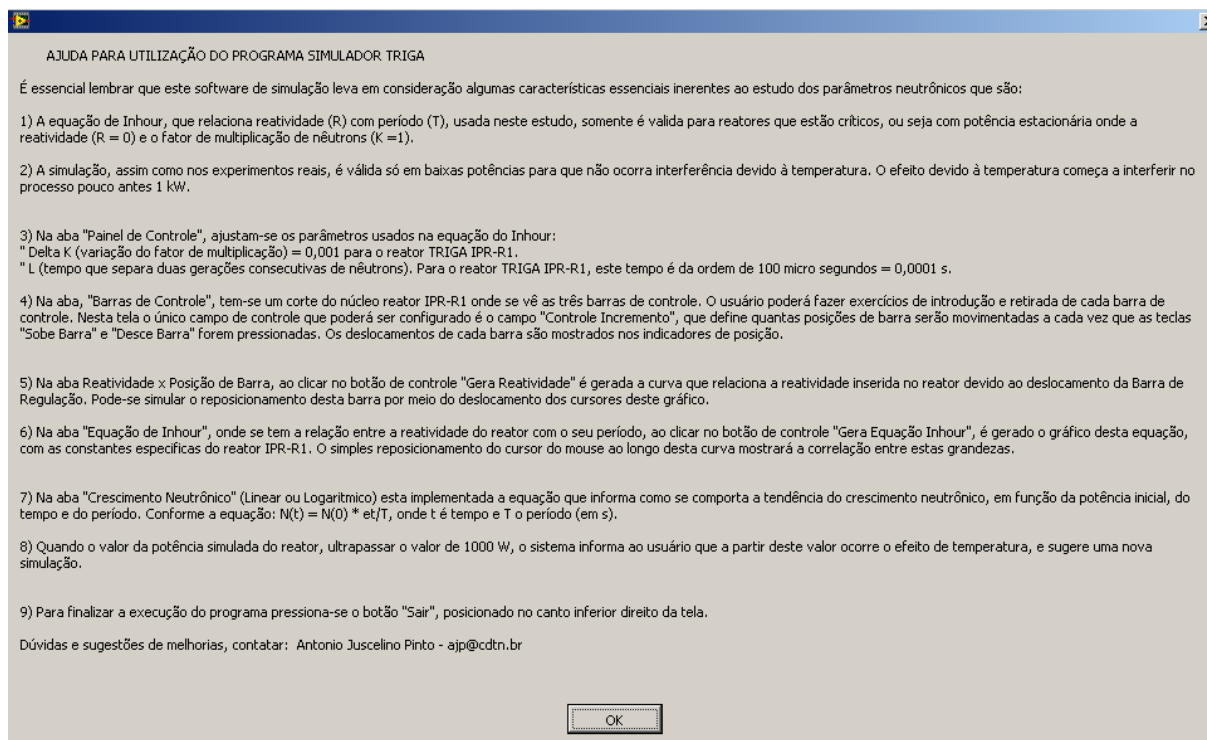


FIGURA 31 – Tela de Ajuda

7.2 Guia “Controle das Barras”

Utilizando os diagramas de blocos mostrados nas FIG. 26, 27, 28 e 29, criou-se a guia “Controle das Barras” (FIG. 32). Nesta guia o usuário tem a visão de uma maquete do reator TRIGA IPR-R1 com as barras de controle posicionadas nos tubos guia e poderá fazer a simulação da introdução e da retirada de barras de controle do reator, cada vez que as teclas “Sobe Barra” ou “Desce Barra” forem pressionadas, e cujo valor de posição é mostrado no indicador de posição de cada barra.

Nesta guia o único campo controle que poderá ser configurado é o denominado “Incremento”, que define quantas posições de barra serão movimentadas. Nesta tela o usuário poderá também observar a situação de simulação do *Scram* (queda das barras de controle) clicando na tecla “Scram” de cada barra individualmente, ou na tecla “Emergência” para simular a queda das três barras ao mesmo tempo.

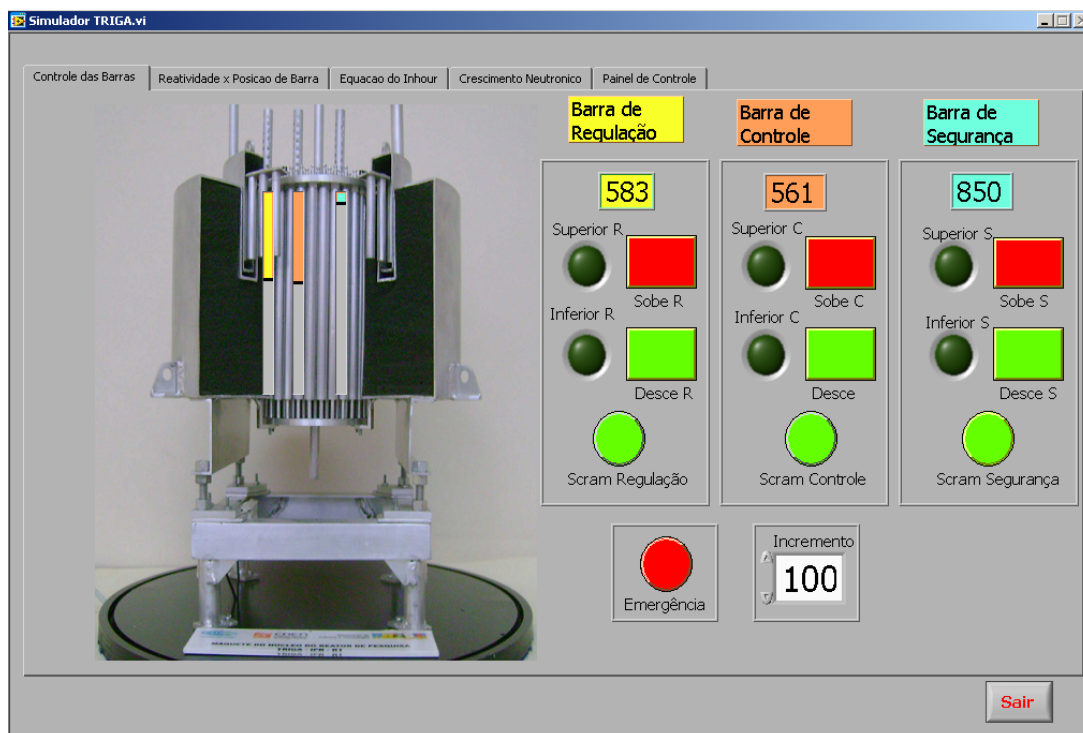


FIGURA 32 – Tela controle das barras

7.3 Guia “Reatividade x Posição da Barra de Regulação”

Com o estudo do processo e a utilização dos diagramas de bloco das FIG. 17 e 18, criou-se a guia “Reatividade x Posição da Barra de Regulação” (FIG. 33). Nesta guia é apresentada, assim que o usuário clicar no botão de controle “Gera Reatividade”, a curva real que relaciona a reatividade inserida no reator em função da simulação do reposicionamento da barra de Regulação. Nesta tela, por meio do movimento do cursor inicial e do cursor final, utilizando o mouse, o usuário poderá simular a retirada ou a inserção da barra de Regulação no reator de uma posição inicial qualquer para uma posição final qualquer e obter a reatividade inserida ou retirada do reator. A variação da posição da barra e a variação da reatividade inserida são mostradas, respectivamente, nos indicadores “Delta Reatividade” e “Delta Posição de Barra”.

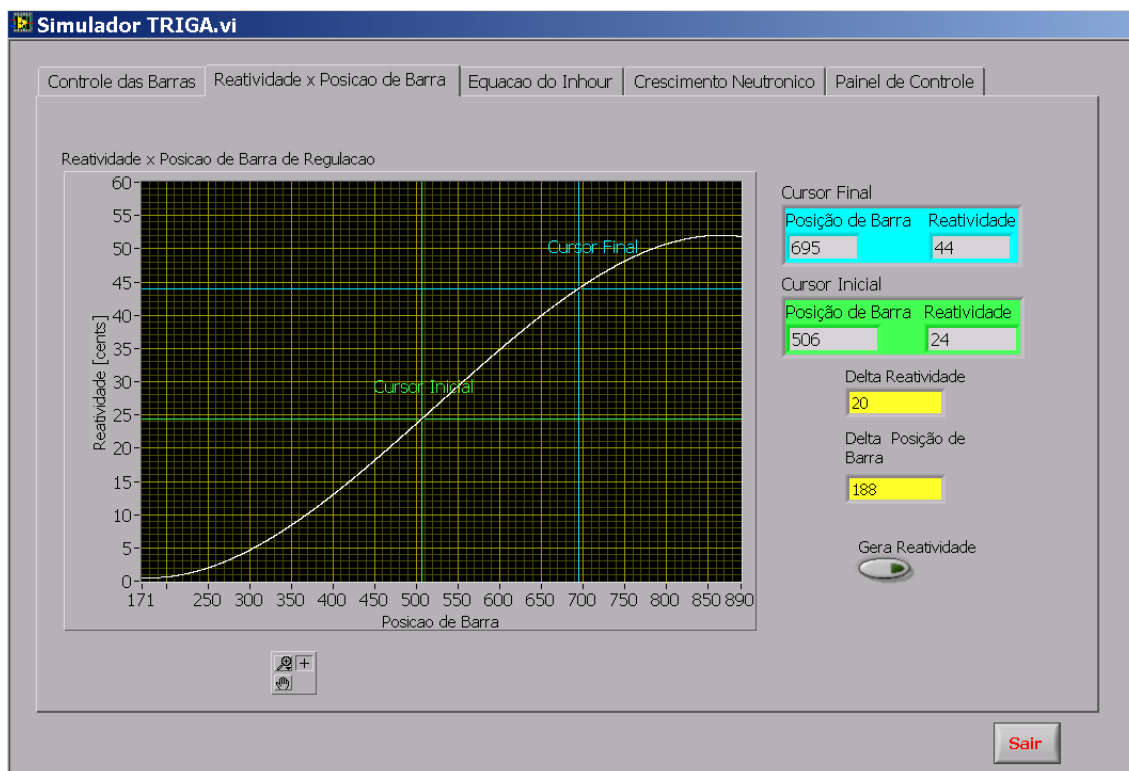


FIGURA 33 – Reatividade versus posição da barra de Regulação

7.4 Guia “Equação de Inhour”

Na Fig. 34 é mostrada a guia da “Equação de Inhour” considerando os valores específicos para o reator TRIGA IPR-R1, ou seja, $\ell = 100 \mu\text{s}$, $\delta k = 0,001$ e os seis grupos de nêutrons atrasados, como mostrado na TAB. 1. Usando estas constantes, que foram configuradas na tela “painel de controle” e utilizadas no desenvolvido do diagrama de blocos apresentado nas FIG. 19 e 20, digitalizou-se a “Equação do Inhour”.

Ela será visualizada, quando o usuário clicar no botão de controle “Gera Equação Inhour” e, também por meio do uso dos cursores e indicadores implementados neste gráfico, o usuário poderá obter a reatividade em função do período e vice-versa.

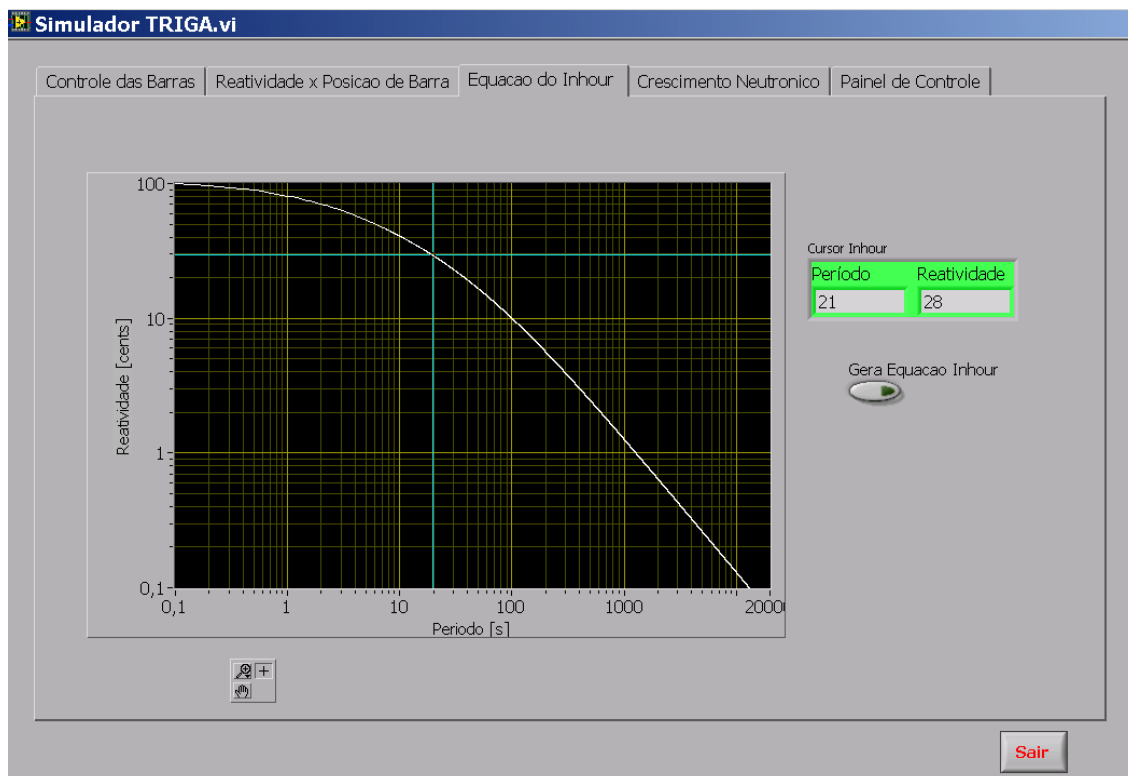


FIGURA 34 – Curva da equação de Inhour

7.5 Guia Crescimento Neutrônico

Utilizando os diagramas de blocos apresentados anteriormente nas FIG. 21 e FIG. 22, criou-se a guia “Crescimento Neutrônico”, que apresenta ao usuário a simulação da tendência do crescimento neutrônico. Desta forma, nesta guia inserindo nos campos “Potência Inicial” e “Período” os valores desejados e clicando no botão “Gera Crescimento Neutrônico”, a curva de tendência do processo de crescimento da potência é instantaneamente gerada, como pode ser visto nas FIG. 35 e 36 para os canais linear e logarítmico, respectivamente.

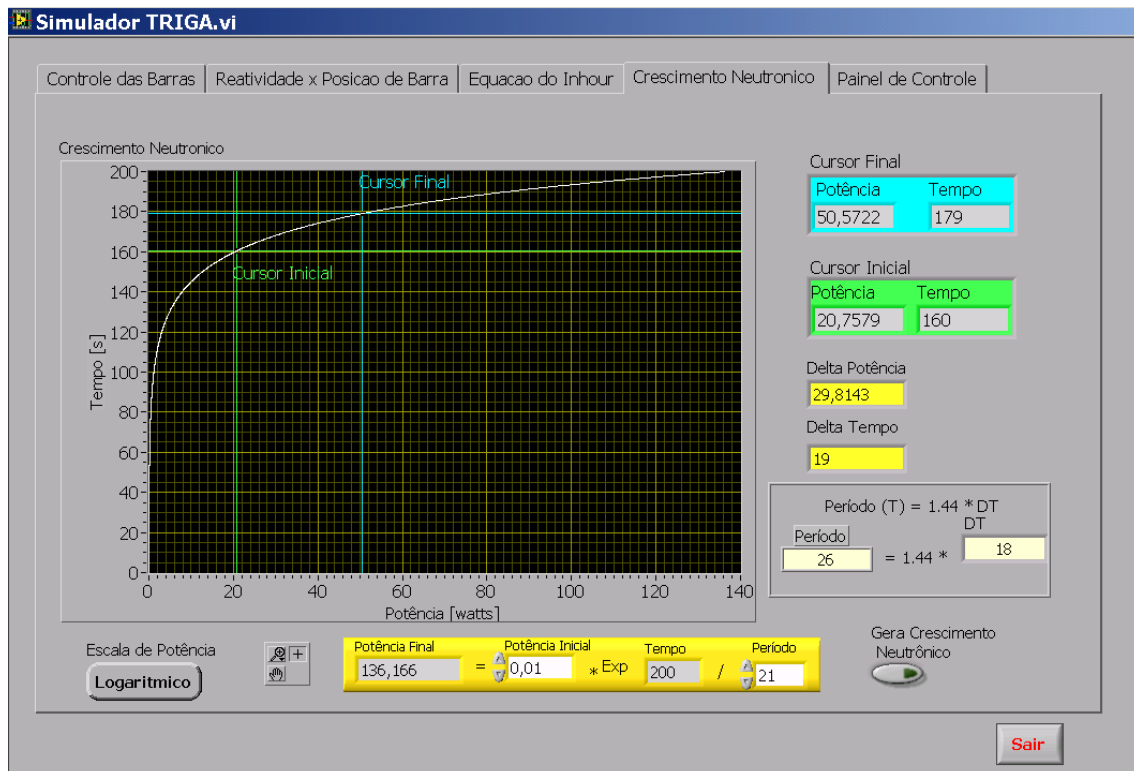


FIGURA 35 – Comportamento do Canal Linear

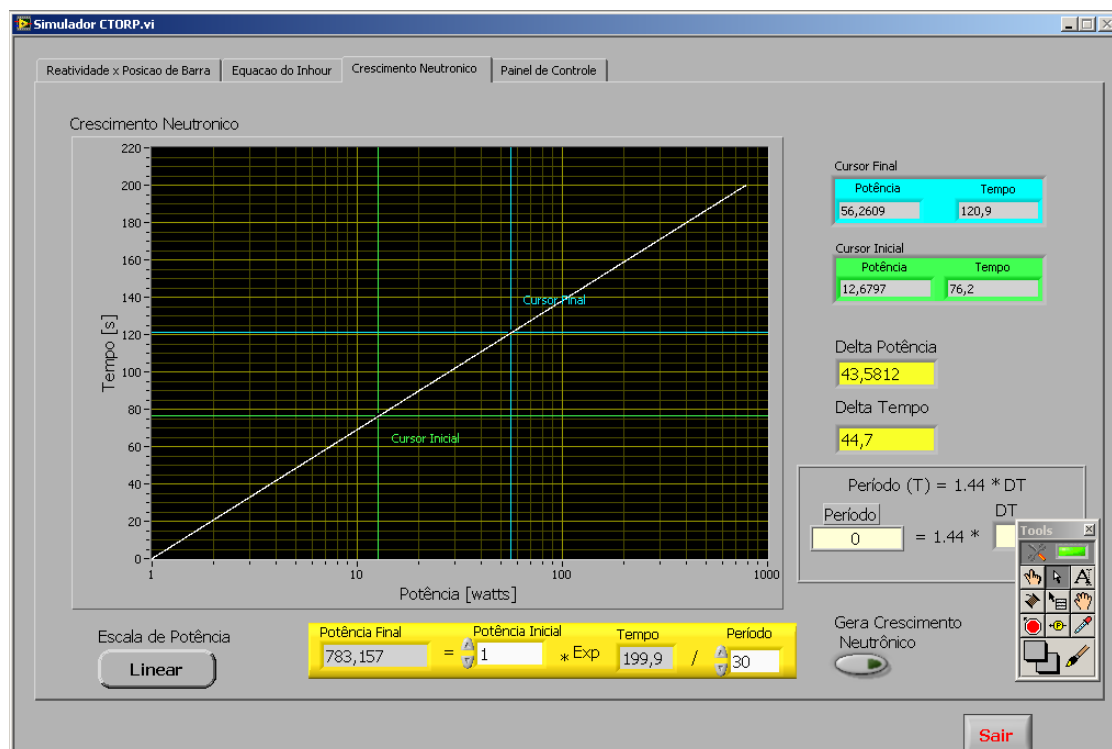


FIGURA 36 – Comportamento do canal Logarítmico

Observe que nas telas “Crescimento Neutrônico” foram implementados cursores e indicadores, para o usuário observar, obter e analisar o tempo de dobramento (DT) da potência, recurso muito utilizado por questões práticas, e o Período (T) do processo.

Além disso, quando o valor da potência simulada ultrapassa o valor de 1.000 W, o *software* informa ao usuário que este limite foi atingido, e sugere uma nova simulação com outros valores, pois a partir desta potência, da ordem de 1 kW, ocorre o efeito temperatura, que altera significativamente o crescimento neutrônico. O estudo realizado neste simulador e as equações utilizadas são para o crescimento neutrônico que acontece antes do efeito da temperatura. A ocorrência do efeito da temperatura é apresentada ao usuário por meio uma mensagem na tela destacada na FIG. 37.

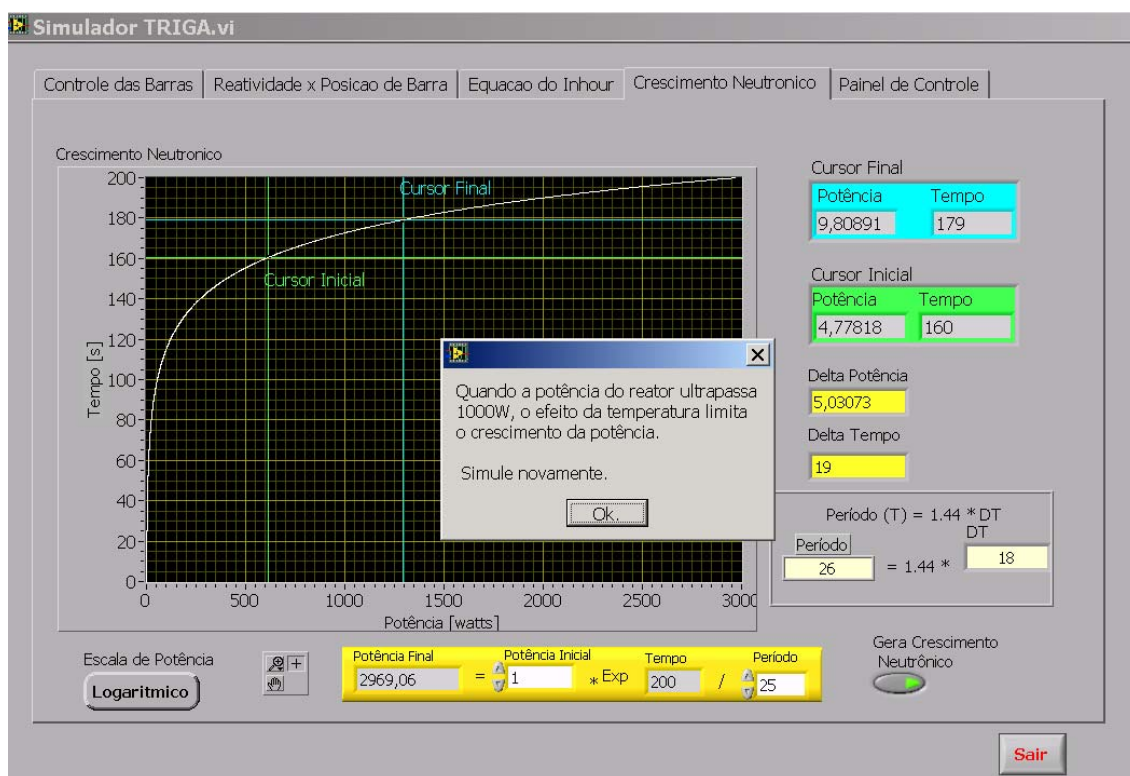


FIGURA 37 – Registro da ocorrência do efeito da temperatura

7.6 Aplicações do Sistema Simulador TRIGA

Para exemplificar a utilização do Sistema Simulador TRIGA e a sua contribuição para o entendimento e a análise dos diversos parâmetros neutrônicos serão apresentados três cenários simulando eventos.

7.6.1 Cenário 1 – Geração do crescimento neutrônico em função da posição de barra

- A. Por meio de um deslocamento ou reposicionamento da “Barra de Regulação” simulado pelo deslocar dos cursores do gráfico da guia “Reatividade x Posição de Barra”, pode-se obter a “reatividade” real inserida no reator, cujo resultado é apresentado no indicador “Delta Reatividade”. Na FIG. 38 mostra-se um exemplo no qual a partir da posição inicial 283 houve uma retirada da barra de Regulação de 300 posições, o que provoca uma inserção de reatividade positiva de 29 cents.

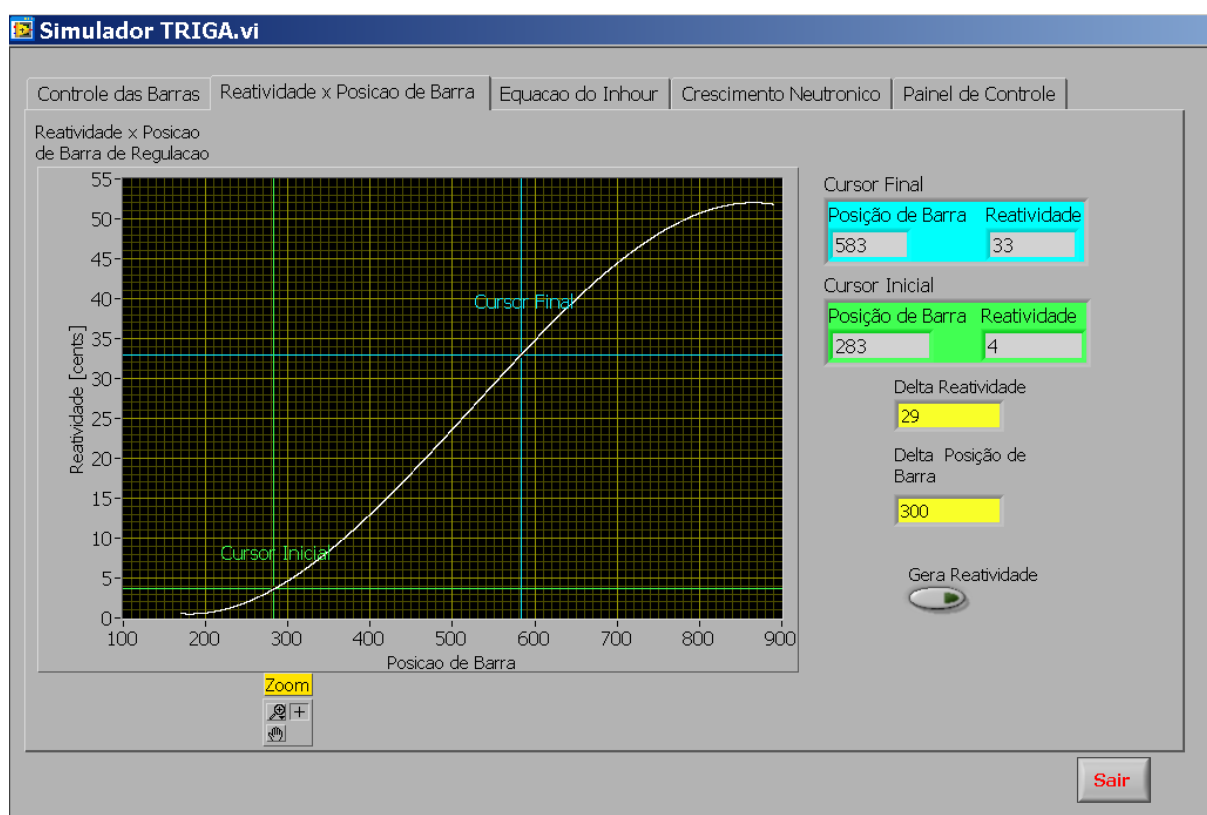


FIGURA 38 – Obtenção da Reatividade por meio da posição da barra de Regulação

- B. Em seguida, com o valor da “Reatividade” obtida no gráfico (29 cents), localiza-se no gráfico de Inhour este valor no eixo da reatividade. Usando o cursor, obtém-se que o período do reator para a reatividade de 29 cents é 20 segundos, como se pode analisar na FIG. 39.

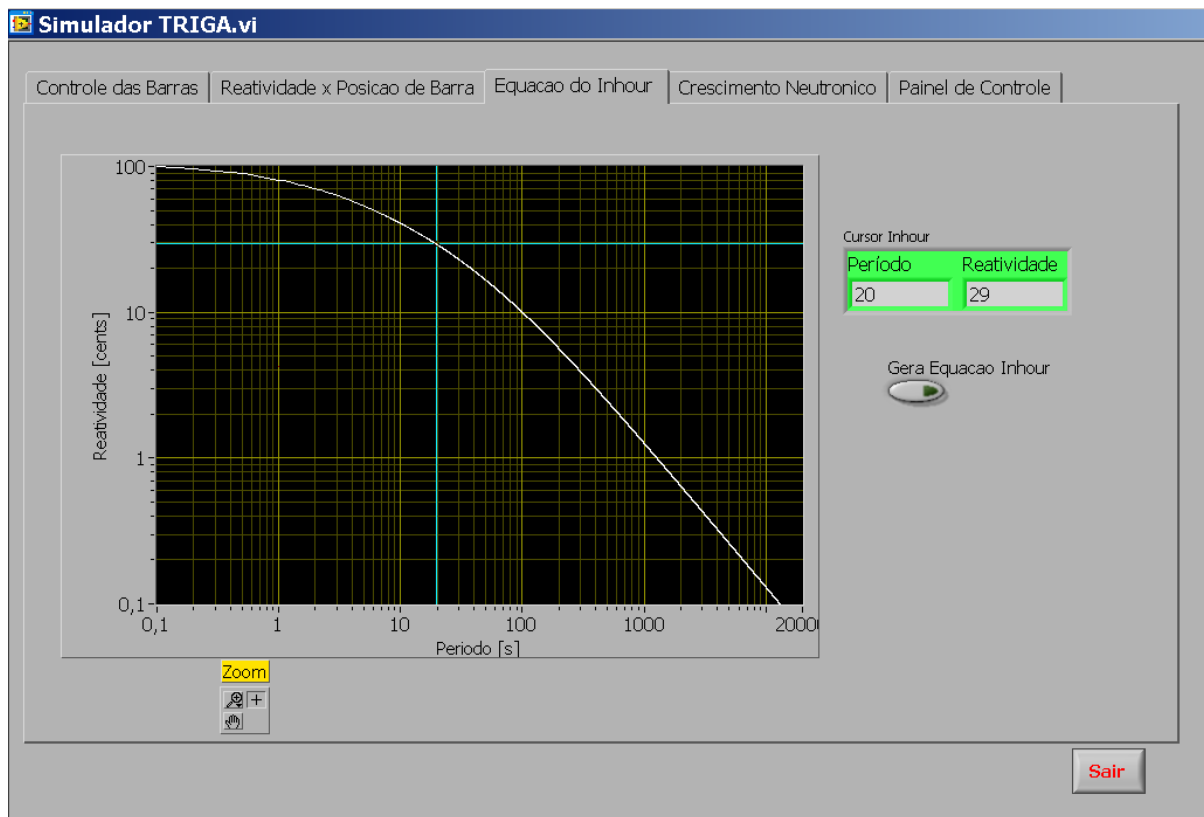


FIGURA 39 – Obtenção do período por meio da reatividade conhecida

- C. Inserindo na guia “Crescimento Neutrônico”, os valores do “período” encontrado no passo anterior, 20 s, e da “potência inicial”, 10 mW, por exemplo, o usuário clica no botão de controle “Gera Crescimento Neutrônico” para criar a curva do crescimento neutrônico ou da potência do reator para estas condições, como pode ser acompanhado na FIG. 40.
- D. Na FIG. 40 é mostrada esta curva, a partir da qual pode ser feita a análise e a observação da tendência do processo.

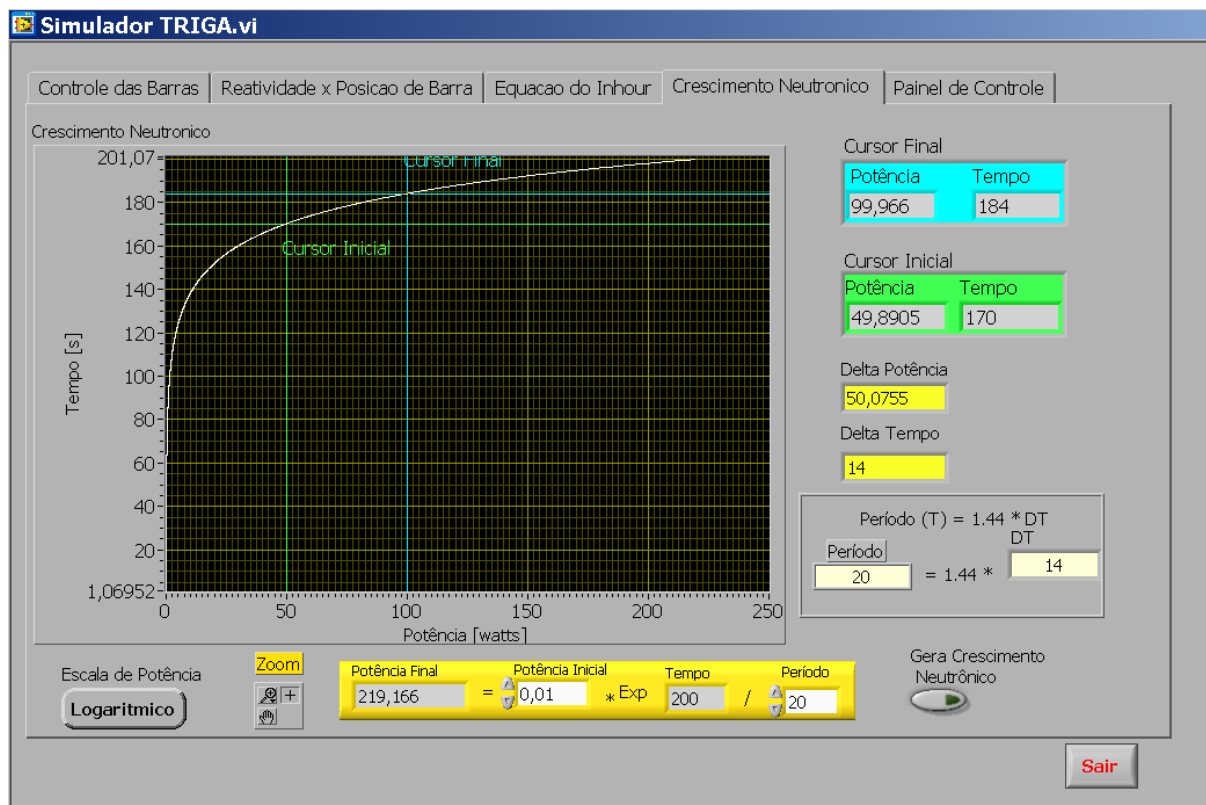


FIGURA 40 – Apresentação do crescimento neutrônico

7.6.2 Cenário 2 – Reposicionamento de barra em função do período do processo.

- A. Considerando que se quer simular a partida do reator com um “Período” estabelecido. Por exemplo, deseja-se dar a partida do reator ou mudar o nível de potência, na qual ele se encontra, com um “Período” de 25 segundos.
- B. Na guia “Equação do Inhour”, a partir do posicionamento do cursor localiza-se no gráfico o período estabelecido de 25 s, e constata-se que o valor da reatividade correspondente que é necessário inserir, segundo a “Equação do Inhour”, é de 26 cents. Conforme pode ser visto na FIG. 41.
- C. Utilizando a guia “Reatividade” x “Posição de Barra”, e considerando que a barra real se encontra, por exemplo, na posição 346, seleciona-se em “cursor inicial” desta guia a posição 346 e no “cursor final” fazem-se incrementos até que o indicador “Delta Reatividade” indique a “Reatividade” que precisa ser inserida no reator e que foi determinada em “B”, que é de 26 cents (FIG. 42).

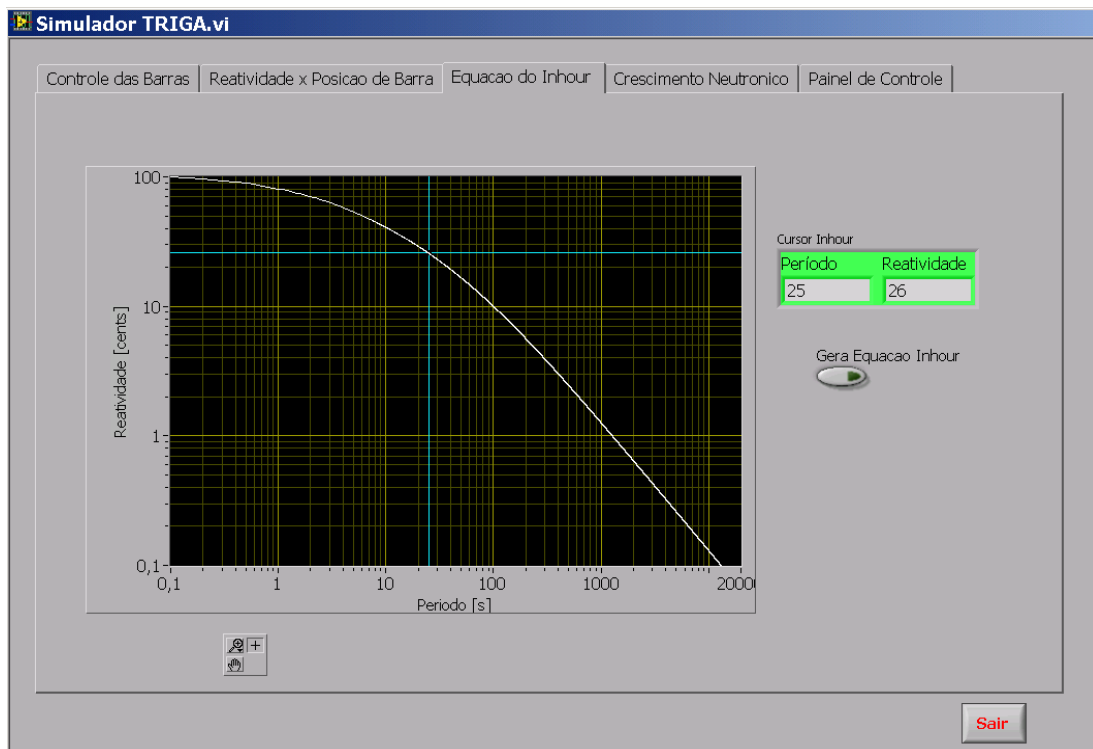


FIGURA 41 – Obtenção da Reatividade em função do período conhecido

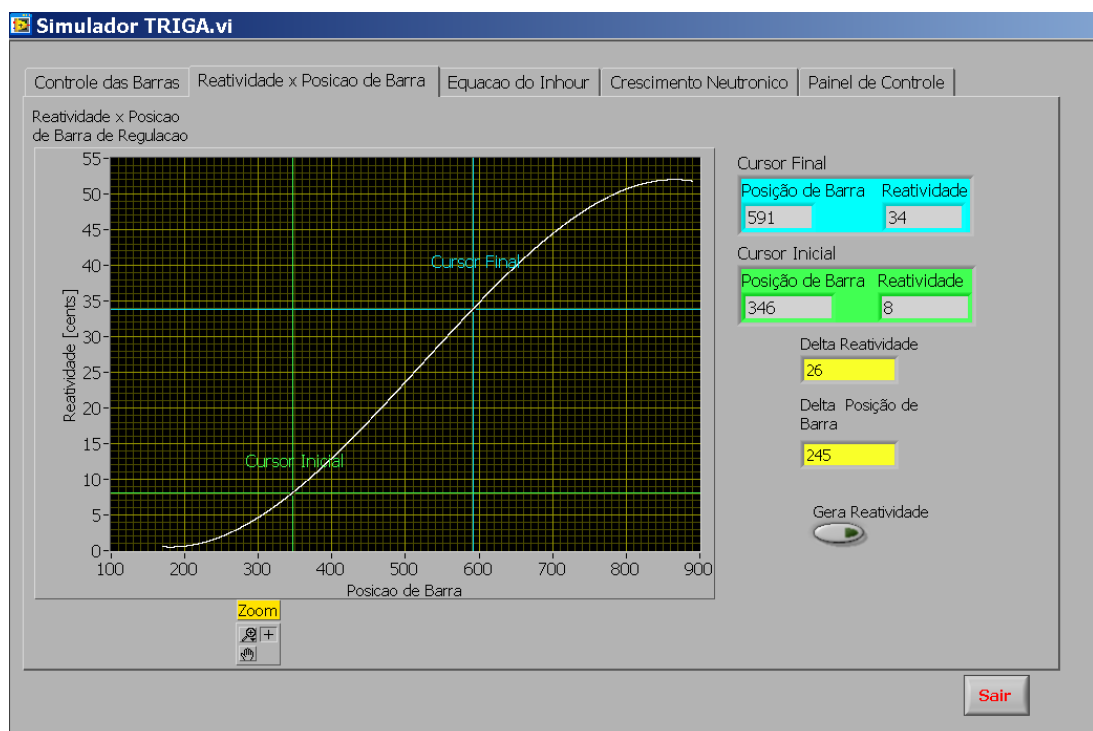


FIGURA 42 – Obtenção da nova Posição da barra de Regulação em função da Reatividade

D. Como consequência, verifica-se, por meio deste exercício, que o deslocamento real da barra de Regulação necessário para inserir esta reatividade de 26 cents,

partindo da posição 346, é de 245 posições. Isto é, será necessário reposicionar a barra de regulação da posição 346 (origem) para a posição 591 (destino) para se atingir o objetivo final, isto é, ter o crescimento da potência com um “Período” conhecido de 25 segundos.

- E. Opcionalmente, acessando ou clicando na guia “Crescimento Neutrônico”, o usuário pode inserir os valores de “Período” (25 s) e “Potência Inicial”, (por exemplo, 100 mW) e obter o gráfico de tendência do processo para estas condições, para o Canal Linear como se pode visualizar na FIG. 43, ou para o Canal Logarítmico.

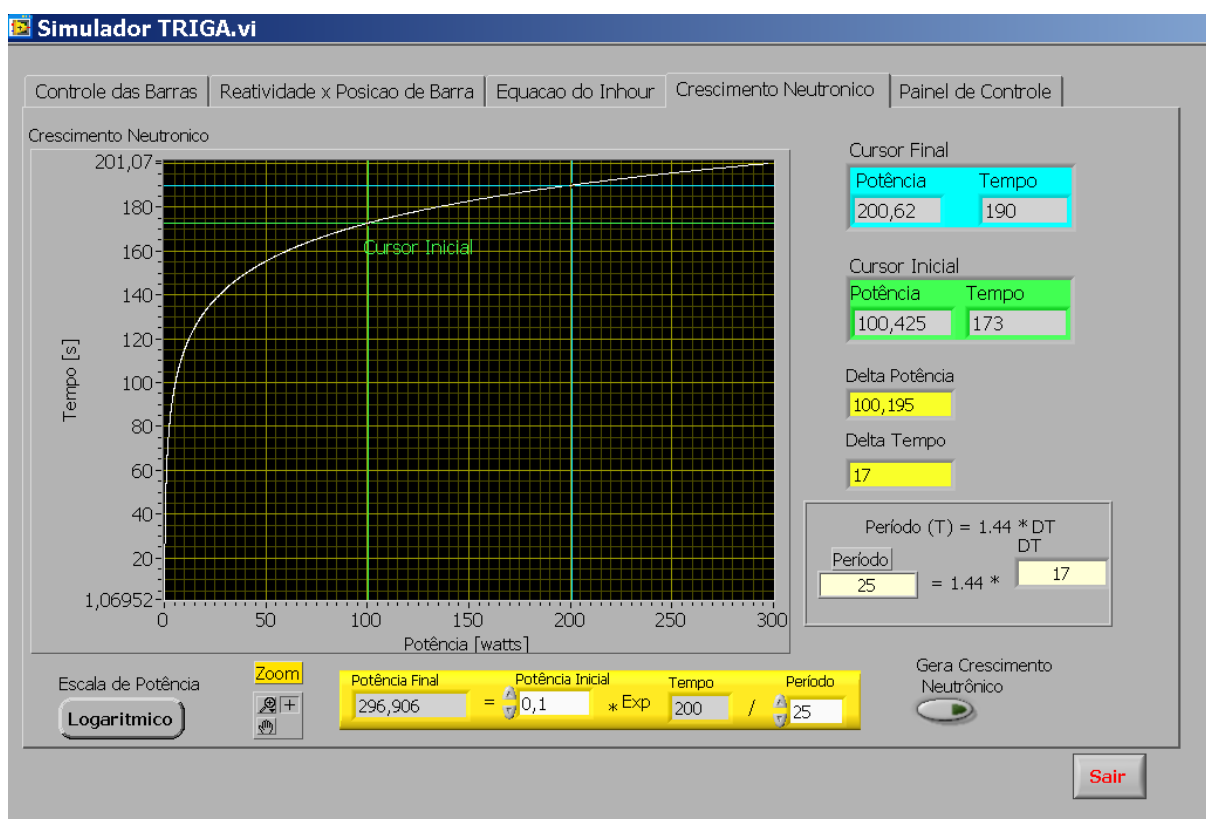


FIGURA 43 – Obtenção do crescimento da potência

7.6.3 Cenário 3 – Reatividade inserida insuficiente.

- A. Deseja-se, por exemplo, inserir no reator uma reatividade positiva (retirada de barra), tal que possibilite um período de trabalho de 18 segundos, lembrando-se que com um período de 10 segundos acontece o “Scram”, desligamento do reator IPR-R1 pelo sistema de proteção.

- B. Analisando-se a guia “Curva do Inhour”, constata-se pelo posicionamento do cursor na “Curva do Inhour” que, para se trabalhar com um “Período” de 18 s, é preciso inserir uma reatividade positiva (retirada de barra) de 31 cents, como destacado na FIG. 44.
- C. Neste caso, considerando que a “reatividade” que precisa ser inserida é de 31 cents e que a barra de regulação se encontra na posição 550, por exemplo, e utilizando a guia “Reatividade x Posição de Barra” do sistema de simulação, o usuário fixa o “Cursor Inicial” no valor 550, que é onde a barra se encontra (origem), e desloca o “Cursor Final” no eixo posição de barra até descobrir o comprimento de barra que deverá ser retirada para se inserir a reatividade desejada de 31 cents no processo, chegando ao valor de 888, como apresentado na FIG. 45.

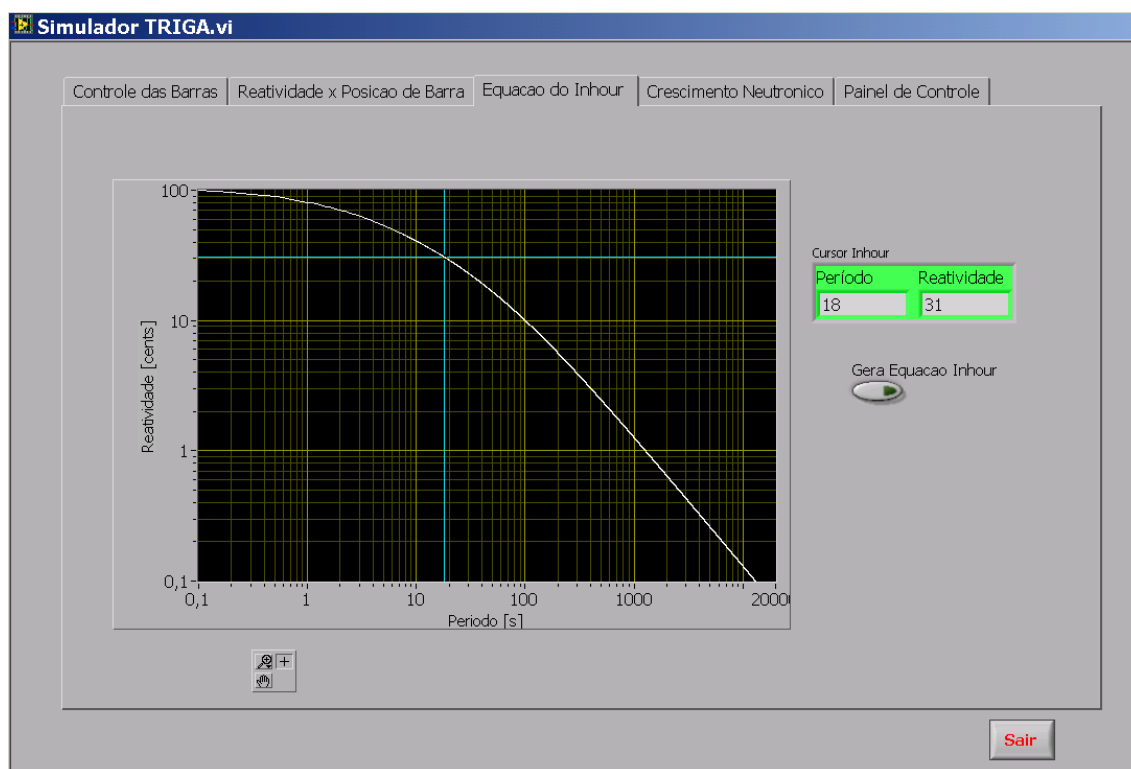


FIGURA 44 – Obtenção da reatividade em função do período conhecido

- D. Observando o indicador “Delta Reatividade”, o usuário constata que é impossível inserir esta “Reatividade” positiva de 31 cents no reator, atuando somente na barra de Regulação (retirando esta barra). Isto porque se retirando a barra de regulação da posição inicial igual a 550 até a posição 888, que corresponde à extração total

da barra, a reatividade máxima inserida no núcleo é igual a 23 cents, como se pode observar no indicador “Delta Reatividade” na FIG. 45.

- E. Desta forma, usando o Sistema Simulador TRIGA, o usuário constata a necessidade de se atuar em outra barra de controle, para se conseguir inserir a reatividade positiva desejada de 31 cents.

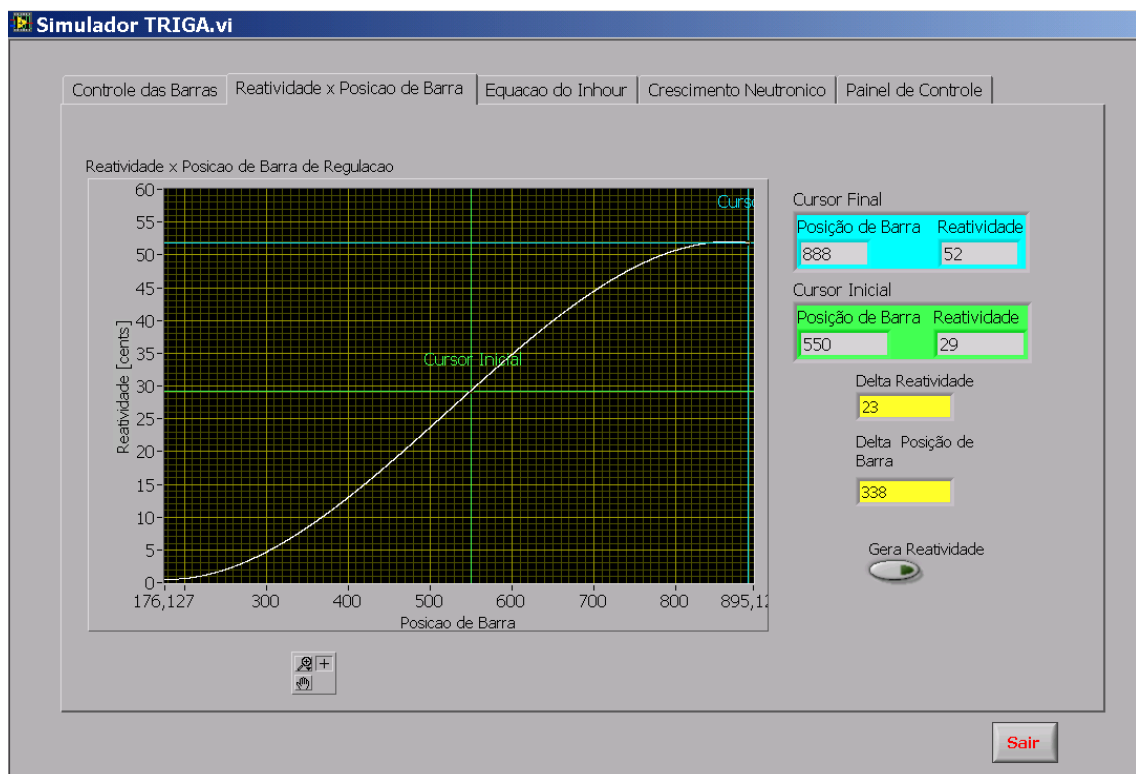


FIGURA 45 – Obtenção da reatividade em função da posição da barra de regulação

8 CONCLUSÕES

O reator TRIGA IPR-R1, instalado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) em Belo Horizonte, tem como uma de suas funções principais o treinamento de profissionais da área nuclear. Dentro deste contexto foi desenvolvido um sistema para simular o crescimento neutrônico do reator IPR-R1 – Sistema Simulador TRIGA.

Para isto, foram estudados conceitos e parâmetros relacionados à operação do reator TRIGA, tais como o período, a reatividade, o tempo de dobramento da potência, a equação de Inhour, a criticalidade e o fator de multiplicação. Para complementar estes estudos foram realizados experimentos neutrônicos no reator, nos quais se verificaram, na prática, todos estes conceitos e também a influência do posicionamento das barras de controle na potência do reator. Assim, selecionaram-se os parâmetros que foram implementados no Sistema.

Dentro dos recursos computacionais disponíveis e estudados, definiu-se pela utilização do *software* LabVIEW® como suporte para o desenvolvimento do Sistema, porque, além de ser o *software* mais utilizado atualmente para monitoração, controle, simulação e aquisição de dados em aplicações industriais e em controle de reatores, ele é compatível com os modernos sistemas operacionais, como Windows XP e Seven. Adicionalmente, considerou-se a existência de licença para uso deste software no CDTN.

Portanto, o Sistema Simulador TRIGA foi desenvolvido com o software LabVIEW® para ser utilizado em estudos, simulação e entendimento de parâmetros neutrônicos do reator TRIGA IPR-R1. Este Sistema considerou o moderno conceito de instrumentos virtuais (VIs) por meio de processador eletrônico e interface visual em monitor de vídeo. Desta forma, foram criados diversos VIs, entre eles os que apresentam:

- A reatividade com relação à posição da barra de Regulação,
- A curva de crescimento de potência para os canais Logarítmico e Linear, considerando o efeito da temperatura,
- A curva do Inhour para o reator TRIGA IPR-R1 e
- A simulação da inserção e retirada das barras de controle.

Para verificar o funcionamento do Sistema Simulador TRIGA foram feitos diversos testes e simulações do comportamento neutrônico para três cenários:

- Geração do crescimento neutrônico em função da posição de barra
- Reposicionamento de barra em função do período do processo.
- Reatividade inserida insuficiente.

Em complementação a este trabalho foi elaborado o Manual do Usuário preliminar com orientações detalhadas de como utilizar e o contexto de aplicação do Sistema Simulador TRIGA.

Este Sistema proporciona a simulação de parâmetros neutrônicos, com a intenção de auxiliar no entendimento de como estas variáveis estão interligadas e se comportam, procurando promover melhor conhecimento dos processos do reator TRIGA IPR-R1. E como foi apresentado, por meio dos cenários, podem-se usar valores determinados em qualquer um dos parâmetros, verificando seu efeito nos demais.

Portanto, o Sistema Simulador TRIGA possibilitará o estudo de parâmetros que afetam a operação do reator, sem a necessidade de usar a instalação, evitando riscos e minimizando custos e tempo de operação, otimizando e melhorando a sua aplicação.

Este trabalho é importante, principalmente levando-se em consideração os novos conceitos de instrumentação e sistemas de simulação, medição e controle, que são baseados em microprocessadores e utilizam os recursos de instrumentos virtuais e sistemas supervisórios com monitores de vídeo, típicos do estado da arte. Ele segue também as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, que sugere o uso de equipamentos e recursos digitais, bem como interface humano-máquina, que se aproximem dos sistemas usados na indústria convencional, para melhorar a confiabilidade e aumentar a flexibilidade da medição das variáveis dos processos em reatores.

9 TRABALHOS FUTUROS

Como acontece com todos os softwares o sistema desenvolvido possui algumas limitações, portanto versões novas sempre serão implementadas, com novos recursos, melhorando a aplicação. Um dos melhoramentos sugeridos é a abrangência de sua utilização em toda a faixa de potência do reator IPR-R1, chegando até a atual potência licenciada de 100 kW, ou até 250 kW, em processo de licenciamento, para a qual o núcleo já se encontra configurado. Para este melhoramento no programa deve-se inserir uma expressão matemática que leve em consideração o efeito de reatividade / temperatura que ocorre em potências de operação acima de 1 kW.

Com uma visão atenta à evolução tecnológica, como sugestão de trabalho futuro propõe-se também que o Sistema Simulador desenvolvido seja otimizado e implantado na instalação do reator TRIGA IPR-R1, para realizar a aquisição de dados de diversas variáveis operacionais.

Sugere-se também a integração do uso deste *software* no curso CTORP ou em treinamentos desta natureza, o que poderá auxiliar no estudo e no entendimento dos parâmetros neutrônicos.

A CAPES-MEC aprovou no final de fevereiro de 2010 a proposta de criação do curso de doutorado no programa de pós-graduação do CDTN (Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais). Sugere-se a inclusão de disciplinas relativas à engenharia nuclear neste curso, com aulas práticas sendo realizadas no reator IPR-R1. Os alunos deste curso, não especialistas em energia nuclear, teriam noções básicas e práticas referentes à tecnologia de reatores, permitindo orientar-se na terminologia referente a este campo e acompanhar o recente impulso desta área da engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADVANTECH. **ADAM – 4018/4510S Converter analogic digital thermocouple** - user's manual. 4th. ed. Taiwan. 1998a. 4p.
- ADVANTECH. Serial communication interface for industrial automation - **ADAM-4510/4510S RS-422/485 Repeater, ADAM-4520/4522 RS-232 to RS-422/485 converter** – user's manual. 4th. ed. Taiwan, 1998b. 4p. (Part No. 2000000290).
- ADVANTECH. **PCL-818HD High performance DAS card with programmable gain** - user's manual. 1st. ed. Taiwan, 1994. 77p. (Part No. 2003818090).
- ADVANTECH. **PCLD-789D Amplifier and multiplexer board** – user's manual. 2. ed. Taiwan, 1995. 38 p. (Part No. 2003789020).
- BRASIL. Marinha do Brasil. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. **O Programa Nuclear da Marinha**. Desafios e propostas. São Paulo: SecCTM, 2010, 9p.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento nacional**. Plano de ação 2007-2010. Brasília: MCT, 2007a.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Memória: reator nuclear Argonauta completa 40 anos**. Brasília: MCT, Agência CT, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano nacional de energia 2030**. Brasília: MME:EPE, 2007b.
- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Relatório de análise de segurança do reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: CDTN, 2007b.
- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Curso de treinamento de operadores em reatores de pesquisa**. 5. ed. Belo Horizonte: CDTN. 1997. 2 vol. (CTORP).
- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Manual de operação do reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: CDTN, 2007a.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NE-3.01**: Diretrizes básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. 24 p.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NE-6.05**: Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas. Rio de Janeiro, CNEN, 1985. 49 p.
- DALLE, H.M. **Simulação do reator TRIGA- IPR – R1 utilizando métodos de transporte por Monte Carlo**. 180 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2005.
- ELETRONUCLEAR. **Panorama da energia nuclear no mundo**. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2009. 38p. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/pdf/panorama.pdf>>. Acesso em 11.06.2010.
- FORTINI, M.A. **Análise teórico-experimental da termofluidinâmica de reatores de pesquisa refrigerados a água em regime de convecção natural**. 231 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

GENERAL ATOMICS. **Reactor instrumentation & control system console for 100 kW IPR-R1 TRIGA reactor CDTN TRIGA® reactor facility at Belo Horizonte, Brazil.** (GA-ESI). San Diego: GA, 2008.

GONÇALVES, L. B. **Calibração dos canais nucleares do reator IPEN/MB-01, obtida a partir da medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos no núcleo do reator através da irradiação de folhas de ouro infinitamente diluídas.** 2008, 114 p. Dissertação (Mestrado) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP, São Paulo. 2008.

GUZELLA, M. F. R. **Desenvolvimento de processo para imobilização de rejeitos de usinas nucleares utilizando betumes nacionais.** 2010, 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção.** 2ed. São Paulo: Blucher, 2005. 614p.

INDUSOFT. **InduSoft Web Studio.** Versão 6.0. Hilton Head Island: Unisoft, 2004. (CD-ROM)

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR. **Banco de notícias:** IEN terá mestrado acadêmico em 2010. Disponível em: <http://www.ien.gov.br/noticias/pagnoticias/2009set_mestradoacademico.php>. Acesso em 03.10.2009.

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR. **O reator Argonauta.** Disponível em: <<http://www.ien.gov.br/oinstitueto/instalacoes/serea/argonauta/index.htm>>. Acesso em 15.06.2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Modern instrumentation and control for nuclear power plant. A Guidebook.** Vienna: IAEA, 1999. (Technical Reports Series, 387)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Modernization of instrumentation and control in nuclear power plants.** Vienna: IAEA, 1998. (IAEA-TECDOC-1016).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Operational limits and conditions and operating procedures for research reactors.** Vienna: IAEA, 2008. (Safety Guide No. NS-G-4.4)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics.** Paris: OECD/IEA, 2009. 82p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13407:** Human-centred design processes for interactive systems. Geneva: ISO, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9241-11:** Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs). Part 11- guidelines for specifying and measuring usability. Geneva: ISO, 1997.

LAMARSH, J.R.; BARATTA, A.J. **Introduction to nuclear engineering.** 3 ed. New Jersey: Prentice Hall. 2001, 781p

LIESER K.H. **Nuclear and radiochemistry: fundamentals and applications.** Weinheim: VCH, 1997. 460 p.

MELLO, J.C. et al. **Introdução a geração núcleo-elétrica**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais/Instituto de Pesquisas Radioativas, 1968. 366 p. (Publicação nº 472)

MESQUITA, A. Z. **Investigação experimental da distribuição de temperaturas no reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1**. 2005, 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MESQUITA, A.Z. Experimental heat transfer analysis of the IPR-R1 TRIGA reactor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH REACTORS: SAFE MANAGEMENT AND EFFECTIVE UTILIZATION, Sydney, 5-9 Nov. 2007. **Proceedings...**, Vienna: IAEA, 2007.

MESQUITA, A.Z. Experimentos neutrônicos e termohidráulicos no TRIGA IPR-R1. In: SEMINÁRIO DE PROJETOS TÉCNICOS DO CDTN/CNEN, 2, 2010. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2010. CD.

MESQUITA, A.Z., REZENDE, H.C. Experimental investigation of heat transfer coefficients on the TRIGA IPR-R1 nuclear reactor fuel rods. In: ECI INTERNATIONAL CONFERENCE ON BOILING HEAT TRANSFER, Spoleto, 7-12 May 2006. **Proceedings...** 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Instrumentação virtual 2010**. Disponível em: <<http://digital.ni.com/worldwide/brazil.nsf/main?ReadForm>>. Acesso em 16.04.2010

NATIONAL INSTRUMENTS. **Measurement and automation - graphical programming for instrumentation**. Austin: NI, 2007.

PEDERSON, N. **Building a nuclear reactor control system upgrade with NI Labview and fieldpoint**. Los Alamos: National Instruments, 2005.

PENN STATE UNIVERSITY. **The Penn State Breazeale Reactor**: a facility for the past, present, and future of the Pennsylvania State University. University Park: PSU, 2000.

PINTO, A.J.; MESQUITA, A.Z. ; TELLO, C.C.O. Supervisory system to monitor the neutron flux of the IPR-R1 TRIGA research reactor at CDTN. In: MEETING ON NUCLEAR REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 26, 2009. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009a.

PINTO, A.J.; MESQUITA, A.Z.; TELLO, C.C.O. Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados usando LabVIEW para monitoração da potência do reator de pesquisa TRIGA IPR-R1. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 9, 2009. **Anais...** Las Palmas de Gran Canaria: Federação Iberoamericana de Engenharia Mecânica, .v. 1. p. 72-81. 2009b.

SANTORO, C.A.B., **Determinação do espectro de nêutrons no reator TRIGA pelo método de ativação**. Dissertação (Mestrado), Belo Horizonte, UFMG. 1975.

SANTOS, V.; ZANBERLAN, M. C. **Projeto ergonômico de salas de controle**, Fundación Mapfre – SP – Sucursal Brasil, 143 p. 1992.

SOUZA, R.M.G.P.,et al. **Resultados dos testes finais para o aumento de potência do reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: CDTN, 2002b. (NI-IT4-07/02).

SOUZA, R.M.G.P. **Resultados dos testes neutrônicos no reator TRIGA IPR-R1 a 100 kW**. Belo Horizonte: CDTN, 2009. (NI-SERTA-01/09).

SOUZA, R.M.G.P.; RESENDE, M.F.R.; MESQUITA, A.Z. **Procedimentos dos testes finais para o aumento de potência do reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: CDTN, 2002a. (NI-IT4-03/02)

TEIXEIRA, D.V. **Ergonomia em auxílio à decisão em operação de usinas nucleares**. 2006. 252 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2006.

TERREMOTO, L.A.A. **Fundamentos de tecnologia nuclear - reatores**. São Paulo: IPEN, 2004. 120 p. (Disciplina TNR5764).

TIGLIOLE, A.B. et al. Operational experience with the TRIGA reactor of the university of Pavia. In: WORLD TRIGA USERS CONFERENCE, 4, Lion, França, 08-10 Sept., 2008. **Proceedings...** San Diego: General Atomics, 2008.

US DEPARTMENT OF ENERGY. Assistant Secretary for Nuclear Energy and Assistant Secretary, Management and Administration. **The first reactor**. Washington DC: DOE, 1982. 51 p. (DOE/NE-0046).

VELOSO M.A. **Análise termohidráulica do reator TRIGA IPR-R1 em 250 kW**. Belo Horizonte: CDTN, 2005. 333 p. (NT EC3-05/05)

ZANGIROLAMI, D.M. **Fluxo neutrônico a 100 kW nos terminais de irradiação do reator TRIGA IPR-R1**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Belo Horizonte. 2009. 118 p.

APÊNDICE - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA SIMULADOR TRIGA

A. Condições de contorno para o uso do Sistema Simulador TRIGA

Neste apêndice, explica-se como utilizar o Sistema Simulador TRIGA, que foi desenvolvido usando o software LabVIEW[®] (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) versão 8.6 desenvolvido pela National Instruments. É essencial lembrar que este programa de simulação leva em consideração algumas características essenciais inerentes ao estudo dos parâmetros neutrônicos que são:

- A equação do Inhour, que relaciona a reatividade (ρ) inserida em reatores que estão críticos, ou seja, com potência estacionária, na qual reatividade (ρ) = 0 e o fator de multiplicação de nêutrons (k) = 1, com o período (T).
- Que a barra de Segurança se encontre totalmente extraída do reator, (posição superior), condição exigida para a operação do reator. Ela possui reatividade suficiente para produzir o *scram* (desligamento) do reator, e que pode ser movimentada da posição 150 até a posição 890.
- Que a barra de Controle esteja fixa em uma posição intermediária, por exemplo, a posição 500 (condição esta que permite a partida do reator), considerando que ela pode ser movimentada da posição 161 até a posição 890.
- Finalmente, considera-se um limite máximo de potência da ordem de 1 kW, porque após este valor ou nível de potência começa a aparecer no processo o efeito da temperatura, introduzindo reatividade negativa, o qual interfere significativamente no crescimento neutrônico. Este valor limítrofe é adotado somente didaticamente, considerando que o efeito da temperatura pode começar a interferir no processo um pouco antes ou um pouco depois de 1 kW.

B. Instalação do Sistema Simulador TRIGA

O uso do Sistema Simulador TRIGA é simples e de fácil utilização. O aplicativo é um programa executável leve e que necessita de poucos recursos de máquina (*hardware*) para ser

instalado. Como a maioria dos programas, basta o usuário clicar no arquivo executável de nome setup.exe que fica na pasta volume do CD de instalação, do Sistema Simulador TRIGA e o programa será instalado, como poder ser visto na FIG. 46

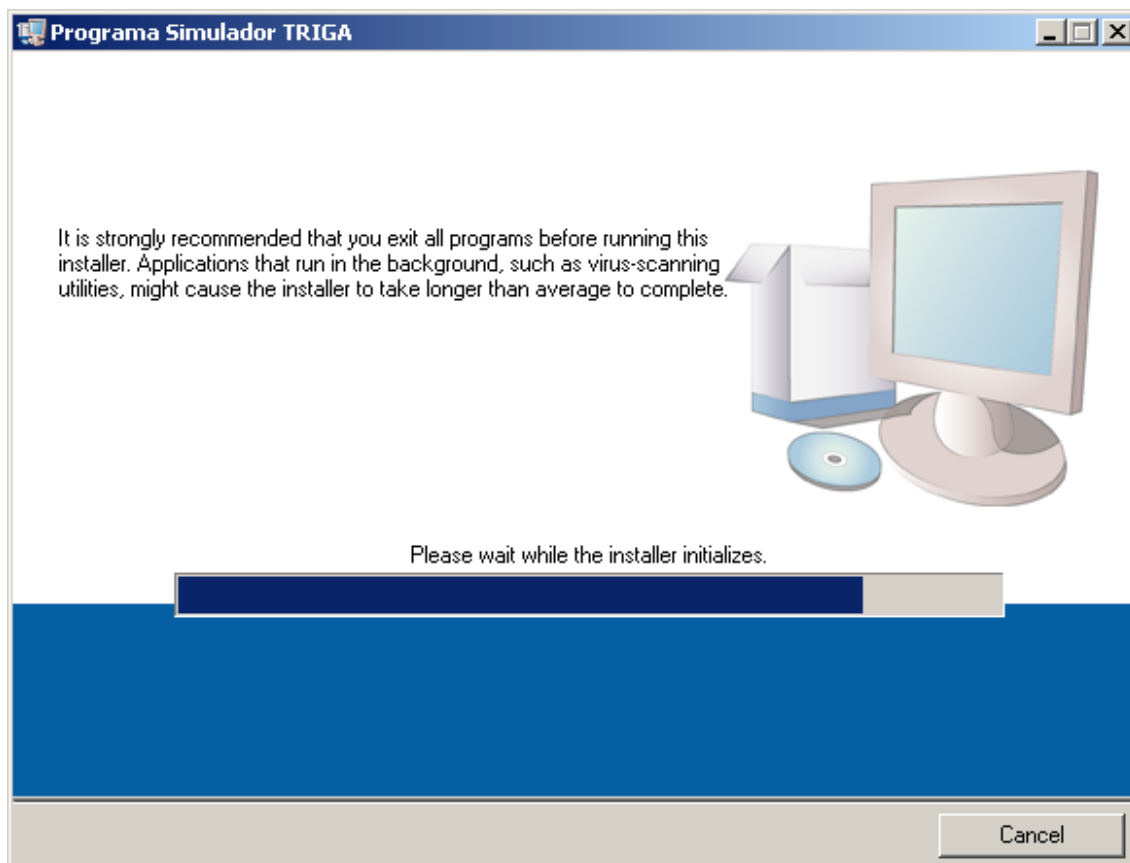


FIGURA 46 – Tela de Instalação do Sistema Simulador TRIGA

Uma cópia do Sistema Simulador TRIGA estará disponível na secretaria do curso de Pós Graduação do CDTN.

C. Configuração e Utilização dos Recursos das Guias

- **Guia Painel de Controle**

O usuário clica na guia “Painel de Controle” do aplicativo de simulação para fazer a configuração dos valores de acordo com o reator utilizado, como apresentado na FIG. 47.

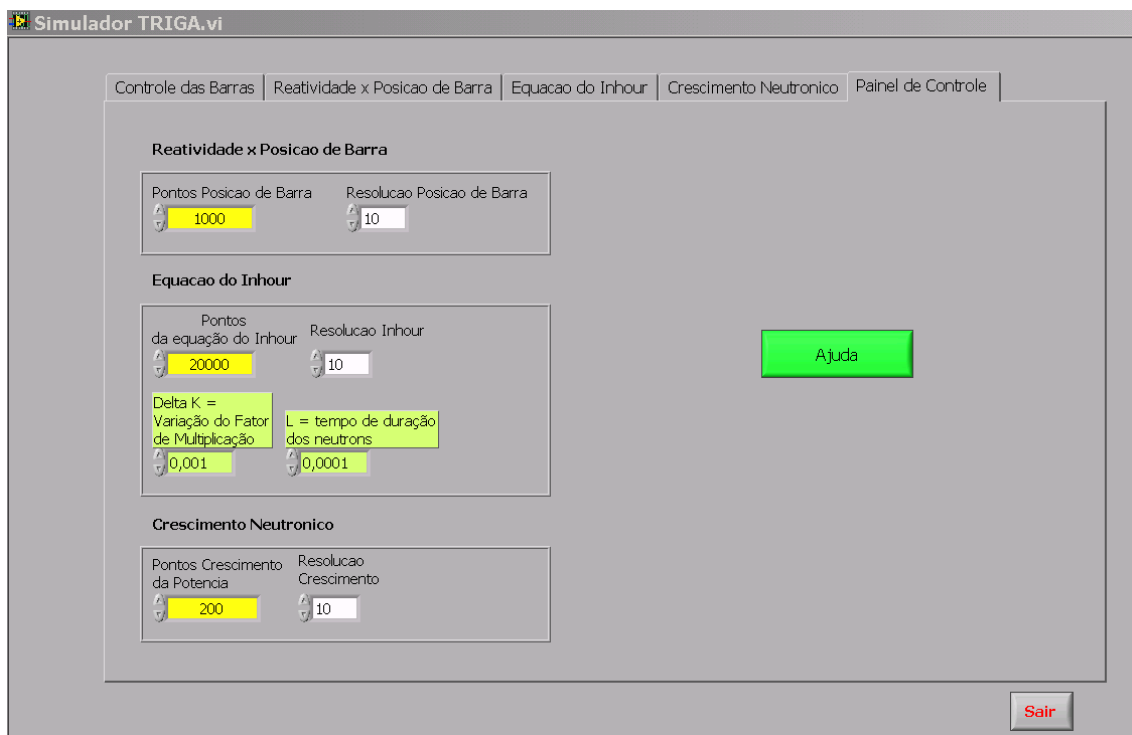


FIGURA 47 – Guia Painel de Controle

Nesta guia existem somente dois “campos controle” que podem precisar de entrada de valores de acordo com a aplicação do software, eles são referentes à equação de Inhour, que é específica para cada reator:

- O campo controle Delta K que é a variação do fator de multiplicação, utilizado na digitalização da equação do Inhour. O valor *default*, usado o para o reator TRIGA, é 0,001.
- O campo controle L que indica o tempo médio, em segundos, que separa duas gerações consecutivas de nêutrons. Para o reator TRIGA IPR-R1, este tempo é da ordem de $100\mu\text{s} = 0,0001\text{s}$.

• Guia Controle das Barras

Ao clicar na guia, “Barras de Controle”, o usuário poderá ter uma visão de uma maquete do reator TRIGA IPR-R1 com as barras de controle, posicionadas nos tubos guia e poderá fazer a simulação da introdução e da retirada de barras de controle do reator. Nesta tela a única variável que poderá ser configurada é o “Campo Controle” denominado “Incremento”, que define quantas posições de barra serão movimentadas, em cada uma das três barras de

controle, a cada vez que as teclas “Sobe Barra” e “Desce Barra” forem pressionadas e cujo valor de posição é mostrado no indicador de posição de cada barra.

Nesta tela ainda, o usuário poderá observar a situação de simulação do Scram (queda das barras de controle) clicando na tecla “Scram” de cada barra individualmente, ou na tecla “Emergência” para simular a queda das três barras ao mesmo tempo, como mostrado na FIG. 48.

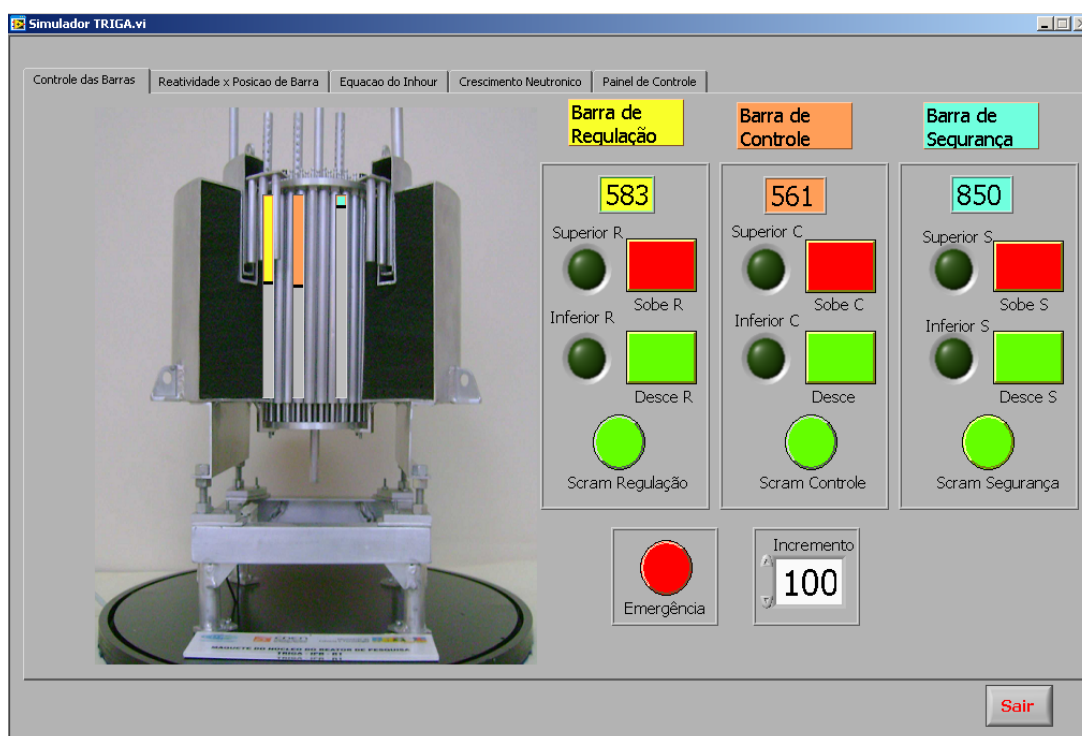


FIGURA 48 – Guia Controle das Barras

- **Guia Reatividade x Posição de Barra de Regulação**

Nesta Guia é apresentada, assim que o usuário clicar no botão de controle “Gera Reatividade”, a curva integral de calibração da barra de Regulação que relaciona a reatividade inserida no reator em função da simulação do reposicionamento da barra de Regulação. Nesta tela, por meio do movimento do cursor inicial e do cursor final, utilizando o mouse, o usuário poderá simular a retirada ou a inserção da barra de Regulação no reator de uma posição inicial qualquer para uma posição final qualquer obtendo desta forma, neste gráfico, a reatividade inserida ou retirada no reator. De posse desta informação outras análises neste contexto podem ser realizadas utilizando os outros gráficos do aplicativo. A variação da posição de

barra e a variação da reatividade inserida são mostradas nos indicadores “Delta Posição de Barra” e “Delta Reatividade” respectivamente como pode ser vista na (FIG. 49).

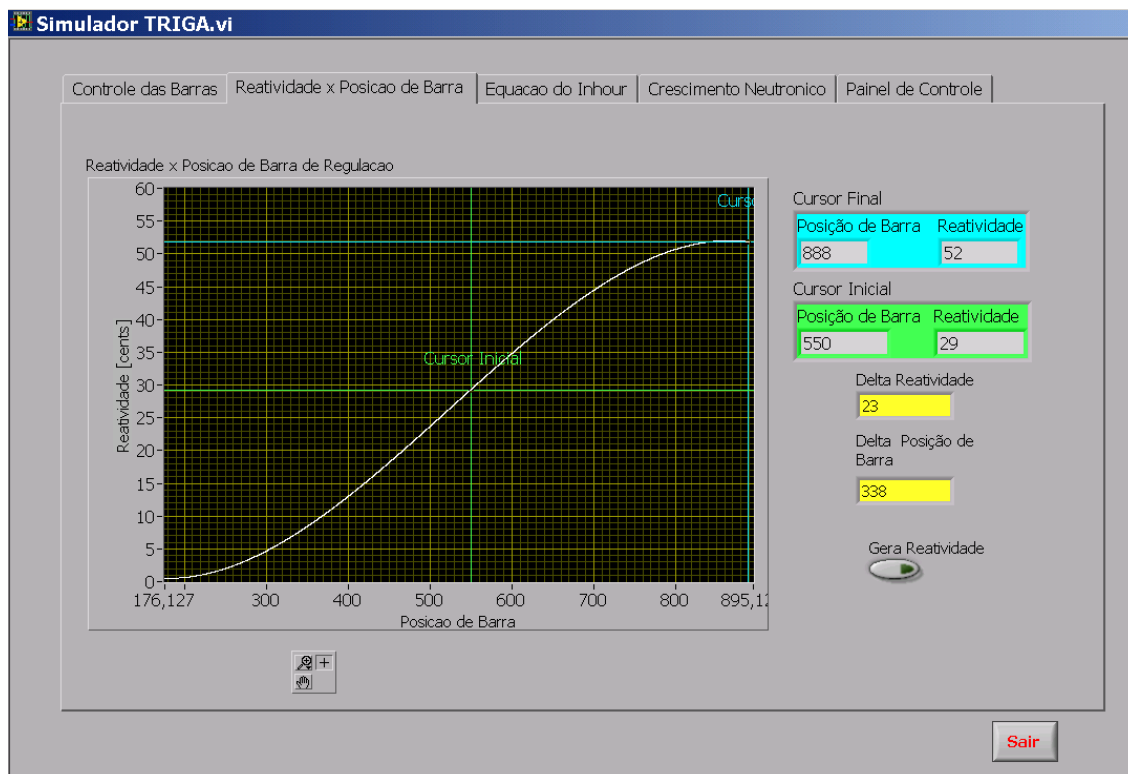


FIGURA 49 – Tela Reatividade Versus Posição de Barra de Regulação

- **Guia Equação do Inhour**

Nesta tela é apresentado, assim que o usuário clicar no botão “Gera Equação Inhour”, o gráfico da “Equação do Inhour” que relaciona a reatividade de um reator com o seu período. Neste trabalho, este gráfico foi digitalizado utilizando-se o efeito de seis grupos de nêutrons atrasados, conforme descrito em CDTN/CNEN (1997). O simples reposicionamento do cursor do mouse ao longo desta curva mostrará ao usuário, nos respectivos indicadores, os valores do período e da reatividade no ponto no qual o cursor se encontra posicionado, como se pode observar na FIG. 50.

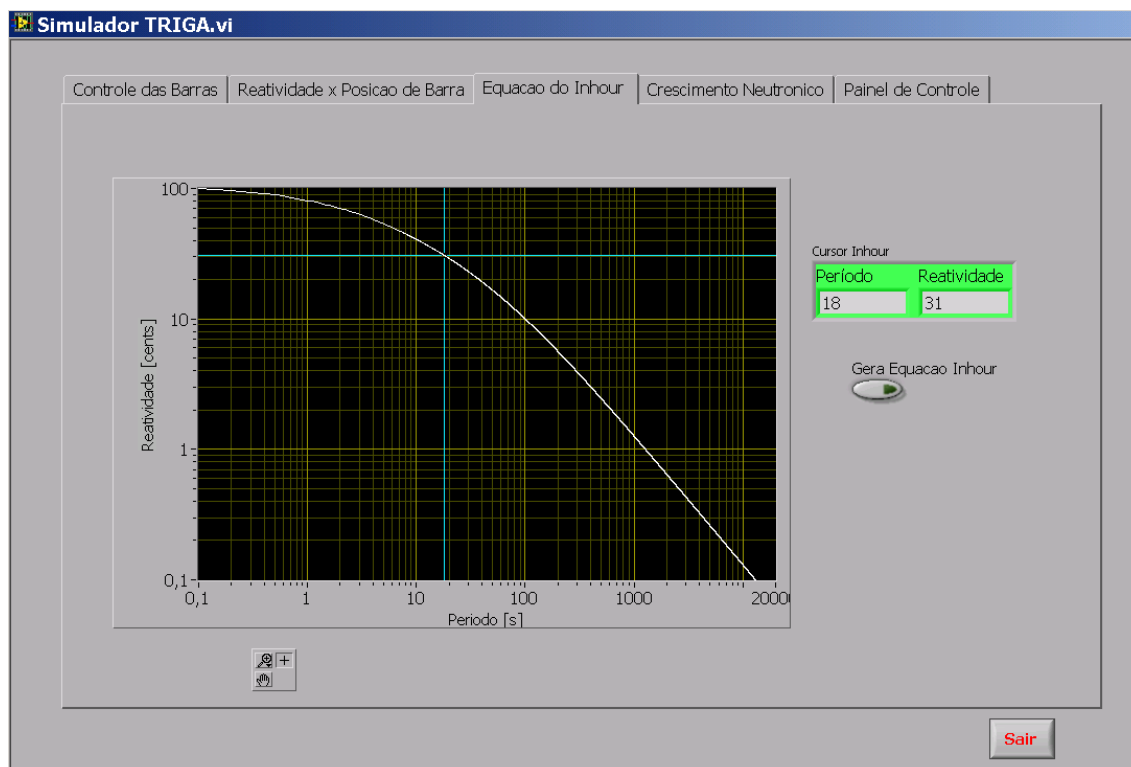


FIGURA 50 – Gráfico da equação do Inhour

Guia Crescimento Neutrônico

Na interface gráfica “Crescimento Neutrônico”, foi implementada a equação que apresenta e informa como se comporta o crescimento neutrônico antes da ocorrência do efeito da temperatura no processo, que é dada pela Equação (1):

$$N(t) = N_0 \times e^{t/T} \quad (1)$$

Lembrando ainda que o valor da constante t (tempo) da equação do crescimento neutrônico poderá ser alterado na aba “Painel de Controle”, o usuário faz a parametrização dos valores nos campos controle “Potência Inicial” e “Período” e, a qualquer instante, poderá clicar no “Botão de Controle” “Gera Crescimento Neutrônico” para produzir instantaneamente a simulação das curvas de tendência do crescimento da potência do Canal Logarítmico (FIG. 51) ou do Canal Linear (FIG. 52), que podem ser selecionados ao clicar no “Botão de Controle” “Escala de Potência”.

Além disso, são mostrados nesta tela os indicadores com os valores da “potência” e do “tempo” no ponto no qual cada cursor se encontra; como também a indicação do “Delta Potência” e “Delta Tempo” dos dois cursores. Esta informação possibilita obter o chamado

“Tempo de Dobramento” (DT) da potência, em função do posicionamento dos cursores na curva. Desta forma, diversos estudos podem ser simulados e realizados manipulando-se estas variáveis e estes gráficos com o uso do *Sistema Simulador TRIGA*.

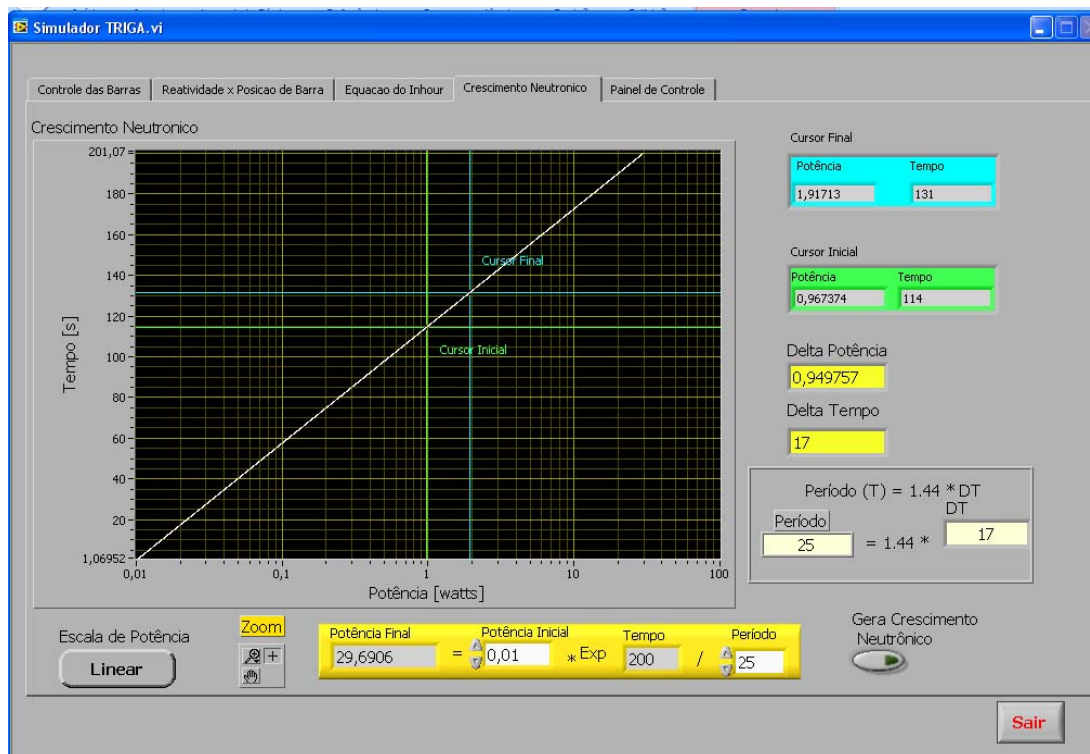


FIGURA 51 – Comportamento do canal Logarítmico

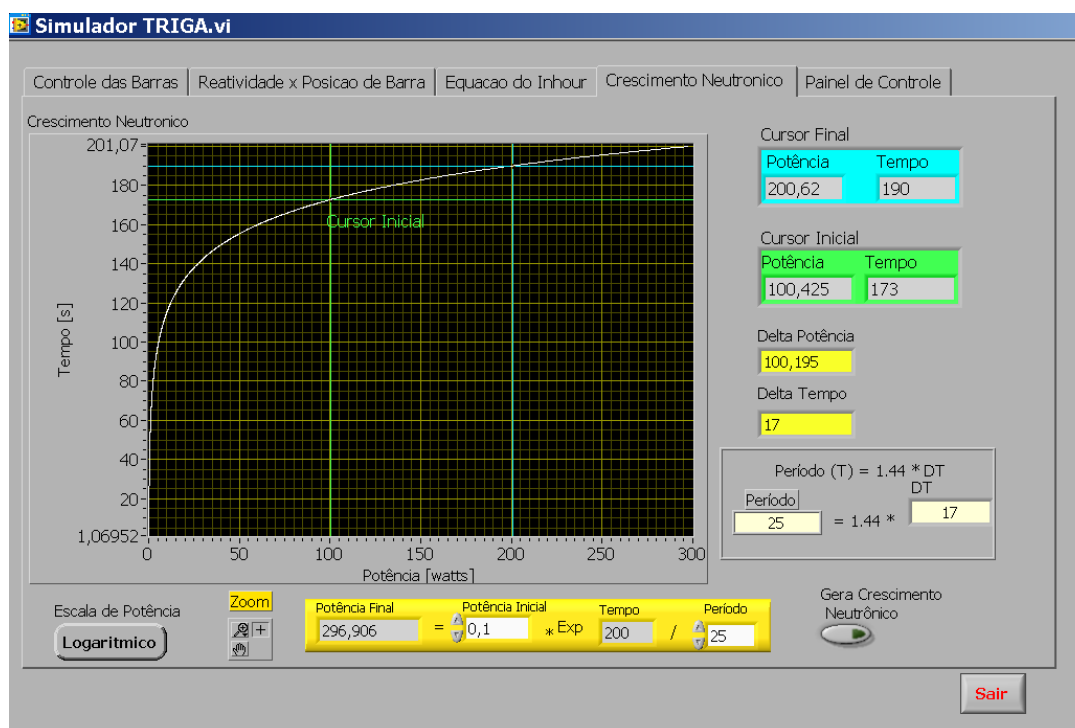


FIGURA 52 – Comportamento do Canal Linear

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)