

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

JOÃO HENRIQUE DANIEL

MEDIÇÃO DA ALTURA DO NÍVEL DE ÁGUA NO REATOR NUCLEAR
ARGONAUTA UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO DO DISPOSITIVO
ELETRÔNICO ARDUÍNO.

Rio de Janeiro

2020

JOÃO HENRIQUE DANIEL

**MEDIÇÃO DA ALTURA DO NÍVEL DE ÁGUA NO REATOR NUCLEAR
ARGONAUTA UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO DO DISPOSITIVO
ELETRÔNICO ARDUÍNO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares

Orientador: Prof. Dr. Zelmo Rodrigues de Lima
Co-orientador: Prof. Dr. Francisco José de Oliveira Ferreira

Rio de Janeiro

2020

HENR Henrique Daniel, João

Medição da Altura do Nível de Água no Reator Nuclear Argonauta Utilizando o Sensor Ultrassônico do Dispositivo Eletrônico Arduíno / João Henrique Daniel. -- Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2020.

xv, 87f. : il. ; 29,7 cm.

Orientadores: Zelmo Rodrigues de Lima e Francisco José de Oliveira Ferreira

Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2020.

1. Reator Argonauta 2. Sensor Ultrassônico 3. Arduíno

MEDIÇÃO DA ALTURA DO NÍVEL DE ÁGUA NO REATOR NUCLEAR
ARGONAUTA UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO DO DISPOSITIVO
ELETRÔNICO ARDUÍNO

João Henrique Daniel

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA COMISSÃO
NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

Prof. Zelmo Rodrigues de Lima, D. Sc.

Prof. Francisco José de Oliveira Ferreira, D. Sc.

Prof. Julio Cezar Suita, D.Sc.

Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2020

Dedico esta a dissertação ao Grande Arquiteto do Universo,
Pois nunca foi sorte sempre foi Deus.

Dedico aos meus pais, que sempre se sacrificaram para
formar minha educação.

Dedico à João Pedro, Wesley e Ione, pois sem a família não
temos base para fazer nada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Zelmo Rodrigues de Lima e Francisco José de Oliveira Ferreira pelo empenho dedicado à elaboração desta dissertação.

Aos professores do (Instituto de Engenharia Nuclear) IEN pela motivação passadas pelos mesmos que em muito contribui para minha formação no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear (PPGIEN).

Aos colegas de Classe Valquíria Bulhosa, Victor Calzavara, Juliane Sá Carvalho, Érica, Danniell Sistons e Odílio de Souza pelos momentos de estudos em conjunto e nas descontrações nos momentos difíceis.

A Corina Costa pela torcida e apoio durante e após nos processos classificatórios.

Aos colegas da Nuclep para manter o serviço em dia nos momentos de ausência para assistir as aulas e dedicação aos estudos. Agradeço também aos colegas Rafael Matias, Michael Pernes e Leonardo Duarte pelas ideias trocadas. Ao servidor do SEREA/IEN Tiago Melo pelo total apoio, para a realização dos experimentos.

Em especial a servidora do IEN Cláudia Coelho, “D. Claudia” pela assistência total nos momentos de dificuldade.

Ao colega da Nuclep Sebastião André (Tiãozinho) pelo tempo gasto na confecção dos dispositivos de fixação do sensor.

*“Não acredite em boatos, não crie boatos,
não espalhe boatos, pois alguém pode
ouvir, gostar da ideia e colocá-la em prática.
”*

Dona Arlinda
Funcionária do Centro de Treinamento da
NUCLEP.

RESUMO

O reator nuclear Argonauta instalado no IEN é um reator térmico de pesquisa tipo piscina. Desde 1965 este reator vem sendo utilizado em pesquisas envolvendo nêutrons nas áreas da física de reatores e física nuclear e também é empregado em diversas atividades de ensino e treinamento. A quantidade de dispositivos de eletroeletrônicos e eletromecânicos envolvidos em seu funcionamento é considerada grande para manter o elevado grau de segurança e confiabilidade, o que aumenta a probabilidade de falha de instrumentação. Um dos principais componentes que atua na operação do Argonauta é o volume de água leve contido em seu tanque. Atualmente o nível de água é medido utilizando dispositivos eletromecânicos conhecidos como chave boia e a sua operação está bem estabelecida usando esses dispositivos, no entanto, a utilização da chave boia tem alguns inconvenientes, pois esses dispositivos ficam por alguns momentos submersos na água, o que provoca sua oxidação e conseqüentemente mudanças na água e, além disso, a leitura das medidas que informam apenas o nível de volume máximo e mínimo, representando de certa forma uma leitura pouca detalhada. O objetivo desta dissertação é apresentar uma instrumentação eletrônica para a medição do volume de água do refletor superior. Foram utilizados um sensor ultrassônico acoplado ao dispositivo eletrônico Arduino. Esse tipo de medição funciona sem partes móveis ou contato do sensor com a água, sendo estas características uma grande vantagem. Com os dispositivos instalados no reator foram feitas leituras do fluxo de nêutrons e da reatividade em função do nível de água do refletor superior. Os resultados obtidos foram promissores, revelando que a instrumentação eletrônica pode ser uma alternativa interessante para medir o nível de água do núcleo.

Palavras-chave: Reator Argonauta, Reatividade, Volume de água, Sensor Ultrassônico, Arduino.

ABSTRACT

The nuclear reactor Argonauta installed at IEN is a thermal research reactor type pool. Since 1965 this reactor has been used in research involving neutrons in the areas of reactor physics and nuclear physics and is also used in several teaching and training activities. The number of electro-electronic and electromechanical devices involved in its operation is considered large to maintain the high degree of safety and reliability, which increases the probability of instrumentation failure. One of the main components that act in the Argonauta operation is the volume of light water contained in its tank. Currently the water level is measured using electromechanical devices known as the float switch and its operation is well established using these devices, however, the use of the float switch has some drawbacks, as these devices are submerged for a few moments in the water, which it causes its oxidation and consequently changes in the water and, in addition, the reading of the measures that inform only the maximum and minimum volume level, representing in a way a little detailed reading. The objective of this dissertation is to present an electronic instrumentation for the measurement of the water volume of the upper reflector. An ultrasonic sensor coupled to the Arduino electronic device was used. This type of measurement works without moving parts or contact of the sensor with water, these characteristics being a great advantage. With the devices installed in the reactor, neutron flux and reactivity readings were taken depending on the water level of the upper reflector. The results obtained were promising, revealing that electronic instrumentation can be an interesting alternative to measure the water level of the nucleus.

Keywords: Argonauta Reactor, Reactivity, Water Flow, Ultrasonic Sensor, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
01 Primeiro reator do tipo “Argonaut” construído pelo ANL.....	20
02 Reator de Pesquisa Argonauta.....	22
03 Núcleo do reator Argonauta.....	23
04 Núcleo do reator Argonauta - Vista isométrica.....	24
05 Reator Argonauta - Corte horizontal.....	25
06 Elementos combustíveis.....	26
07 Variação da seção de choque de fissão com a energia do nêutron incidente no urânio-235.....	28
08 Sala de Controle do Reator Argonauta.....	35
09 Módulo eletrônico ultrassônico HC-SR04 Fabricado pela Cytron Technologies.....	38
10 Display Cristal Líquido - LCD-016M002B.....	39
11 Placa Arduíno UNO.....	39
12 Suporte, sensor ultrassônico e capa de chumbo para o dispositivo eletrônico.....	40
13 Sensor ultrassônico instalado no modelo teste, na Figura é possível ver o dispositivo ainda sem a capa de proteção em chumbo.....	41
14 Em destaque o dispositivo com a capa de chumbo instalado na borda do tanque do Argonauta. Pode-se observar também o cabo de Comunicação, saindo do sensor e entrando na eletrocalha.....	42
15 Relação entre a altura do nível de água e a contagem de nêutrons.....	49
16 Relação entre a altura do nível de água e os neutros perdidos.....	49
17 Curva da barra de controle preciso do reator Argonauta. Dados para criação da curva foram retirados do Relatório de Análise de Segurança do Reator Argonauta Volume 1. Gráfico feito no programa Excel.....	50
18 Porcentagem barra de controle preciso fora x nível de água em centímetros acima dos elementos combustíveis.....	52
19 Reatividade em porcentagem x nível de água em centímetro acima dos elementos combustíveis.....	53
A1 Ilustração da propagação do som no ar.....	60
A2 Ilustração de um pulso de pressão se deslocando em direção a um elemento de ar não perturbado.....	61
A3 Ilustração de elemento de ar comprimido.....	62
B1 Sensor Ultrassônico com placa eletrônica Arduíno e display diagrama unifilar.....	68
C1 Display Window 16x2.....	69
C2 Diagrama em bloco do LCD fonte.....	70

C3	Diagrama de Tempo.....	71
C4	Caracteres formados de acordo com cada grupo de instrução.....	72
C5	Caracteres formados de acordo com cada grupo de instrução.....	74
D1	Identificação dos pinos de conexão e dos principais componentes da placa do Arduino UNO.....	77
E1	Montagem para testar a programação no Arduino.....	87

Lista de Tabelas

Tabela		Pág.
01	Especificações do Sensor Ultrassônico HC-SR04.....	38
02	Relação entre a contagem de nêutrons e a altura do refletor superior.....	48
03	Dados coletados durante o experimento Nível de água x Reatividade no Reator Argonauta.....	51
B1	Tabela B1: Número de falhas e MTTF Bóia e Sensor Hc-sr04	68
C1	Conjunto de instruções do Display.....	70
C2	Parâmetros Elétricos do LCD fornecidos pela Vishay Eletronics.....	72
D1	Descrição dos pinos de alimentação da placa do Arduíno UNO.....	77
D2	Funções especiais de alguns dos pinos de entrada/saída do Arduíno UNO.....	78
D3	Parâmetros Elétricos da placa Arduíno Uno.....	79

Lista de Siglas

ANL	- Argonne National Laboratory
CNEN	- Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDTN	- Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
IAEA	- International Atomic Energy Agency
IEN	- Instituto de Engenharia Nuclear
IPEN	- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
PPGIEN	- Programa de Pós-Graduação do Instituto de Engenharia Nuclear
NUCLEP	- Nuclebrás Equipamentos Pesados
LCD	- Display Cristal Líquido
RAM	- Random Access Memory
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	- Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	16
1.1. REATORES DE PESQUISA.....	16
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO.....	18
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	19
CAPITULO 2: O REATOR DE PESQUISA ARGONAUTA.....	20
2.1. HISTÓRICO.....	20
2.2. DESCRIÇÃO DO REATOR ARGONAUTA.....	22
2.3. FUNDAMENTOS DA FÍSICA DE REATORES.....	26
2.3.1 Reações Nucleares e Seção de Choque.....	26
2.3.2 Frequência de Interação, Densidade de Taxa de Reação e Fluxo de Nêutrons.....	28
2.3.3 Moderação de Nêutrons e Refletores.....	30
2.3.4 Criticalidade.....	30
2.3.5 Reatividade.....	32
2.3.6 Potência.....	33
2.4 OPERAÇÃO DO REATOR ARGONAUTA.....	34
CAPITULO 3: METODOLOGIA.....	37
3.1. SENSOR ULTRASSÔNICO.....	37
3.2. DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO.....	38
3.3. PLACA ELETRÔNICA ARDUÍNO UNO.....	39
3.4 MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	40
3.4.1. Construção do Suporte e Teste de Fixação.....	40
3.4.2. Instalação dos Cabos de Comunicação e Alimentação.....	41
3.4.3. Instalação do Sensor no Vaso do Reator Argonauta.....	42
3.5. INÍCIO DOS TESTES NO REATOR.....	43

3.6.	CONTAGEM DE NÊUTRONS COM REATOR SUB-CRÍTICO.....	44
3.7.	MEDIDA DA REATIVIDADE COM O REATOR CRÍTICO.....	45
CAPITULO 4: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....		47
4.1.	CONTAGENS DE NÊUTRONS EM FUNÇÃO DA ALTURA DO REFLETOR.....	47
4.2.	REATIVIDADE EM FUNÇÃO DA ALTURA DO REFLETOR.....	50
CAPITULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		55
5.1.	CONCLUSÕES.....	55
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		57
APÊNDICE A: ONDAS SONORAS.....		61
A.1.	CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS SONORAS.....	61
A.2.	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM.....	62
A.3.	REFLEXÃO ULTRASSÔNICA.....	63
APÊNDICE B: FUNCIONAMENTO DO SENSOR ULTRASSÔNICO.....		66
B.1	FUNCIONAMENTO	66
B.2	CONFIABILIDADE	67
APÊNDICE C: FUNCIONAMENTO DO DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO..		68
C.1.	DESCRIÇÃO.....	69
C.2.	CARACTERÍSTICAS.....	69
C.3.	GUIA DO USUÁRIO.....	70
C.4.	PARÂMETROS ELÉTRICOS FORNECIDOS PELA VISHAY ELETRONICS.....	74
APÊNDICE D: DESCRIÇÃO DA PLACA ELETRÔNICA ARDUÍNO UNO...		76
D.1.	BREVE HISTÓRICO.....	76
D.2.	PRINCIPAIS INFORMAÇÕES.....	76
D.3.	CARACTERÍSTICAS.....	77
D.4.	DESCRIÇÕES DOS CONECTORES DA PLACA DO ARDUÍNO...	78
D.5.	DESCRIÇÃO DOS PINOS DE ALIMENTAÇÃO DA PLACA UNO..	79

APÊNDICE E: PROGRAMAÇÃO DA PLACA ARDUÍNO.....	83
E.1. PROGRAMA ARDUÍNO PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA NO REATOR ARGONAUTA.....	83
E.2. SIMULAÇÃO PARA TESTAR O PROGRAMA.....	87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Reatores de Pesquisa

Os reatores de pesquisa são reatores nucleares usados para pesquisa, desenvolvimento, educação e treinamento. Esses reatores compreendem um amplo conjunto de reatores nucleares civis e comerciais que geralmente não são usados para geração de energia. O objetivo principal dos reatores de pesquisa é fornecer uma fonte de nêutrons para pesquisas e outros fins. Os feixes de nêutrons produzidos podem ter características diferentes dependendo da aplicação. Esses reatores apresentam um tamanho menor em relação aos reatores de potência cuja função principal é produzir calor para gerar quantidades úteis de energia elétrica. A maioria dos reatores de pesquisa produz uma potência que não passa de 100 MW, em comparação com 3000 MW para um típico reator de potência. Os reatores de pesquisa são menos complexos do que os reatores de potência e operam em temperaturas mais baixas. Eles precisam de uma quantidade muito menor de combustível e geram muito menos produtos de fissão que se acumulam à medida que o combustível é queimado. Por outro lado, seu combustível requer urânio altamente enriquecido, normalmente até 20% de U-235, embora alguns mais antigos ainda usem 93% de U-235. Seu ciclo de combustível envolve a fabricação de combustível; seu uso no reator; o armazenamento temporário, reprocessamento ou eliminação direta de combustível irradiado; e o gerenciamento de rejeitos radioativos. Eles também apresentam uma densidade de potência muito alta no núcleo, o que requer recursos de projeto especiais. Assim como os reatores de potência, o núcleo precisa de resfriamento que pode ser de forma passiva, forçada ou de ambos os tipos. Normalmente, um moderador é necessário para desacelerar os nêutrons e aumentar a taxa de fissão. Como a produção de nêutrons é sua função principal, a maioria dos reatores de pesquisa também precisa de refletores

para reduzir a fuga de nêutrons do núcleo. Geralmente, o refrigerante, moderador e refletor são constituídos de água leve (WNA, 2020).

Os reatores de pesquisa com energia térmica de alguns megawatts têm todos os sistemas de um reator de energia mais elevada, exceto os reatores de potência para geração de eletricidade. Portanto, um reator de pesquisa é bem apropriado para que as pessoas possam obter uma boa compreensão dos meandros e complexidades do controle da reação em cadeia de fissão e do gerenciamento operacional geral de um reator nuclear, enquanto que o treinamento na parte de engenharia convencional de uma NPP pode ser ministrado em usinas de grande porte geradoras de eletricidade a partir de combustíveis fósseis. Um reator de pesquisa também forma um núcleo em torno do qual vários laboratórios científicos e de engenharia se estabelecem para criar um centro de pesquisa multidisciplinar fornecendo assim importante apoio em longo prazo ao programa de energia nuclear de um país (ALONSO, 2012).

A experiência adquirida no projeto, construção e operação de um reator de pesquisa é extremamente útil no desenvolvimento de uma base sólida para o programa de energia nuclear. O pessoal treinado em um reator de pesquisa é capaz de assimilar rapidamente o conhecimento necessário para operar uma NPP e, assim, um bom quadro de pessoal bem treinado pode ser criado em um tempo razoavelmente curto para gerenciar um programa de energia nuclear. A operação de um reator de pesquisa também impulsiona o estabelecimento de uma cultura de segurança tão essencial para o sucesso do programa de energia nuclear. Talvez seja por essa razão que todos os países que operam usinas nucleares atualmente iniciaram suas atividades nucleares estabelecendo primeiro um reator de pesquisa (ALONSO, 2012).

Os reatores de pesquisa desempenharam e continuam a desempenhar um papel extremamente importante no desenvolvimento da ciência e tecnologia nuclear, eles ocupam um lugar indispensável nos programas de energia nuclear (IAEA, 2020a). Um reator de pesquisa facilita a produção de radioisótopos que são amplamente usados em aplicações médicas, industriais e em outras áreas. Isso fornece uma boa oportunidade para estabelecer instalações para preparar alvos para irradiação no reator, processamento dos materiais irradiados para a produção de fontes seladas e radiofármacos, transporte de radioisótopos e suas várias aplicações

médicas e industriais para benefício da sociedade (ALONSO, 2012). Além da produção de radioisótopos, eles são usados para pesquisas em física, biologia e ciência dos materiais, e para educação e treinamento científico e tecnológico (IAEA, 2020a). De certa forma, estes aspectos benéficos da energia nuclear ajudam a condicionar a mente do público para a aceitação da energia nuclear (ALONSO, 2012).

Para que a pesquisa nuclear e o desenvolvimento de tecnologia continuem a prosperar, os reatores de pesquisa devem ser operados com segurança e confiabilidade, utilizados de forma eficiente, reconicionados quando necessário, fornecidos com serviços adequados de ciclo de combustível sem proliferação e desativados com segurança no final da vida (IAEA, 2020a). De mais de 820 reatores de pesquisa construídos em todo o mundo, cerca de 220 ainda estão em operação. A Rússia tem o maior número de reatores de pesquisa em operação (~ 53), seguida pelos EUA (~ 51) e China (~ 16). Os reatores de pesquisa estão distribuídos por 56 Estados-Membros da IAEA, incluindo 40 países em desenvolvimento (IAEA, 2020b). No Brasil existem quatro reatores de pesquisa em operação, quais sejam: IEA-R1 e IPEN/MB-01, no IPEN, localizado no campus da USP em São Paulo; IPR-R1 no CDTN, localizado no campus da UFMG, em Belo-Horizonte e o Argonauta no IEN, localizado no campus da UFRJ no Rio de Janeiro. Os dois primeiros são do tipo piscina, o terceiro é do tipo Triga Mark I, e o último é do tipo Argonaut. Além desses reatores, está planejada a construção do RMB em Iperó no interior do estado de São Paulo.

1.2. Objetivo do Trabalho

O assunto principal nesta dissertação versa sobre o reator Argonauta do IEN. A inauguração oficial do reator Argonauta ocorreu em 7 de maio de 1965. Com mais de cinco décadas de existência o reator Argonauta passou por algumas modificações e melhorias. Um dos principais componentes que atua na operação do Argonauta é o volume de água leve contido em seu tanque. Atualmente o nível de água é medido utilizando dispositivos eletromecânicos conhecidos como chave boia e a sua operação está bem estabelecida usando esses dispositivos, no

entanto, a utilização da chave boia tem alguns inconvenientes, pois esses dispositivos ficam por alguns momentos submersos na água, o que provoca sua oxidação e conseqüentemente mudanças na água e, além disso, um ponto de vista importante está atrelado à leitura das medidas as quais ficam diretamente dependentes da quantidade do número de boias, que vão informar apenas o nível de volume máximo e mínimo, representando de certa forma uma leitura pouca detalhada. Esta dissertação tem como objetivo propor uma nova forma de medir o nível de água do reator Argonauta utilizando um sensor ultrassônico controlado pelo conhecido dispositivo eletrônico Arduíno. Com essa nova forma de leitura será possível registrar o nível de água detalhadamente no refletor superior, permitindo uma análise do comportamento do fluxo de nêutrons e da reatividade em função do nível de água nesse refletor.

1.3. Organização do Texto

O texto da dissertação está organizado na seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o histórico, descrição e operação do reator Argonauta, bem como de alguns fundamentos da física de reatores. No capítulo 3 é apresentada a metodologia empregada, onde são descritos brevemente a instrumentação e a sua instalação no reator e como foram desenvolvidas as experiências. No capítulo 4 são apresentados os resultados as análises dos dados. E no capítulo 5 é apresentada as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

O REATOR DE PESQUISA ARGONAUTA

2.1. Histórico

Em meados da década de 50, verificou-se a necessidade de se ter um tipo de reator que permitisse a sua instalação em universidades para fins de treinamento de futuros engenheiros e para a realização de pesquisas, com um baixo custo e uma alta segurança. Assim, visando estas condições, o Argonne National Laboratory (ANL), nos Estados Unidos, idealizou o projeto do reator Argonaut. Quando aplicado a reatores nucleares, o termo “Argonaut” refere-se a uma classe de pequenos reatores de treinamento e pesquisa nucleares e é, na verdade, um acrônimo para **Argonne Nuclear Assembly for University Training**. O reator Argonaut original foi construído em Argonne por cerca de US \$ 100.000 e tornou-se crítico pela primeira vez em 9 de fevereiro de 1957 (Figura 1). Este reator moderado e refrigerado a água de 10 kW foi construído para ensinar teoria do reator e física nuclear para estudantes universitários e operou em até 1972, quando foi desligado, desmontado e enviado para Taiwan para continuar sua missão de treinar estudantes.



Figura 1. Primeiro reator do tipo “Argonaut” construído pelo ANL.

Estudantes de mais de 40 países que frequentaram a Escola Internacional de Ciência e Engenharia Nuclear do Argonne foram treinados no reator durante sua operação. Conforme registrado no Banco de Dados de Reatores de Pesquisa da IAEA, foram construídos 29 reatores do tipo Argonaut e atualmente três estão em operação: University of Florida Training Reactor na Universidade da Flórida, Estados Unidos, University Test Reactor na Universidade de Kinki, Japão e o Argonauta no IEN.

A fundação do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) foi resultado dos esforços dos primeiros engenheiros nucleares do Rio de Janeiro, com o apoio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Enviados para treinamento nos Estados Unidos como bolsistas do programa “átomos para a paz” do governo americano, eles propuseram, na volta ao país, a construção de um reator experimental para o desenvolvimento de aplicações pacíficas da energia nuclear. Assim, por meio de um convênio entre a CNEN e a antiga Universidade do Brasil, atual Universidade Federal do Rio de Janeiro, nasceu no campus da UFRJ na Ilha do Fundão, em maio de 1962, o Instituto de Engenharia Nuclear, com a missão de abrigar e operar o reator de pesquisas proposto (IEN/CNEN, 2018).

O reator brasileiro, batizado de Argonauta, foi desenvolvido segundo o projeto Argonaut do ANL. Entretanto, deve-se destacar que foram feitas várias modificações no projeto original, com o intuito de se possibilitar o uso de componentes nacionais. Assim sendo, o reator Argonauta, redesenhado e construído pelas empresas brasileiras CBV e MICROLAB com 93% de componentes nacionais, atingiu a sua primeira criticalidade em 20 de fevereiro de 1965 (MELLO e INTRATOR, 1965). O engenheiro Luiz Aghina liderou o processo de montagem, testes e operação do novo reator brasileiro.

O reator Argonauta, instalado no IEN (Figura 2), é um reator térmico de pesquisa tipo piscina com uma potência máxima de 5 kW e uma potência atual de operação em torno de 500 W. Desde 1965 este reator vem sendo utilizado em pesquisas envolvendo nêutrons nas áreas da física de reatores e física nuclear. Sob a administração do Serviço do Reator Argonauta (SEREA) o reator tem entre as suas principais linhas de pesquisa ensaios não destrutivos com nêutrons térmicos nas

áreas de biologia, indústria, meio ambiente e segurança pública nacional. Também merece destaque, a produção de radioisótopos para serem utilizados como traçadores em pesquisas nas áreas ambiental e industrial. Ao longo dos anos, o reator tem sido utilizado por universidades e instituições, para ministrar diversas aulas e disciplinas em suas dependências, completando a formação de alunos, da graduação ao doutorado (IEN/CNEN, 2018). Em comemoração pelos 50 anos da inauguração do reator Argonauta, o prédio que abriga o reator recebeu o nome de Luiz Osório de Brito Aghina.



Figura 2. Reator de Pesquisa Argonauta.

2.2. Descrição do Reator Argonauta

O núcleo do reator Argonauta, apresentado na Figura 3, é constituído de dois cilindros concêntricos de alumínio formando um anel onde são colocados os elementos combustíveis constituídos por placas e separados por cunhas de grafite. Existem vinte e quatro posições para colocação dos elementos combustíveis. Nas posições não utilizadas por esses elementos são colocados blocos de grafite nas mesmas dimensões. Na parte central e na parte externa, temos os refletores interno e externo. No refletor interno, também denominado de coluna térmica interna, existem cinco canais de acesso (gavetas) que possibilitam a realização de medidas experimentais.

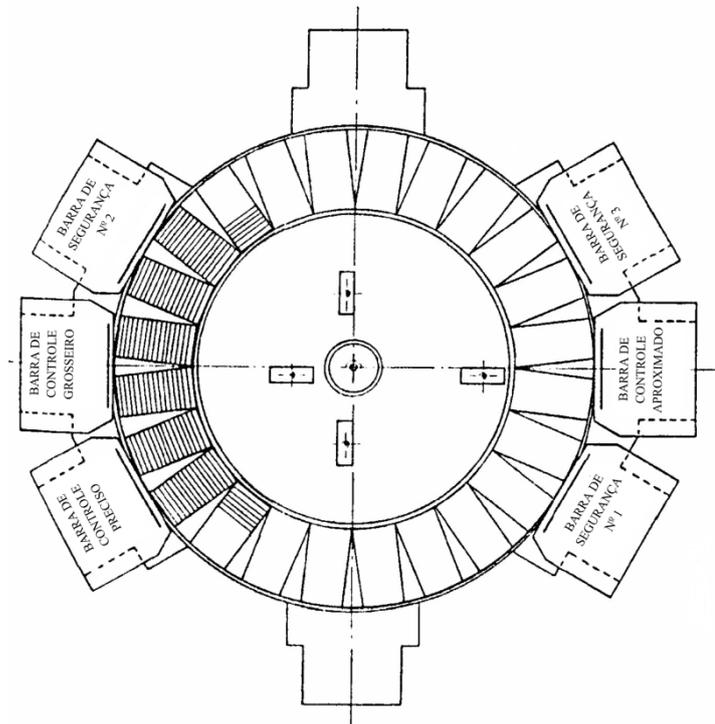


Figura 3. Núcleo do reator Argonauta.

Acima e abaixo dos elementos combustíveis a água é empregada como refletor (Figura 4). O núcleo central anular do reator é envolvido pelo refletor externo formado por blocos de grafite empilhados e que possui uma região de maior comprimento, denominada coluna térmica externa, contendo várias gavetas para introdução de amostras para irradiação (Figura 5). O canal denominado J-9 é o principal canal de irradiação por possuir algumas particularidades a mais que os outros como: estar situado exatamente a meia altura do elemento combustível e ter seu início junto ao tanque de alumínio externo do núcleo. Nas laterais do reator existem dois canais de seção quadrada que atravessam a blindagem. Nesses, são introduzidos dois plugs, denominados 1 e 2, construídos em aço e preenchidos com concreto e barita. O final de cada tubo é constituído de um tarugo de grafite com quatro orifícios, os quais podem ser utilizados para irradiação de amostra.

Mais externamente o núcleo do reator é envolto por vários blocos de concreto de diferentes dimensões e por um tanque de água para evitar a formação de feixes de nêutrons e de gamas indesejáveis (blindagem biológica), conforme pode ser visto na Figura 5.

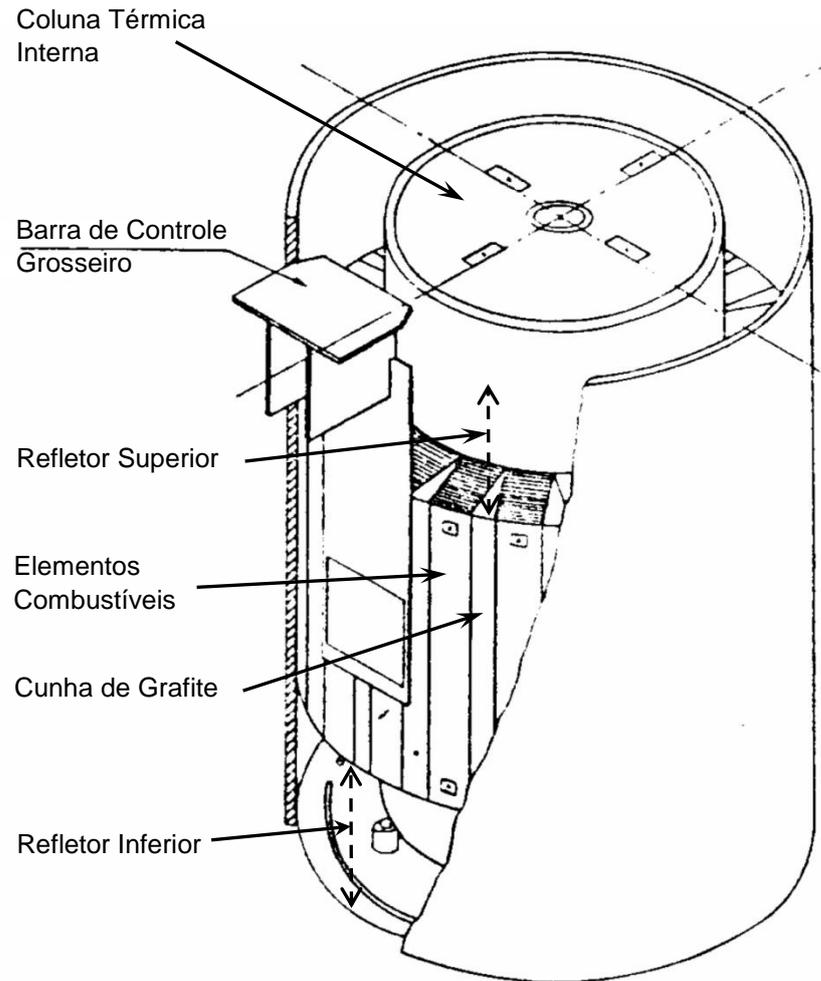


Figura 4. Núcleo do reator Argonauta - Vista isométrica.

Os elementos combustíveis do reator foram fabricados no IPEN. Atualmente há três tipos de elemento combustível em uso no reator, todos contendo placas planas com revestimento de alumínio: a) 4 elementos, cada um contendo 17 placas com 21 g de U_{235} por placa; b) 2 elementos, cada um contendo 11 placas com 21 g de U_{235} por placa mais 6 placas com 9,84 g de U_{235} por placa; c) 2 elementos, cada um contendo 7 placas com 9,84 g de U_{235} por placa mais meio prisma de grafite (TERREMOTO, 2014). O conjunto de placas que constitui um elemento combustível é fixado por meio de dois pinos que atravessam as mesmas, próximos às extremidades, mantendo um espaçamento de 6,77 mm entre elas. Os elementos podem ser desmontados e placas falsas (feitas só de alumínio) podem ser colocadas no lugar das placas combustíveis.

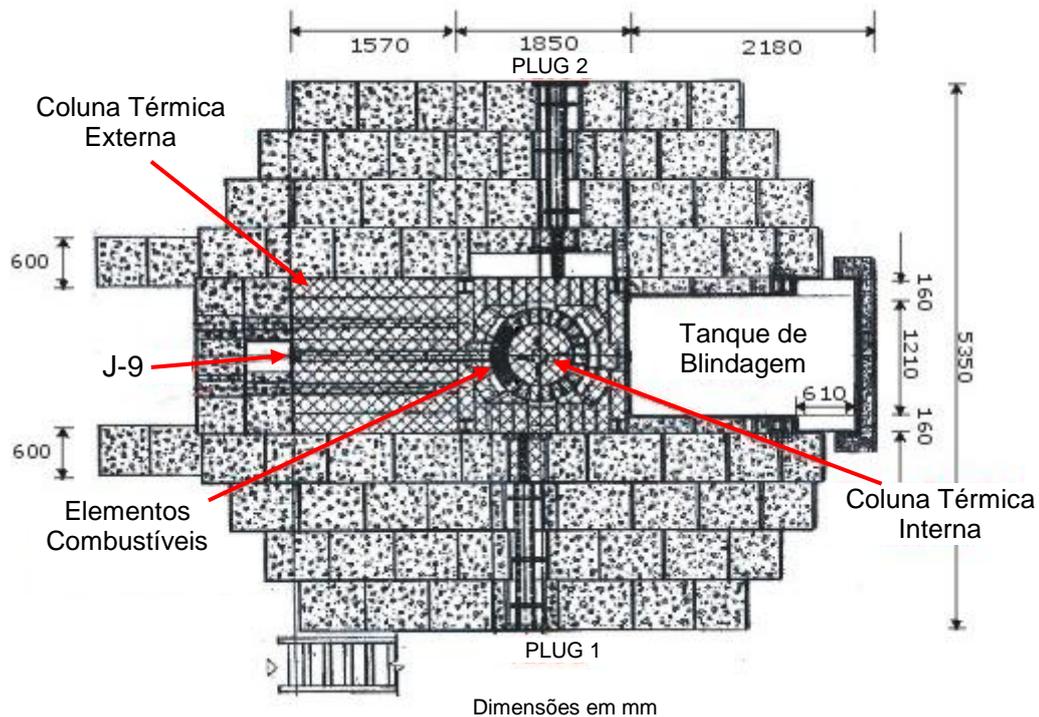


Figura 5. Reator Argonauta - Corte horizontal.

Cada placa combustível possui aproximadamente 7,25 cm de largura e 61,0 cm de comprimento, tendo espessuras de 0,243 cm (placas com 21 g de U_{235}) ou de 0,182 cm (placas com 9,84 g de U_{235}).

Os elementos combustíveis (Figura 6) são constituídos de placas contendo uma mistura sinterizada de alumínio em pó e óxido de urânio (U_3O_8), enriquecido em 19,91% e revestidas por alumínio. As placas são espaçadas de modo que a água penetre entre elas permitindo a moderação dos nêutrons e a refrigeração dos elementos combustíveis.

Para iniciar as fissões o reator tem uma fonte de Am-Be móvel, que é deslocada por um mecanismo eletro-mecânico comandada pela mesa de controle.

Apesar da potência máxima nominal de projeto do reator ser 5 kW, o mesmo opera a baixa potência, usualmente 170 W ou 340 W, sendo a potência máxima licenciada para uma operação contínua igual a 500 W. O fluxo máximo de nêutrons térmicos no núcleo perfaz 10^9 nêutrons \times cm $^{-1}$ s $^{-1}$.

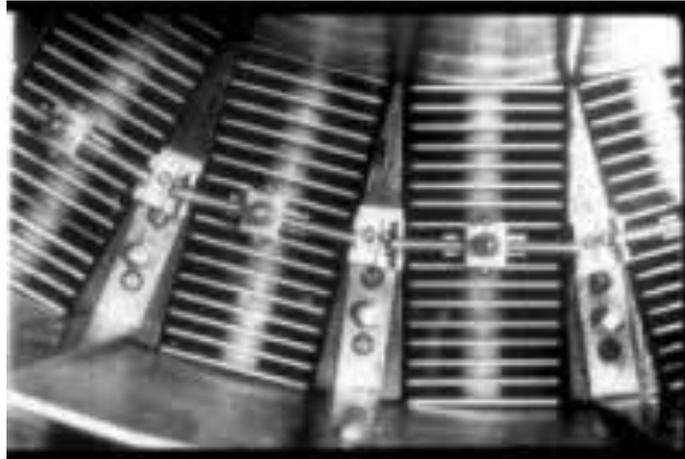


Figura 6. Elementos combustíveis.

O controle do reator é feito por intermédio de seis barras, constituídas por placas de cádmio metálico revestidas com alumínio, sendo três utilizadas como barras de segurança e três utilizadas como barras de controle. As barras se deslocam verticalmente dentro de canais existentes no grafite refletora, situados paralelamente à geratriz do cilindro maior, no entorno do núcleo.

Adicionalmente, o controle do reator pode ser feito por drenagem da água e também por borbulhamento de nitrogênio para induzir vazios na água, o que introduz reatividade negativa no núcleo. O reator possui coeficiente de reatividade negativo, tanto de temperatura como de vazios, característica que o torna intrinsecamente seguro.

2.3. Fundamentos da Física de Reatores

2.3.1. Reações Nucleares e Seção de Choque

A física de reatores tem como base as reações nucleares provocadas pela interação nêutron-núcleo. Os dois mecanismos de maior interesse em aplicações na física do reator nuclear são o espalhamento potencial e a formação de núcleo composto. No espalhamento potencial, que é um espalhamento do tipo elástico, o

nêutron é *rebatido* pelo campo de força (potencial nuclear) do núcleo sem realmente penetrar na superfície do núcleo. Na formação de núcleo composto, o nêutron é primeiro absorvido pelo núcleo, formando um núcleo de número de massa $A+1$ (núcleo composto) que depois decai ocorrendo uma das seguintes reações: fissão, captura radioativa, alguns tipos de espalhamento, produção de partículas carregadas e produção de nêutrons. A fissão e a captura radioativa são as interações mais prováveis de ocorrerem para nêutrons de baixa energia ($E < 1$ eV), nêutrons térmicos. Na reação de fissão o núcleo composto decai se dividindo em dois núcleos mais leves e com massas diferentes na maioria das vezes. Além disso, dois ou três nêutrons são emitidos. A energia média liberada em uma fissão é de 200 MeV e a energia média do nêutron emitido é de 2 MeV. A fissão ocorre apenas no material combustível. Na reação de captura o núcleo composto decai em uma cascata de gamas de alta energia. Essa reação não é menos importante que a fissão, pois ela remove nêutrons da reação em cadeia. A reação de captura ocorre tanto no combustível como em materiais de controle.

A probabilidade de uma interação nêutron-núcleo ocorrer é caracterizada por uma quantidade chamada de seção de choque. Geralmente é representada pela letra σ e a sua unidade é dada em barns, b , que corresponde à 10^{-24} cm^2 . Quando se considera um meio material com densidade atômica N , [$\# \text{ átomos/cm}^3$], mas não apenas um núcleo alvo, definimos a seção de choque macroscópica que caracteriza a probabilidade, por comprimento de caminho viajado pelo nêutron, que ele sofra uma reação ao interagir com um núcleo do meio. A seção de choque macroscópica é dada por: $\Sigma = N\sigma$, cuja unidade é [$1/\text{cm}$]. A seção de choque depende da energia do nêutron incidente, por exemplo, a seção de choque de fissão, σ_f , do urânio-235 varia com a energia conforme ilustrado na Figura 7. Podemos observar no gráfico que existem duas regiões com comportamentos diferentes: um comportamento em que a seção de choque depende do inverso da energia ($1/E$ ou $1/v$) para energias abaixo de 10^{-7} MeV e um comportamento ressonante na faixa de energia entre 10^{-7} e 10^{-2} MeV. O comportamento $1/E$ ocorre devido que, em energias abaixo da região de ressonância, a probabilidade de interação é governada pelo tempo durante o qual o nêutron se encontra na vizinhança do núcleo. Este tempo varia de maneira inversamente proporcional à velocidade do nêutron. Já o comportamento

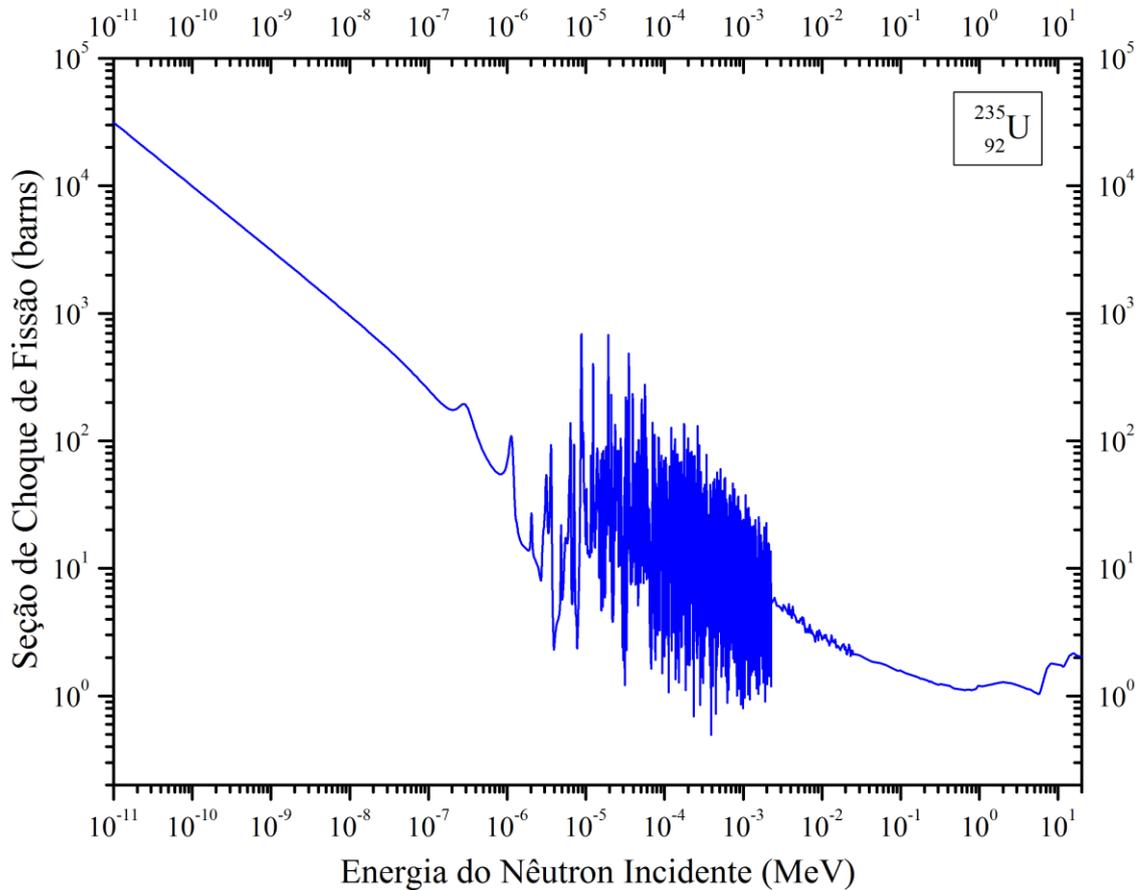


Figura 7. Variação da seção de choque de fissão com a energia do nêutron incidente no urânio-235.

ressonante ocorre se a energia cinética do nêutron incidente é tal que o núcleo composto formado resulta em um de seus estados excitados ou muito próximo deles, de modo que a probabilidade de que ocorra a interação entre o nêutron incidente e o núcleo-alvo aumenta e, como consequência, a seção de choque assume valores elevados, dando origem aos picos de ressonância.

2.3.2. Frequência de Interação, Densidade de Taxa de Reação e Fluxo de Nêutrons

Para calcularmos a taxa de reação em um ponto do reator devemos considerar um número de nêutrons com densidade N_n , [$\# \text{ nêutrons/cm}^3$] e supor, por conveniência, que todos esses nêutrons possuem a mesma velocidade v , [cm/s]. Podemos expressar a frequência no qual um nêutron vai experimentar uma dada reação nêutron-núcleo em termos da velocidade dos nêutrons e da seção de

choque macroscópica pelo produto $\nu\Sigma$, [1/s]. Assim, podemos definir a densidade de taxa de reação como:

$$T \equiv \nu\Sigma N_n, \left[\frac{\# \text{reações}}{\text{cm}^3 \text{s}} \right].$$

A quantidade escalar do produto νN_n que surgiu na equação acima aparece com muita frequência nos cálculos da teoria de reatores e é chamado de fluxo de nêutrons:

$$\phi \equiv \nu N_n, \left[\frac{\# \text{nêutrons}}{\text{cm}^2 \text{s}} \right].$$

Com isso a densidade de taxa de reação é dada pela seguinte equação:

$$T \equiv \Sigma\phi,$$

onde Σ representa a matéria e ϕ é a população de nêutrons viajando através da matéria (REUSS, 208). O fluxo de nêutrons pode depender de várias variáveis, entre elas a energia.

Do ponto de vista da física, as principais diferenças entre os tipos de reatores nucleares surgem das diferenças na distribuição da energia dos nêutrons, ou espectro, que causa diferenças nas taxas de reação nêutron-núcleo e na competição por nêutrons. Nesse sentido, os reatores são classificados como reatores rápidos e reatores térmicos. Em reatores rápidos a maioria das reações nêutron-nucleares envolvem fluxos de nêutrons na faixa de energia rápida ($E > 1$ keV), enquanto que em reatores térmicos a maioria das reações nêutron-nucleares envolvem fluxo de nêutrons na faixa de energia térmica ($E < 1$ eV).

2.3.3. Moderação de Nêutrons e Refletores

Moderação de nêutrons é o processo pelo qual a energia do nêutron é reduzida (desaceleração do nêutron). Esse processo é essencial em reatores térmicos, pois os nêutrons que são produzidos na reação de fissão possuem uma energia entorno de 2 MeV e pela Figura 7 observamos que a maior probabilidade de ocorrer a fissão no urânio-235 ocorre para baixas energias. A moderação de nêutrons é obtida, na maioria dos casos, por meio do fenômeno de espalhamento elástico em núcleos leves. Por exemplo, quando o nêutron interage com o hidrogênio por meio do espalhamento elástico, ele perde cerca de 50% de sua energia inicial. A perda média em energia do nêutron na moderação é importante, pois, quanto mais energia for perdida em uma colisão, menor será o número médio de colisões para o nêutron ser termalizado (passar de 2 MeV para 1 eV) e a probabilidade do nêutron ser perdido na região ressonante da captura gama será menor, pois o tempo nessa região será menor. O mesmo material empregado como moderador pode também ser utilizado como refletores. Refletores na geometria axial e radial podem fazer com que nêutrons espalhados ou em fuga para fora do núcleo retornem ao núcleo. Os requisitos nucleares para moderadores e refletores são os mesmos em um reator térmico: alta seção de choque de espalhamento, alta energia perdida pelo nêutron por colisão e baixa seção de choque de absorção. Os refletores são utilizados tanto em reatores térmicos como em rápidos. Os principais materiais empregados como moderador e refletor são: D₂O (água pesada), H₂O (água leve), H₂ (gás hidrogênio), C (grafite), Be (berílio) e BeO (óxido de berílio), (PERROTA, 2009).

2.3.4. Criticalidade

Criticalidade Nuclear (ou simplesmente criticalidade) - estado ou condição de um aglomerado contendo material físsil, no qual se possa desenvolver um *processo* autossustentado de fissão nuclear (CNEN, 1979). Conforme desenvolvido em Duderstadt, 1976, podemos expressar a criticalidade de forma matemática.

Uma vez que os nêutrons desempenham o papel central na manutenção da reação em cadeia de fissão, podemos relacionar a quantidade de nêutrons em certo instante com a quantidade de nêutrons no instante anterior. Um determinado nêutron “nascerá” em um evento de fissão e então geralmente se distribuirá pelo reator até que encontre sua eventual “morte” em uma reação de absorção ou fuga do reator. Certos números desses nêutrons serão absorvidos por núcleos físséis e induzirão mais fissão, levando assim ao nascimento de novos nêutrons de fissão, isto é, a uma nova “geração” de nêutrons de fissão. É possível definirmos a proporção desses números como o fator de multiplicação k caracterizando a reação em cadeia:

$$k \equiv \frac{\text{Número de nêutrons numa geração}}{\text{Número de nêutrons da geração precedente}} .$$

Podemos observar que se $k = 1$, o número de nêutrons em quaisquer duas gerações de fissão consecutivas será o mesmo e, portanto, a reação em cadeia será independente do tempo. Referimo-nos a um sistema caracterizado por $k = 1$ como sendo *crítico*.

Por um argumento semelhante, podemos concluir que se $k < 1$, o número de nêutrons diminui de geração em geração e, portanto, a reação em cadeia termina. Tal sistema é referido como sendo *subcrítico*. Finalmente, se $k > 1$, então a reação em cadeia cresce sem limites à medida que o número de nêutrons em cada geração sucessiva é maior. Esse sistema é considerado *supercrítico*.

Uma definição um pouco mais prática do fator de multiplicação k pode ser dada em termos de uma relação de equilíbrio de nêutrons, expressa por:

$$k \equiv \frac{\text{Taxa de produção de nêutrons}}{\text{Taxa de perdas de nêutrons}} = \frac{P(t)}{L(t)}$$

e que pode ser reescrita na seguinte forma:

$$L(t) = \frac{1}{k} P(t) .$$

A taxa de produção de nêutrons, $P(t)$, é essencialmente devido à fissão. A taxa de perdas de nêutrons, $L(t)$, leva em consideração os nêutrons que são absorvidos sem provocarem uma fissão (captura radioativa) e também a fuga de nêutrons do sistema.

A criticalidade de um reator é também analisada considerando o conceito de reatividade, objeto da próxima seção.

2.3.5. Reatividade

A noção de reatividade, que é constantemente utilizada em cinética de reatores nucleares, é a medida do afastamento de um reator nuclear em relação à sua criticalidade, em qualquer instante do tempo, é igual à diferença entre a unidade e o inverso do fator de multiplicação (BYRNE, 1994).

$$\rho = \frac{k - 1}{k} = 1 - \frac{1}{k}$$

Onde ρ é a reatividade e k é o coeficiente de multiplicação do sistema. Alternativamente, podemos também definir a reatividade como sendo a variação fracional da população de nêutrons entre duas gerações sucessivas. A partir da equação 1, pode-se observar que qualquer variável que afete o valor de k irá também, conseqüentemente, alterar o valor da reatividade ρ . Havendo alguma mudança na absorção ou na fuga de nêutrons (variando $L(t)$) ou mesmo variando a taxa de fissão (variando $P(t)$), haverá uma alteração na reatividade.

Além disso, é fácil perceber também que a reatividade vai à zero na criticalidade, isto é, quando $k = 1$. Ainda temos que seu sinal define o sentido da evolução do sistema: Há uma evolução crescente se a reatividade é positiva (e o sistema caminha para um estado *super-crítico*, $k > 1$) e há uma evolução decrescente se a reatividade é negativa (e o sistema caminha para um estado *sub-crítico*, $k < 1$).

Logo se pode afirmar que no núcleo do reator a reatividade é uma grandeza que mede transitoriamente o distanciamento da população neutrônica com relação às condições de equilíbrio e, em condições estacionárias, a falta de balanço neutrônico. Em se tratando de uma grandeza integral, este parâmetro é a todo instante e para uma dada configuração de núcleo, única e independentemente da posição (GUESDON 2009). A reatividade pode ser expressa em pcm, partes por cem mil, ou em porcentagem.

2.3.6. Potência

É diretamente proporcional à população de nêutrons, e que traduz, em termos macroscópicos, a distribuição espacial dos eventos de fissão no núcleo do reator nuclear. Este parâmetro depende das características do meio e da distribuição espacial do fluxo de nêutrons no interior do sistema multiplicativo e pode ser desta forma extremamente sensível às condições locais.

A energia lançada em uma reação de fissão é distribuída entre uma variedade de produtos da reação caracterizados por diferentes alcances e tempos de retardos. A potência (fonte de calor) volumétrica gerada pela fissão no núcleo do reator, $q'''(\vec{r})$, pode ser determinada multiplicando-se a densidade de taxa de reação de fissão de cada isótopo i por $w_f^{(i)}$, a energia recuperável lançada por cada evento de fissão, sendo dada por:

$$q'''(\vec{r}) = \sum_i w_f^{(i)} N_i(\vec{r}) \int_0^\infty \sigma_f^{(i)}(E) \phi(\vec{r}, E) dE.$$

Como o fluxo de nêutrons e a densidade do combustível variam espacialmente no núcleo do reator, haverá uma correspondente variação na fonte de calor de fissão. Para modelos mais simples de reatores, por exemplo, com núcleo homogêneo e descoberto (sem refletor) a potência total do reator pode ser encontrada calculando-se a integral do fluxo de nêutrons sobre o volume do núcleo. Enquanto

que para núcleos heterogêneos é possível utilizar um fluxo aproximado em cada elemento combustível do núcleo.

2.4. Operação do Reator Argonauta

O reator Argonauta é operado por painéis de controle localizados em uma sala adjacente ao salão do reator (Figura 8). Existe uma sequência de procedimentos que devem ser seguidos para operar o reator e que são listados a seguir:

1. Movimentação a fonte de Am-Be para dentro do reator. O tempo de introdução da fonte é de aproximadamente 1 minuto;
2. Retirada a barra de segurança 1;
3. Retirada a barra de segurança 2;
4. Retirada a barra de segurança 3. Cada barra de controle leva cerca de 4 minutos para ser retirada;
5. Fechamento da válvula de dreno;
6. Acionamento da bomba para iniciar o bombeamento de água para dentro do núcleo;
7. Registro, após o início do bombeamento, do fluxo de nêutrons, ligando o registrador. O tempo de bombeamento é de aproximadamente 10 minutos, dependendo das condições do filtro d'água localizado após a bomba;
8. Quando a água atinge o nível de operação a boia é acionada e no painel da mesa de controle é indicado nível de água alto.
9. Quando o bombeamento de água para o núcleo do reator é finalizado, o painel de controle informa que as barras de controle aproximado, grosseiro e preciso estão introduzidas no núcleo.
10. A partir deste instante o sistema permite que as barras de controle sejam operadas em qualquer ordem. Normalmente é seguida a ordem do painel: controle aproximado, controle grosseiro e controle preciso.
11. Quando a potência do reator se aproximar do nível de potência desejada, a barra de controle precisa deverá ser introduzida para a posição de criticalidade. Reajustes serão feitos para que esta condição se mantenha.

12. Com a criticidade alcançada a fonte de Am-Be poderá ser retirada, pois o reator está operando de forma autossustentável.



Figura 8. Sala de Controle do Reator Argonauta.

Pouco tempo após o início do bombeamento da água, as leituras dos instrumentos de medida decrescem devido ao efeito de blindagem sobre a fonte de Am-Be, causada pela elevação do nível d'água no núcleo do Reator. Ao atingir os elementos combustíveis, a multiplicação resultante da moderação dos nêutrons, equilibra o efeito de blindagem.

As barras de segurança nº 1, nº 2 e nº 3 têm como finalidade produzir desligamento rápido do reator, atuando nos momentos de emergência. Sua absorção de nêutrons é bem maior que as barras de controle, pois possuem maior área de absorvedor.

Devido a atual configuração do núcleo, apenas a barra de segurança nº 2, por estar instalada mais próxima dos combustíveis, possui reatividade significativa ($-2,46\% \rho$). As demais que se encontram afastadas do combustível possuem apenas ($-0,01\% \rho$).

As barras de controle permitem ajustar o valor do k do sistema, tornando $k > 1$ ($\rho > 0$) nas subidas de potência, $k = 1$ ($\rho = 0$) nas potências estacionárias e $k < 1$ ($\rho < 0$) nas reduções e desligamentos.

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

Além das barras de controle, é possível controlar a criticalidade (reatividade) do reator Argonauta variando o nível de água. Com esse procedimento pode-se alterar o volume do moderador e, conseqüentemente alterar o número de fissões, pois menos nêutrons serão termalizados. Também é possível variar o nível do refletor superior modificando a taxa de fuga de nêutrons: retirando-se ou adicionando-se refletor superior, aumenta-se ou diminuem-se as fugas e, portanto, o nível de nêutrons.

O nível de água tem, portanto, influência direta na reatividade dos reatores de pesquisa semelhante ao argonauta, o que justifica a importância da manutenção deste tipo de informação aos operadores deste tipo de reatores, os quais são os responsáveis em fazer os procedimentos necessários para atingir o nível de água ideal para operação (RAMMSY, 1986).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Nesta dissertação é empregada uma metodologia fundamentada em medidas experimentais da altura do nível da água contida no volume reservado ao refletor superior do núcleo do reator Argonauta, utilizando dispositivos eletrônicos. Com essa instrumentação eletrônica instalada no reator, medidas mais detalhadas do nível de água na região do refletor viabilizam análises sobre o comportamento de parâmetros da física de reatores tais como o fluxo de nêutrons e a reatividade. Os dispositivos para a montagem experimental são essencialmente três: sensor ultrassônico, display de cristal líquido e placa controladora arduino. Cada um desses componentes será descrito resumidamente nas próximas seções. Em seguida serão mostrados o procedimento para montar os dispositivos no reator Argonauta e depois os testes iniciais e os experimentos realizados.

3.1. Sensor Ultrassônico

Para medir a altura do nível de água foi empregado um sensor ultrassônico que usa a técnica do sonar para determinar a distância de um objeto assim como fazem naturalmente os morcegos e golfinhos. O dispositivo é constituído de um transmissor e um receptor ultrassônicos montados em uma placa eletrônica. Foi utilizado o modelo HC-SR04 fabricado pela Cytron Technologies (Figura 9). Quando o transmissor ultrassônico emite uma onda ultrassônica em uma direção, o tempo começa a ser cronometrado. A onda ultrassônica é transmitida no ar, e retorna imediatamente quando encontra obstáculos no caminho sendo refletida. O receptor ultrassônico recebe a onda refletida e nesse instante a cronometragem é interrompida. Com a contagem do tempo entre a emissão e detecção da onda é possível calcular a distância entre o sensor e o obstáculo. Na Tabela 1 são listadas algumas especificações do sensor HC-SR04. No Apêndice A é abordado o

conceito de onda sonora e de reflexão ultrassônica e no Apêndice B o funcionamento mais detalhado do sensor.

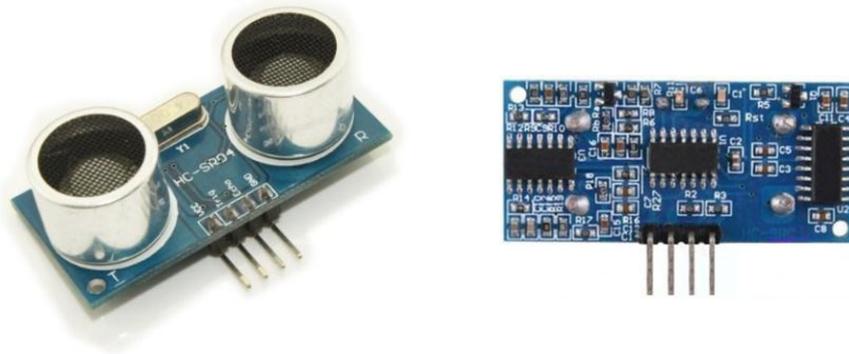


Figura 9: Módulo eletrônico ultrassônico HC-SR04 Fabricado pela Cytron Technologies. (CYTRON, 2013)

Tabela 1: Especificações do Sensor Ultrassônico HC-SR04

Tensão de operação	DC-5V
Corrente de operação	15 mA
Frequência de operação	40 KHz
Máxima distância de operação	4 m
Mínima distância de operação	2 cm
Ângulo de medição	15 Graus
Sinal de disparo de entrada (Input Trigger Signal)	10 uS TTL pulse
Sinal de eco de saída (Output Echo Signal)	Saída de sinal de nível TTL, proporcional com alcance
Dimensões	45mm x 20mm x 15mm

3.2. Display de Cristal Líquido

Para fazer as leituras das medidas do nível de água é utilizado um display de cristal líquido alfanumérico de 16 caracteres e 2 linhas. O modelo de display empregado é o LCD-016M002B fabricado pela Vishay Eletronics (Figura 10). O display também requer uma fonte de alimentação de 5V corrente contínua.



Figura 10: Display Cristal Líquido - LCD-016M002B fabricado pela Vishay Eletronics.
Foto: O autor (2018).

Uma descrição mais completa das características desse dispositivo, bem como o guia de utilização podem ser consultados no Apêndice C.

3.3. Placa Eletrônica Arduino Uno

Com a finalidade de gerenciar o sensor ultrassônico e o display de cristal líquido é empregada uma placa Arduino Uno (Figura 11). Arduino Uno é uma plataforma de hardware livre constituída de uma placa única, com suporte de entrada/saída embutido e utiliza-se de uma linguagem de programação simples que tem origem em Wiring, e é essencialmente em C/C++ (VAZZI, 2017). A placa tem seu hardware baseado no microcontrolador ATmega328. O modelo utilizado é o fabricado pela companhia italiana Smart Projects.



Figura 11: Placa Arduino UNO.
<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

No Apêndice D é apresentado um breve histórico e as características mais detalhadas da placa. No Apêndice E é listado o programa utilizado nos experimentos para medir o nível de água e apresentado uma montagem para testar o programa.

3.4. Montagem do Experimento

3.4.1. Construção do Suporte e Teste de Fixação

Foi construído um suporte em alumínio tipo barra medindo 30 cm de comprimento e 2 cm de largura e 0,5mm de espessura. Nela foi instalada o sensor ultrassônico HC-Sr04 acomodados em dois orifícios circulares com 1 cm de diâmetro. Após a fixação do sensor o mesmo foi envolvido por uma cobertura de chumbo. Para fixar o suporte no vaso reator foram instalados parafusos com porcas tipo “borboletas” as quais possibilitam fazer de forma rápida o posicionamento correto e prendê-lo de forma segura. Abaixo, na Figura 11, podemos verificar o suporte com sensor e a capa de chumbo.

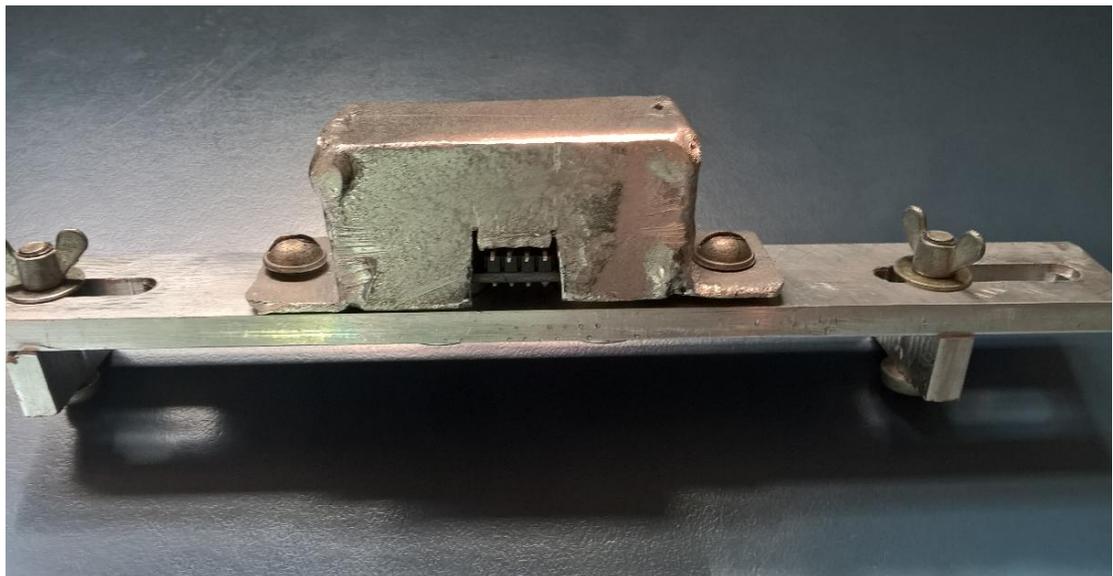


Figura 12: Suporte, sensor ultrassônico e capa de chumbo para o dispositivo eletrônico. O autor (2019).

Antes de instalar o dispositivo no Reator Argonauta foi realizado um teste no modelo de exibição do Argonauta com as mesmas dimensões do vaso do reator e a instalação teste fora concluída com sucesso. Neste modelo todas as medições foram realizadas consultando o modelo e os projetos do reator.



Figura 13: Sensor ultrassônico instalado no modelo teste, na Figura é possível ver o dispositivo ainda sem a capa de proteção em chumbo. O autor (2019).

3.4.2. Instalação dos Cabos de Comunicação e Alimentação

Os projetos atuais estão reduzindo sensivelmente a utilização de cabos para transmissão dos dados e sendo implementado o uso do wi-fi (AGRAWALA, 2005). No entanto emissores de informação wi-fi necessitam de fonte de alimentação e circuito eletrônico. A radiação gama e os nêutrons produzidos no vaso do reator são agressivos com circuitos eletrônicos (BALEN 2009). No intuito de retirar a fonte de alimentação e o referido circuito transmissor de dentro do reator, diminuindo a quantidade de dispositivos eletrônicos, optou-se em fazer a comunicação e a alimentação via cabo, entre o sensor ultrassônico instalado no vaso do reator e o dispositivo eletrônico Arduíno localizado na sala de controle. Foi utilizado um cabo

de 4 pares de vias, utilizado em rede de dados para computadores, e que serve tanto para a comunicação como para a alimentação do sensor.

3.4.3. Instalação do Sensor no Vaso do Reator Argonauta

Terminada a passagem de cabos e tendo a certeza que o suporte seria instalado sem maiores problemas no núcleo, demos início na instalação do sensor no vaso do reator está inserido numa estrutura de concreto, medindo 2,77m x 7m x 7m, existem três coberturas removíveis feitas em chumbo e a retirada destas permite o acesso à parte superior do vaso do reator. Para reduzir a quantidade de dose durante a instalação do sensor, o reator ficou fora de operação por duas semanas, permitindo o decaimento do nível de emissões.

Com o uso da ponte rolante foram retirados os três escudos permitindo a exposição do vaso do reator e do núcleo (Figura 14). O dispositivo com o sensor ultrassônico já estava preparado restando somente a conexão do cabo elétrico no sensor ultrassônico. Os cabos passam pela eletrocalha e a conexão final somente poderia ser feita sem os escudos, pois os mesmos entram de forma estreita entre as paredes do reator, o que provocaria esmagamento dos condutores durante a retirada dos escudos.

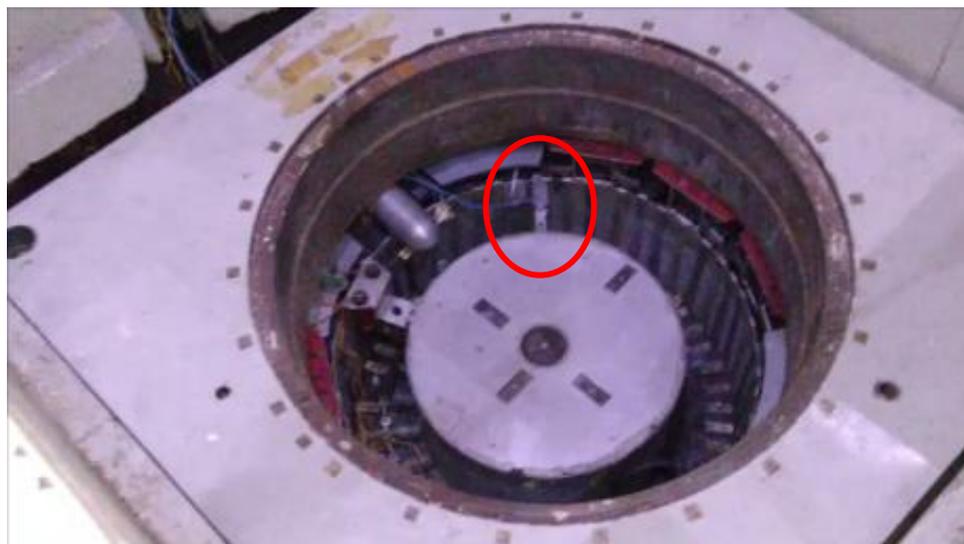


Figura 14: Em destaque o dispositivo com a capa de chumbo instalado na borda do tanque do Argonauta. Pode-se observar também o cabo de Comunicação, saindo do sensor e entrando na eletrocalha. Foto Zelmo Rodrigues (2019).

Foi escolhida uma posição afastada dos elementos combustíveis e que não resvalasse nos mecanismos das barras de segurança e de controle. Terminada a conexão elétrica fixou-se cuidadosamente o dispositivo nas bordas do vaso fazendo o aperto dos batentes com as porcas borboletas. Após esta etapa as condições para realização dos testes e experimentos estavam ideais.

3.5. Início dos Testes no Reator

Após a conclusão da instalação dos dispositivos, foi ligada a bomba d'água para iniciar a entrada de água no vaso do reator. De imediato, não houve indicação nas leituras feitas pelo sensor ultrassônico, pois o objetivo é o registro do nível de água acima dos elementos combustíveis, ou seja, no refletor superior.

Depois de sete minutos do acionamento da bomba o display indicou uma variação de nível de água e pudemos acompanhar a subida do nível de água. O display permite a leitura da altura de coluna de água em centímetros com duas casas decimais, em porcentagem e em três níveis: Baixo, Médio e Alto. As indicações são atualizadas em cada segundo. A programação feita na placa arduíno que gerencia essas leituras pode ser consultado no Apêndice E.

Quando o display indicou que a altura na coluna d'água atingiu 100%, "Nível Alto" e 24,26 cm, que é a altura do refletor superior, a bomba desligou automaticamente. Foi a primeira confirmação que o dispositivo registra corretamente a altura. Para fazer outro teste o operador decidiu religar a bomba e mantê-la ligada de forma manual até o nível de água atingir o "ladrão", cessando a subida do nível de água. Assim foi feito e o display variou a indicação até 116% e altura 28,59 cm, que corresponde à altura do "ladrão". A partir deste ponto os valores mantiveram-se constante. Com essas duas medidas, podemos afirmar que o dispositivo está instalado e funcionando corretamente. Depois de confirmado o sucesso da instalação do sensor, procedeu-se a recolocação dos escudos.

O reator foi colocado em operação na potência de 340W e o sensor manteve a indicação do nível até o fim da operação a qual durou cerca quarenta minutos. Para desligar o reator as barras de controle foram inseridas totalmente e a água liberada por uma válvula eletromecânica e mais uma vez acompanhamos a variação do

nível de água, porém no esvaziamento do vaso e foi observado a cada centímetro na coluna d'água até indicar 0,0 cm de coluna d'água, 0% e "Nível Baixo".

Esses testes foram muito importantes, pois se confirmou o perfeito funcionamento do dispositivo eletrônico, porém, não tínhamos a certeza sobre a durabilidade do dispositivo, pois muitos afirmavam que o sensor iria resistir somente alguns minutos dentro do Argonauta (D.BRAUNIG e F.WULF, 1999). Para nossa surpresa ele resistiu ao teste e resiste até a presente data, outubro de 2020, um ano após a realização dos testes.

Os demais experimentos foram realizados em outra data.

3.6. Contagem de Nêutrons com Reator Sub-crítico

Como o dispositivo já estava preparado e funcionando, nenhuma intervenção foi feita, pois o mesmo se encontrava em atividade. Os procedimentos a seguir para a realização do experimento obedeceram fidedignamente o Relatório de Análise de Segurança do Reator Argonauta Volume 1. A operação do reator foi apresentada de forma resumida na seção 2.4.

Iniciando o procedimento o operador do reator insere todas as barras de controle, ação que demora cerca de quinze minutos. A bomba d'água somente é acionada quando as barras de controle estiverem 100% inseridas. As barras de controle grosseiro e preciso são necessárias para manter controlada a quantidade de nêutrons dentro do reator. Essas barras têm a capacidade de absorverem os nêutrons, pois em suas estruturas possuem o cádmio.

Após a inserção das barras a bomba foi acionada, no entanto o dispositivo somente mudará o estado 0,0 cm e 0% quando o nível de água cobrir os elementos combustíveis ação que demora cerca de vinte minutos. Ao sair do valor zero o operador acompanhou a subida do nível de água e desligou a bomba quando atingiu 8% no nível, com 2 cm de altura. O operador retirou a barra de controle grosseiro e foi realizada a contagem de nêutrons no interior do reator. Foram feitas três contagens neste nível de água.

O procedimento anterior foi repetido para outros quatro níveis de água: 6,24 cm (25%), 12,13 cm (50%), 18,09 cm (75%) e 24,26 cm (100%).

Terminado o experimento das contagens do fluxo de nêutrons, todas as barras foram baixadas por gravidade e a água do vaso fora drenada totalmente, de acordo com o Manual de Segurança do reator a válvula de dreno não permite controle preciso de vazão. Para iniciar o experimento da reatividade relacionada ao nível de água os procedimentos devem ser reiniciados para viabilizar a subida controlada do nível de água.

3.7. Medida da Reatividade com o Reator Crítico

Nesta experiência é demonstrado como o nível de água do refletor superior influencia na reatividade do reator Argonauta. Conforme o nível de água varia, a criticalidade do reator é alterada. Por conseguinte, as barras de controle são ajustadas para tornar o reator crítico, determinando assim a reatividade.

Com todas as barras já inseridas ao fim da experiência anterior, o operador acionou a bomba enchendo novamente o vaso do reator, após 20 minutos o display indicou 8%, 2,0 cm e “Nível Baixo” e a bomba é desligada. Com o objetivo em atingir a criticalidade do reator, retirou-se a barra de controle grosseiro e iniciou a subida das barras de controle preciso, no entanto as barras foram retiradas 100% e o Reator não atingiu a criticalidade com o nível de água em 2 cm.

Para refazer a operação com um nível acima do anterior é necessário esgotar a água do tanque, baixar todas as barras como foi citado em parágrafos anteriores, pois a bomba somente funciona com as barras totalmente inseridas.

Com todas as barras já inseridas, o operador religou a bomba enchendo novamente o vaso do reator, quando o display indicou 25%, 6,24cm e “Nível Baixo”. Com o objetivo em atingir a criticalidade do reator, retirou-se a barra de controle grosseiro e iniciou a subida das barras de controle preciso, o reator tornou-se crítico com 76,3% de barra de controle preciso fora do núcleo. O reator entrou

em operação e manteve a potência de 0,17W e uma corrente de nêutrons de $0,4 \times 10^{-8}$.

O procedimento anterior foi repetido para outros três níveis de água: 12,13 cm (50%), 18,09 cm (75%) e 24,26 cm (100%) e com as respectivas porcentagens da barra de controle preciso fora do núcleo: 48,6%, 45,2% e 43,5%.

A determinação da reatividade é feita considerando dados de referência obtidos em experiência realizada anteriormente para encontrar a variação da reatividade em função da posição da barra de controle preciso, conforme será mostrado na seção 4.2.

O reator operou com uma baixa potência de 0,17 W para evitar uma alta dissipação térmica no vaso do reator. Para potências maiores a temperatura do reator aumenta, o que pode reduzir a reatividade por efeito Doppler (Lamarsh,1966), sendo, portanto, uma situação indesejável para o experimento.

Os experimentos relatados neste capítulo duraram aproximadamente quatro horas e trinta minutos.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como resultados dos experimentos descritos nas seções 3.6 e 3.7 foram obtidas as contagens de nêutrons com o reator sub-crítico e a reatividade necessária para tornar o reator crítico. Neste capítulo são apresentados esses resultados que complementam os anteriores e também é feita uma análise dos dados.

4.1. Contagens de Nêutrons em Função da Altura do Refletor

O primeiro experimento realizado foi a contagem dos nêutrons no interior do reator. A contagem foi feita através dos detectores BF_3 , localizados na abertura do canal J09 e no vaso do reator.

O experimento foi realizado com a inserção total das barras de controle preciso, tornando impossível o reator entrar em criticalidade, conforme descrição do capítulo anterior. No entanto, com apenas a presença da fonte de nêutrons de Am-Be foi possível executar o experimento. A relação entre o nível de água do refletor superior com as três contagens de nêutrons e o fator de multiplicação k está apresentada na Tabela 2 e nos gráficos das figuras 15 e 16.

Pode-se notar pela Figura 15, que a quantidade de nêutrons no interior do reator varia sensivelmente com as mudanças no nível de água, quanto maior a altura do refletor aumenta também o número de nêutrons dentro do reator. Esse resultado já era o esperado, pois quanto maior o refletor mais ele fica eficiente para diminuir a fuga de nêutrons.

Tendo conhecimento da quantidade de nêutrons com o nível a 100% a perda dos mesmos foi encontrada subtraindo cada ponto pela quantidade ao nível máximo de água. O resultado dessa diferença produziu os dados da Figura 16.

Apesar de não está se levando em conta que existem nêutrons fugindo por todas as superfícies periféricas do núcleo, o gráfico da Figura 16, semelhante ao gráfico anterior, permite estimar a variação da fuga de nêutrons pelo refletor superior em função da variação da altura do nível de água.

Tabela 2: Relação entre a contagem de nêutrons e a altura do refletor superior

Nível de água		(C _n) = Contagem de nêutrons variando de acordo com nível Tempo em cada contagem -10 segundos			
		Sequência	Quant	Média	k
0%	0cm	1ªContagem	672	607,0	C_0/C_0 1
		2ªContagem	632		
		3ªContagem	651		
8%	2 cm	1ªContagem	699	670,6	C_0/C_8 0,971
		2ªContagem	646		
		3ªContagem	667		
25%	6,24 cm	1ªContagem	752	767,0	C_0/C_{25} 0,849
		2ªContagem	779		
		3ªContagem	770		
50%	12,13 cm	1ªContagem	790	799,8	C_0/C_{50} 0,814
		2ªContagem	792		
		3ªContagem	834		
75%	18,09 cm	1ªContagem	808	812,0	C_0/C_{75} 0,802
		2ªContagem	830		
		3ªContagem	799		
100%	24,26 cm	1ªContagem	824	820,0	C_0/C_{100} 0,742
		2ªContagem	893		
		3ªContagem	916		

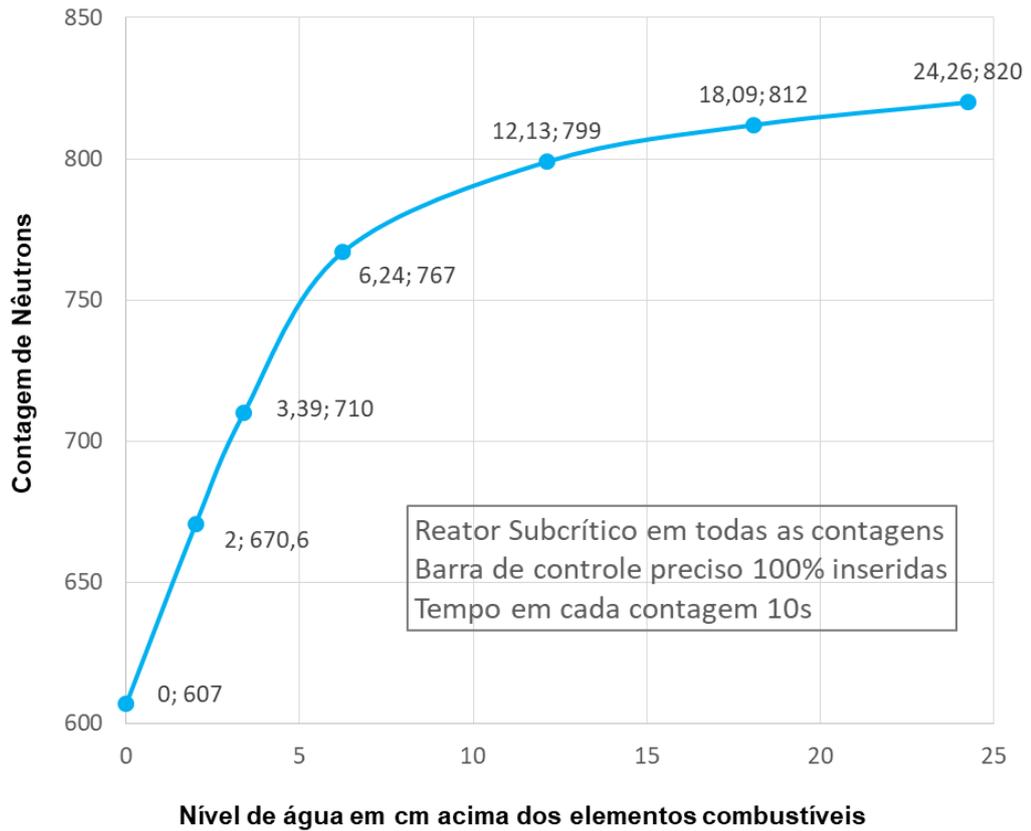


Figura 16: Relação entre a altura do nível de água e a contagem de nêutrons. O autor (2019).

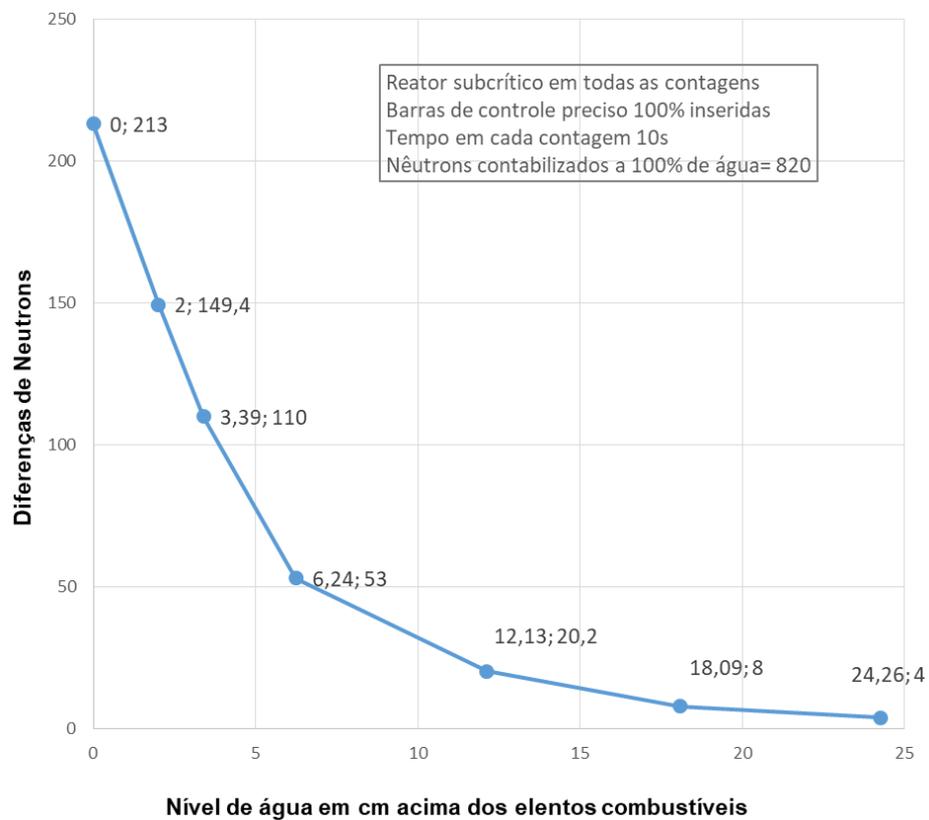


Figura 17: Relação entre a altura do nível de água e os neutros perdidos. O autor (2019).

4.2. Reatividade em Função da Altura do Refletor

Conforme foi visto na seção 3.7, para cada nível de água escolhido tem-se um ajuste nas posições da barra de controle preciso. A partir das posições dessa barra é possível encontrar a correspondente reatividade. Para isso se faz uso da curva de barra de controle preciso (Figura 18) fornecida pelo Relatório de Análise de Segurança do Reator Argonauta Volume 1. Os dados dessa curva foram gerados em uma experiência realizada anteriormente para determinar de forma minuciosa a variação da reatividade com relação à posição da barra de controle preciso. Os dados fornecidos pela curva servem de referência para diversas experiências que são implementadas no reator Argonauta.

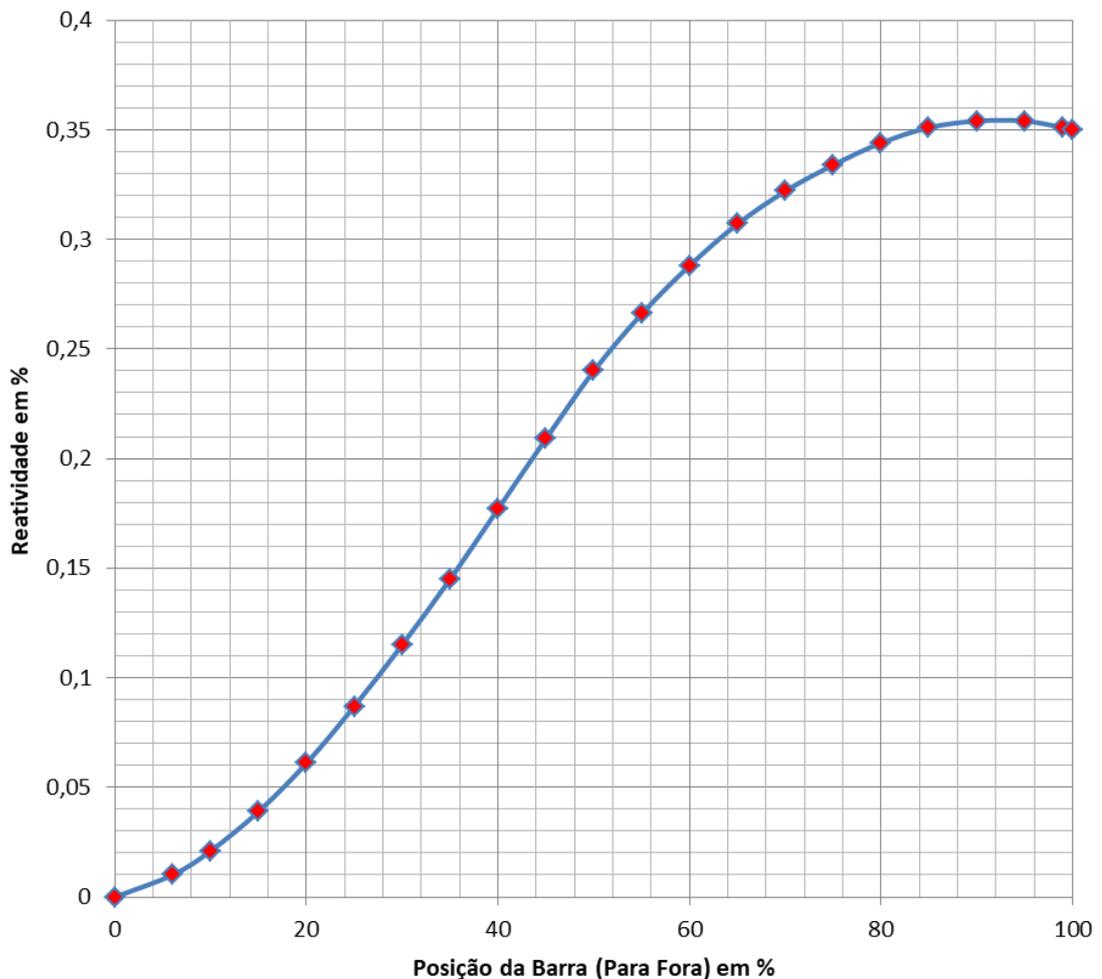


Figura 18: Curva da barra de controle preciso do reator Argonauta. Dados para criação da curva foram retirados do Relatório de Análise de Segurança do Reator Argonauta Volume 1. Gráfico feito no programa Excel. O autor (2019).

O relatório de análise permite encontrar a reatividade do Reator Argonauta de forma imediata, durante a operação, ao observar a posição da barra de controle preciso fora, consultando a curva de barra de controle preciso.

Tabela 3: Dados coletados durante o experimento Nível de água x Reatividade no Reator Argonauta.

Nível de água.	Altura do nível de água	Barra de controle preciso fora	Reatividade %	Temperatura
8%	2,0cm	100% (não ficou crítico)	-0,050	26,7°C
25%	6,24cm	76,3%	0,070	26,8°C
50%	12,13cm	48,6%	0,167	26,9°C
75%	18,09cm	45,2%	0,185	26,6°C
100%	24,26cm	43,5%	0,200	26,7°C

Como descrito no capítulo anterior as medições tiveram início em 8% com dois 2cm de água e finalizou em 100% com 24,26 cm de coluna d'água acima dos elementos combustíveis. O reator atingiu a criticidade a partir de 25% em 6,24 cm, e manteve uma potência de 0,17w para evitar o aquecimento.

Na Tabela 3 estão listados os dados obtidos no experimento. Os valores da reatividade na penúltima coluna foram encontrados através da diferença de dos valores encontrados no experimento e o valor máximo de reatividade da curva. Também podemos verificar que a variação da temperatura foi muito pequeno, de modo que a reatividade não foi alterada por efeito Doppler.

Com os dados da Tabela 3 foram construídos os gráficos da variação da posição da barra de controle em função do nível de água do refletor (Figura 19) e o gráfico da variação da reatividade em função desse nível de água (Figura 20).

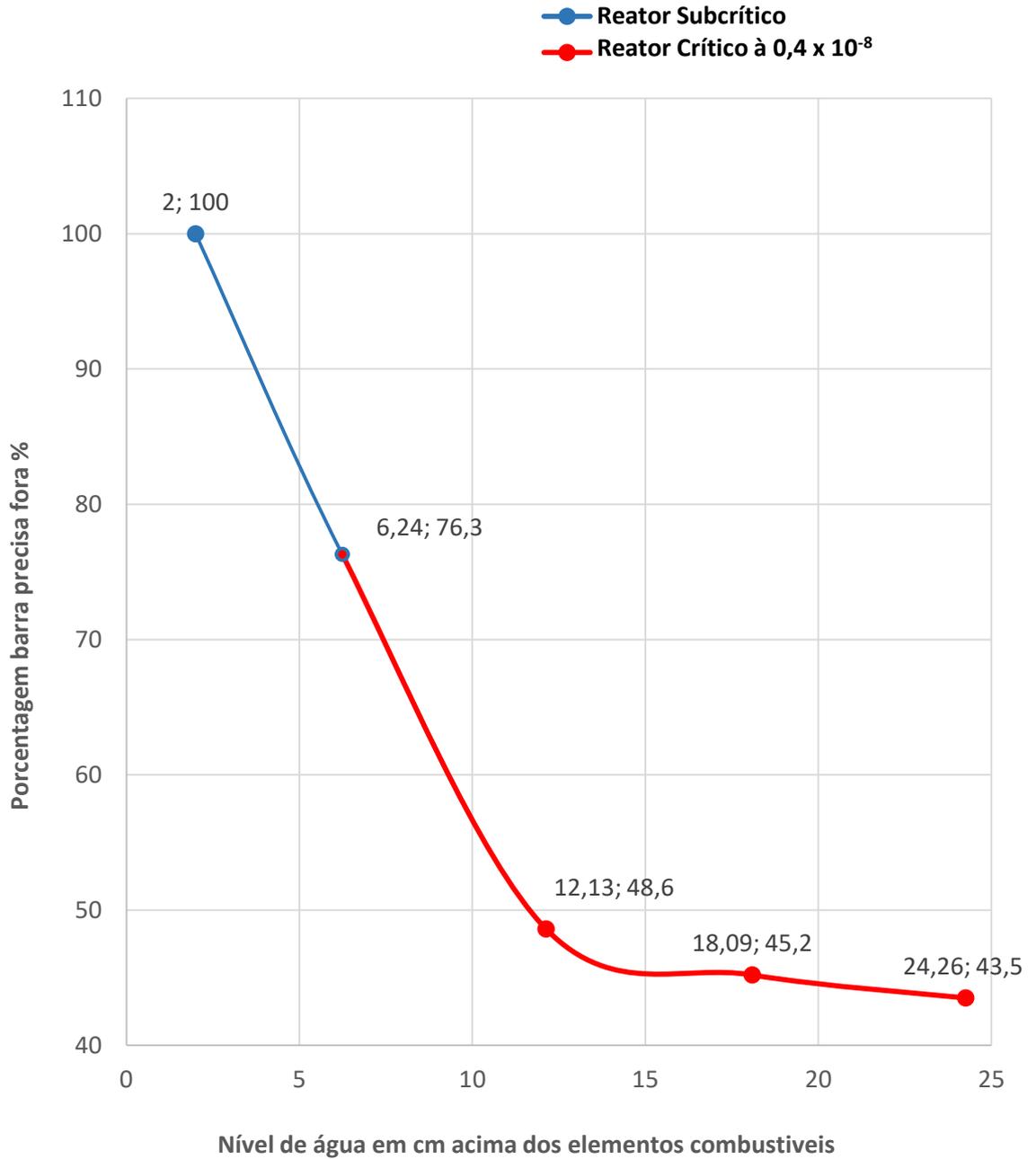


Figura 19: Porcentagem barra de controle preciso fora x nível de água em centímetros acima dos elementos combustíveis. O autor (2019).

O gráfico da Figura 19 permite acompanhar os percentuais de barra de controle preciso fora do núcleo, necessários até o reator atingir a criticalidade. Pode-se observar claramente que o aumento do nível de água diminui a necessidade de deslocar a barra de controle para fora.

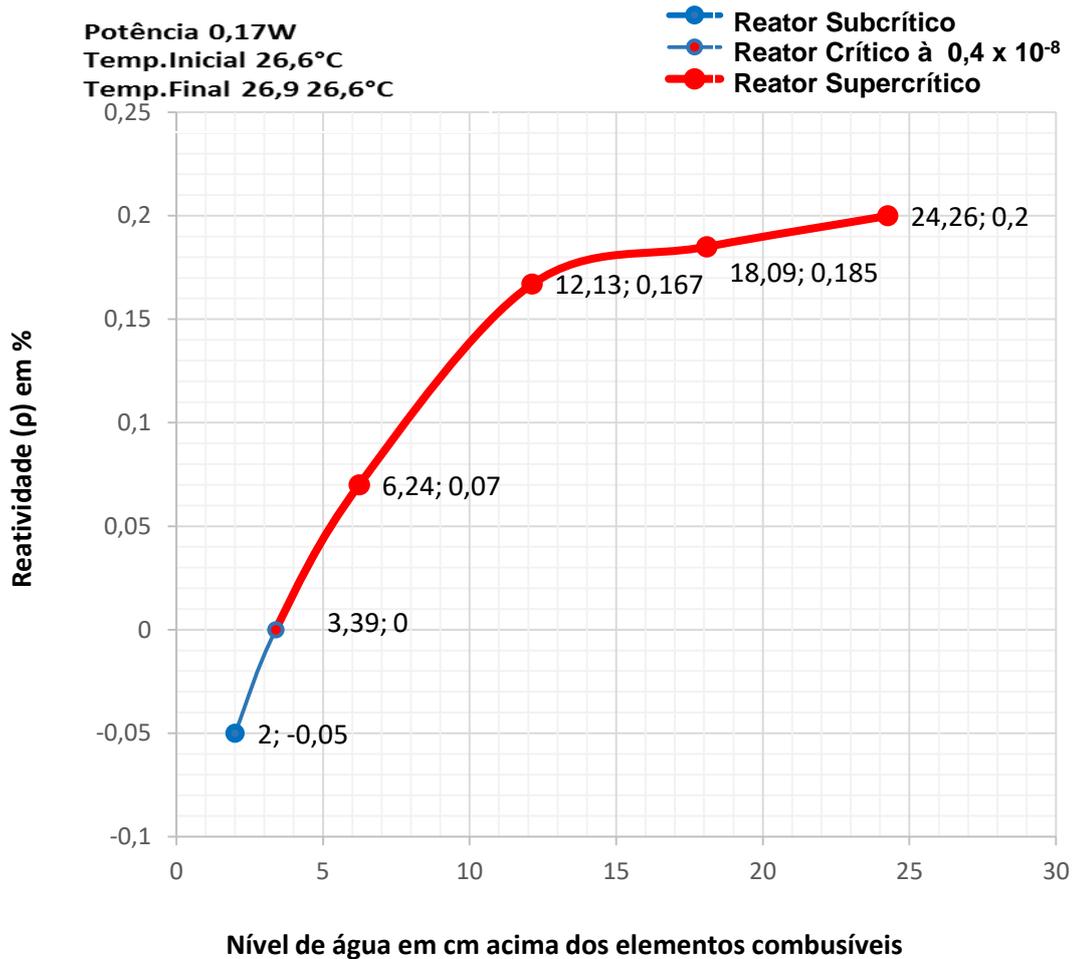


Figura 20: Reatividade em porcentagem x nível de água em centímetro acima dos elementos combustíveis. O autor (2019).

No gráfico da Figura 20 pode-se observar que a elevação da reatividade acompanha a subida do nível de água. Cabe lembrar que a cada nível as barras de controle preciso eram suspensas até o reator atingir a criticalidade. Também podemos observar que para um nível inferior a 20% o reator não se tornou crítico.

Ao compararmos o gráfico da Figura 20 com da Figura 17 podemos observar que devido ao baixo nível de água acima dos elementos combustíveis o reator estava subcrítico e na mesma região no gráfico da Figura 17 apresenta-se uma grande fuga de nêutrons. Isso é devido à pequena quantidade do material refletivo que no caso é a água o que facilita a fuga de nêutrons.

Nos dois gráficos das figuras 19 e 20 podemos também observar um comportamento que tende a estabilização a partir de 50% da altura do refletor, com pouca variação na posição da barra e na reatividade em função da altura.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

A nova instrumentação que foi instalada no reator Argonauta, é composta por três dispositivos: o sensor ultrassônico, fixado no vaso do reator, o display de cristal líquido e a placa micro-controladora Arduíno, ambos acomodados na sala de controle do Argonauta. Com esses dispositivos, depois de configurados e programados, permitiram realizar a medida em milímetros da altura do refletor superior do núcleo do reator. Com essas novas medidas foi possível estudar o comportamento neutrônico do núcleo do reator em função da variação da altura do refletor superior, o que nunca antes foi realizado em experimentos no Argonauta, pois as medidas do nível de água eram antes realizadas exclusivamente por chave boia, que indica apenas se o vaso do reator está sem água ou totalmente cheio.

Com a nova instrumentação foi observado que as variações do fluxo de nêutrons e da reatividade do núcleo do reator, importantes parâmetros da física de reatores, em função da altura do refletor superior apresentaram comportamentos consistentes com o que é previsto pela teoria.

O novo recurso para medição do nível de água acima dos elementos combustíveis, região do refletor, está oferecendo uma relevante contribuição para a operação do reator Argonauta, pois, o operador acompanha a elevação ou descida do nível de água a cada milímetro, de modo que a operação está sendo feita de forma mais segura, pois, a água é um dos principais componentes em um reator tipo piscina, influenciando diretamente na reatividade e, conseqüentemente na operação do reator.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

A principal sugestão para trabalhos futuros é adaptar o núcleo do reator Argonauta para que o sensor ultrassônico faça a medida do nível de água desde o fundo até a altura máxima do vaso do núcleo. Com isso será possível analisar o comportamento neutrônico do reator variando a altura do nível de água na região que tem moderação de nêutrons. Também será possível estudar o efeito da altura do nível de água do refletor inferior na blindagem da fonte de Am-Be colocada sob o núcleo.

Além de novas possibilidades de pesquisa, a reprodução dos experimentos realizados neste trabalho pode integralizar a lista de aulas experimentais oferecida tradicionalmente pelo SEREA em treinamentos e cursos acadêmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALONSO, Agustín. **Infrastructure and Methodologies for the Justification of Nuclear Power Programmes**, Páginas 189-219, Woodhead Publishing, 2012.

ARDUÍNO. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 3 de jul. 2018.

BALEN, T. R. et al. A Self-Checking scheme to Mitigate Single Event Upset Effects in SRAM-based FPAA's. **IEEE Transactions on Nuclear Science**. V. 56, n 4, p. 1950-1957, dez. 2009.

B. H. BRANSDEN E C. J. JOACHAIN, **Physics of Atoms and Molecules**, Longman, Londres, 1983.

BYRNE J, Neutrons, **Nuclei and matter: An Exploration of the physics of slow neutrons**. IOP Publishing Ltd, 1994.

BRUNA, G.B., GUESDON, B. **Traité Génie Nucleaire**. Capítulo Méthodes de Calcul Neutronique de Couer: B3070. Ed. Théchniques de l'Ingénieur 2009.

CAVACANTE, M. A; TOVOLARO, C.R.C; MOLISANE, E. Física com Arduíno para iniciantes. **Revista brasileira de ensino de física**, V33, n4, 4503 2011.

C. J. JOACHAIN, **Quantum Collision Theory**, North Holland, Amsterdam, 3rd ed, 1983.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Energia Nuclear e Suas Aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Critérios gerais de projeto para usinas de reprocessamento de combustíveis nucleares**, pag.05, 1979.

CYTRON TECHNOLOGIES, **Product User's Manual-HC-SR04 Ultrasonic Sensor**. MAIO 2013.

D.BRAUNIG e F.WULF, **Radiation effects in electronic components**, 1999

Duderstadt. J. J., e Hamilton. L. J., Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons, Inc. 1976.

ELECFREAKS, www.electfreaks.com/store/hc-sr04-ultrasonic-sensor-distance-measuring-module-ultra01.html, acesso em setembro 2018.

FISH, P.J. **Physics and instrumentation of diagnostic medical ultrasound**. Chichester; New York; New York, NY, USA: wiley ilDistributed in the U.S.A, Canada and Japan by A.R.Liss, 1990.

GETTYS, W.E; KELLER, F, J.; MALCON. J. S. **Física 2**. 1. Ed. São Paulo. Pearson education do Brasil, 1999.

HALLIDAY ROBERT RESNICK, J.W.D. **Fundamentals of physics, Volume 2**.10. ed.2009.ISBN 1118230736.

IAEA, Project on Enhanced Utilization and Applications of Research Reactors. Disponível em: http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/research_reactors/. Acesso em: 3 de nov. 2020a.

IAEA, Research Reactors Database, RRDB. Disponível em: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>. Acesso em: 3 de nov. 2020b.

IEN – INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR – **Reator Argonauta**. Disponível em: < <http://www.ien.gov.br> >. Acesso em: 14 de novembro de 2018.

IEN – INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR – **Relatório Técnico. Manual de Operação do Reator Argonauta**. Rio de Janeiro: IEN/CNEN, 1990.

IEN – INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR – **Relatório Técnico. Manutenção do Reator Argonauta**. Rio de Janeiro: IEN/CNEN, 1991.

JOHN R. LAMARSH, **Introduction to Nuclear Engineering** – 2001 pag 135, 297,298.

JOACHAIN, C.J. **Quantum Collision Theory**. 3rd Edition, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam, 1983

VAZZI, MARCIO R. G. **O Arduíno e a Aprendizagem de Física: Um kit robótico para abordar conceitos e princípios do Movimento Uniforme**. Dissertação de conclusão de Curso de Mestrado, Unesp, 2017.

MCROBERTS, M. **Arduíno básico**. 1ed. São Paulo. Novatec, p22, 2011

MCROBERTS, M. **Beginning Arduíno**. New York, USA: Apress, 2010.

MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **O Reator Argonauta**. Rio de Janeiro: IEN/CNEN, 1965.

PERROTTA, JOSÉ A; **Curso de introdução à engenharia do núcleo de reatores**, pag 3. 1999.

RAMMSY, JORGE E.MONROE; **Reator Argonauta**, Dissertação mestrado Scricto Sensu, pag 5, 104, 1986

REUSS, Paul. **Neutron Physics**. França: INSTN, EDP Science, 2008.

STACEY, WESTON M.; **Nuclear Reactor Physics**, 2007

TERREMOTO, Luís A. A. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear de Reatores**, IPEN, 2004.

VISHAY ELETRONICS. **Reflective Optical Sensor with Transistor Output: TCRT5000, TCRT5000L**. Acesso disponível em 20 abr 2018.

VISHAY ELETRONICS. **Datasheet LCD-016N002A**. Acesso disponível 21 abr 2018 <http://www.vishay.com/docs/37294/37294.pdf>.

WEELS, P.N.T. **Biomedical ultrasonics**, London; New York: Academic Press, 1977.

WNA, World Nuclear Association, Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors.aspx>. Acesso em: 3 de nov. 2020.

YOUSSEF, M: AGRAWALA, A. **The Horus WLAN location determination system.**

In: CONFERENCE ON MOBILE SYSTEMS. APPLICATIONS AND SERVICES-MOBYSYS, 3rd, 2005, Seattle. Proceedings... New York: ACM press, 2005. P.205-218.

APÊNDICE A

ONDAS SONORAS

A.1. Características das ondas sonoras

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, precisam de um meio material para se propagar (Sólido, líquido ou gasoso). Elas se propagam como ondas de pressão transferindo energia ponto a ponto, sem transportar massa. A pressão causada em um ponto do meio devido a vibrações provoca compressões e rarefações como ilustrado na Figura A1.



Figura A1 - Ilustração da propagação do som no ar
(http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ond)

As ondas sonoras podem ser classificadas quanto a sua frequência de propagação. Aquelas que possuem frequência entre 20 Hz e 20 kHz são denominadas sônicas (faixa audível pelo ouvido humano). Já as que estão abaixo de 20 Hz são infrassônicas, e as que estão acima de 20 kHz são ultrassônicas.

Atualmente ondas sonoras são usadas para determina fissuras em estruturas de concreto, na localização de objetos através do sonar (localiza embarcações e destroços afundados), na medicina para visualizar órgãos através de exames de ultrassom dentre outras aplicações. Aqui vamos usá-la para medir o nível de água em reator nuclear de pesquisa.

A.2. Velocidade de propagação do som

A velocidade de propagação do som depende das propriedades do meio. Atributos inerciais e elásticos definem quão veloz pode ser uma onda sonora em certo ambiente. No caso do ar, a contribuição inercial é a massa específica ρ ($1,21\text{kg/m}^3$) e a elástica é o módulo de elasticidade volumétrica B (Define a variação de volume de um elemento quando submetido a uma pressão). (GETTYS, 1999).

Quando um ambiente é perturbado (nesse caso o ar) um pulso de pressão se desloca provocando áreas de compressão e rarefação. A Figura A2 ilustra um pulso de pressão se deslocando em direção a um elemento de ar com comprimento L_1 , área da seção transversal (A) e pressão inicial (p_1). Quando o pulso de pressão atingir o elemento de ar, causa a compressão do mesmo (ver Figura A3) alterando o comprimento para L e a pressão para Δp .

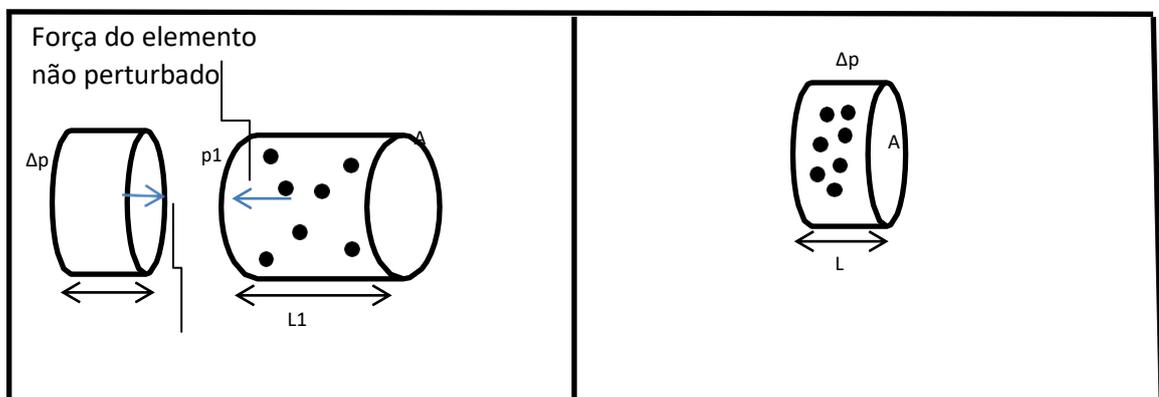


Figura A2 – Ilustração de um pulso de pressão se deslocando em direção a um elemento de ar não perturbado. Fonte: Dissertação Alessandro Dionísio, 2014

Figura A3 – Ilustração de elemento de ar comprimido. Fonte: Dissertação Alessandro Dionísio, 2014

O pulso de compressão exerce uma força de compressão para a direita enquanto que a parte do elemento não perturbado exerce força para a esquerda. Da relação de força e pressão ($F = pA$) temos:3

Força de compressão = $(p_1 + \Delta p) A$ e Força do elemento não perturbado = $p_1 A$.

Sendo assim a força externa resultante no elemento é $A\Delta p$.

Considerando o elemento de ar como um sistema de partículas, podemos usar a lei de Newton na forma ($\Sigma F = Ma_{cm}$) onde M é a massa total do sistema e a_{cm} é a aceleração do centro de massa. De (HALLIDAY, 2002) temos:

$$a_{cm} = -\Delta L/t^2 \text{ e } M = \rho AL_1,$$

onde $\Delta L = L_2 - L_1$ e t é o tempo que o pulso leva para se propagar no elemento de ar.

Da segunda lei de Newton temos:

$$A\Delta p = (\rho AL_1) \left(\frac{-\Delta L}{t^2} \right)$$

O tempo t é dado por:

$$t = \frac{L_1}{v}$$

onde, v é a velocidade do pulso.

Substituindo (2) em (1) temos:

$$A\Delta p = (\rho A) \left(\frac{-\Delta L v^2}{L_1} \right)$$

Resolvendo (3) para v temos:

$$v^2 = \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{-\Delta p}{\frac{A\Delta L}{AL_1}} \right)$$

Extraindo-se a raiz em ambos os lados temos:

$$v = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{-\Delta p}{\frac{A\Delta L}{AL_1}} \right)}$$

Fazendo $V = AL_1$ e $\Delta V = \Delta L A$ temos:

$$v = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(-\frac{\Delta p}{\left[\frac{\Delta V}{V}\right]}\right)}$$

Como $\mathbf{B} = -\Delta p / (\Delta V/V)$ temos que a velocidade de propagação da onda sonora no ar é dada por

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Onde \mathbf{B} é o módulo de compressibilidade.

O módulo de compressibilidade determina o quanto um elemento de ar varia seu volume quando submetido a uma pressão, temos assim, que B é a propriedade elástica do meio enquanto que é a propriedade inercial. Se considerarmos o ar como um gás ideal, de (GETTYS, 1999) temos,

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Onde γ é o índice adiabático, R é a constante universal dos gases (8,314J/molK), T é temperatura absoluta e M é massa molar. Para o ar temos $\gamma \approx 1,4$ e $M = 0,0289$ kg/mol. Substituindo as constantes:

$$v = 20,06\sqrt{T}$$

Com isso vemos que a velocidade do som depende da temperatura do ar em que a onda se propaga.

A.3. Reflexão Ultrassônica

Quando a onda ultrassônica atinge a interface entre dois meios de impedâncias diferentes com ângulo θ com a normal ($0 \leq \theta < 90$), uma parte da energia será transmitida com ou sem mudança na direção do feixe e a outra parte será refletida. A onda refletida pode mudar sua fase, mas mantém a velocidade de propagação, frequência e comprimento de onda. A intensidade da onda transmitida

e refletida quando o ângulo de incidência é perpendicular à direção de propagação da onda é dada em função da impedância dos meios e podem ser expressas nas equações 4 e 5:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Onde I_r , I_i e I_t são as intensidades refletida, incidente e transmitida, respectivamente. Os coeficientes de reflexão (R) e de transmissão (T) de intensidade dependem da impedância acústica (Z) dos meios de propagação da onda (Z_1 - impedância do meio 1 e Z_2 - impedância do meio 2). Quando o ângulo de incidência da onda não for perpendicular à interface, a reflexão e a transmissão dependerão também do ângulo de incidência (FISH, 1990; WELLS, 1977).

APÊNDICE B

FUNCIONAMENTO E CONFIABILIDADE DO SENSOR ULTRASSÔNICO

B.1. Funcionamento

O sensor ultrassônico usa o sonar para determinar a distância de um objeto como fazem os morcegos e golfinhos. Oferece excelente detecção de alcance sem contato com alta precisão e leituras estáveis em um pacote fácil de usar. De 2 cm a 400 cm ou 1 a 13 pés. Sua operação não é afetada pela luz solar ou pela escuridão, como os detectores de obstáculo da Sharp (embora materiais acusticamente macios, como tecidos, possam ser difíceis de detectar). Ele vem completo com módulo transmissor e receptor ultrassônico. (FABRICANTE CYTRON).

O ouvido humano pode ouvir a frequência do som em torno de 20Hz ~ 20KHz, o ultrassom é a onda sonora além da capacidade humana de 20KHz. Transmissor ultrassônico emite uma onda ultrassônica em uma direção, e começa uma contagem de tempo no momento em que foi lançada. A onda ultrassônica se espalhou no ar, e retorna imediatamente quando encontra obstáculos no caminho. Por fim, o receptor para de cronometrar quando recebe a onda refletida. Como a velocidade de propagação ultrassônica é 340m / s no ar, com base no registro do temporizador t, podemos calcular a (s) distância (s) entre o obstáculo e o transmissor, a saber:

$$s = 340t / 2$$

Que é o chamado princípio de medição de distância por diferença de tempo (FABRICANTE ELECFREAKS).

O princípio da medição da distância ultrassônica utilizou o ar já conhecido velocidade de propagação, medindo o tempo desde o lançamento até a reflexão obstáculo encontrado, e depois calcular a distância entre o transmissor e o

obstáculo de acordo com o tempo e a velocidade. Assim, o princípio da medição de distância ultrassônica é o mesmo ao do radar.

A fórmula de medição de distância é expressa como: $L = C \times T$

Na fórmula, L é a distância medida, e C é o espalhamento ultrassônico de velocidade no ar, também, T representa o tempo (T é metade do valor do tempo de transmissão para receber). A tecnologia de aplicação ultrassônica é a coisa que se desenvolveu em recentes décadas. Com o avanço ultrassônico e a tecnologia eletrônica, desenvolvida especialmente como tecnologia de dispositivos semicondutores de alta potência, vem amadurecendo e a aplicação do ultrassom tornou-se cada vez mais difundida (FABRICANTE ELECFREAKS). Na Figura B1 é mostrado um esquema de ligação do sensor com a placa Arduíno e o display.

B.2. Confiabilidade

A confiabilidade foi definida como a probabilidade de um sistema ou equipamento operar sem falhas durante um certo período de tempo. Assim, a confiabilidade estabelece a probabilidade de sobrevivência de um sistema ou equipamento.

Um parâmetro muito usado para caracterizar a confiabilidade é o tempo médio para a falha (MTTF - “Mean Time To Failure”).

O Reator Argonauta, que desde a sua primeira operação em 1965 e até dezembro de 2013, já foram realizadas 5764 operações no reator ARGONAUTA, totalizando 16066 horas de operação. De acordo com as ordens de serviços de manutenção do Argonauta as bóias começaram a apresentar problemas operacionais em meados dos anos 2000, quarenta anos após o início de sua operação, e foram contabilizados 1 intervenções até 2018 (IEN,1991).

Não foram encontrados os dados do sensor HC-SR04, referente ao tempo de falha, mas consultando um fabricante similar, o mesmo informa MTTF de 142 anos.

Na a tabela (B1) é destacada a relação entre taxa de falha da chave bóia e o sensor ultrassônico.

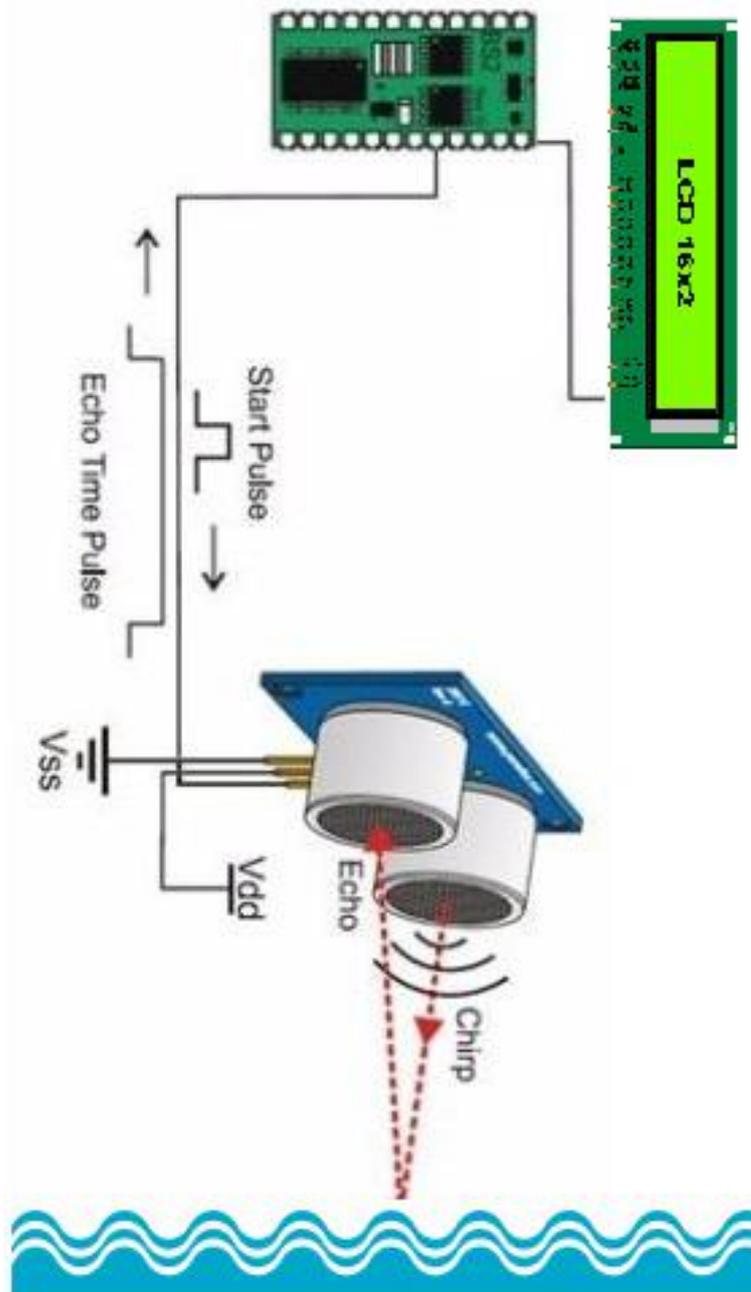


Figura B1: Sensor Ultrassônico com placa eletrônica Arduino e display diagrama unifilar. Fonte: ARDUÍNO (2018). Adaptações: O autor (2018).

Tabela B1: Número de falhas e MTTF Bóia e Sensor Hc-sr04

Dispositivo	Total de horas de operação	Número de falhas	Taxa de falhas(1/h)	MTTF Anos
Bóias	16066	1	$6,22 \times 10^{-5}$	35
Sensor Hcsr04	-----	=====	=====	142

APÊNDICE C

FUNCIONAMENTO DO DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO

C.1. Descrição

Este é um display LCD projetado para blocos-E. É um display LCD alfanumérico de 16 caracteres e 2 linhas conectado a um único conector tipo D de 9 vias. Isso permite que o dispositivo seja conectado à maioria das E / S de bloco E portas.

O display LCD requer dados em formato serial, que está detalhado no guia do usuário. O display também requer uma fonte de alimentação de 5V. (FABRICANTE VISHAY ELETRONICS).

C.2. Características

- E-blocos compatíveis
- Baixo custo
- Compatível com a maioria das portas de E / S na linha E-Block (requer 5 linhas de E / S via 9-way tipo D conector)
- Facilidade para desenvolver código de programação usando os ícones do Flowcode.

Como pode ser visto na Figura 10, o diagrama do circuito consiste em um simples circuito LCD. Para testar este display, será necessário aplicar 5V à placa de LCD através do terminal, em seguida, definir os bits apropriados usando o conector tipo D de 9 vias. Os detalhes da configuração do LCD estão descritos no guia do usuário. (FABRICANTE VISHAY ELETRONICS).

C.3. Guia do Usuário

O LCD é um módulo de 16 caracteres x 2 linhas. Internamente, são 40 caracteres x 2 linhas (Figura 1C). A linha 1 varia de H'00 para o H'27 'e a Linha 2 varia entre o H'40' e o H'67 '.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F	50	51	52	53	54	55	56

Figura C1: Display Window 16x2 Cortesia Vishay Eletronics, 2017.

O Módulo LCD usa um controlador Samsung KS0066U, que é semelhante ao controlador Hitachi HD44780.

A placa PICmicro usa pinos 1 - 6 no conector tipo D de 9 vias para programar o LCD, conforme mostrado na diagrama de circuito abaixo, Figura 2C. Quando a placa de LCD é ligada, os dados só podem ser enviados para ela depois de 30 ms, esse é o tempo gasto para o LCD inicializar [como ele limpa toda a RAM e configura o modo de entrada.

As instruções a seguir explicam as etapas para testar e usar sua placa de LCD. As instruções assumem que o PPP está instalado e funcional. Também assume que você está confiante em enviar um programa para o PIC via o multiprogramador. (FABRICANTE VISHAY ELETRONICS)

O programa LCD.hex colocará um contador na placa LCD

1) Certifique-se de que a energia é fornecida para todas as placas necessárias.

2) Insira a placa LCD na porta B do Multiprogramador

3) Assegure-se de que o Multiprogramador esteja na configuração correta

- Modo rápido (SW1 em direção ao centro da placa)

- Certifique-se de que um cristal de 19,6608MHz esteja inserido na placa Multiprogramador SW2 não é usado no modo Xtal, então não importa a posição.

4) Programe o PIC16F88 com o programa de teste LCD.hex

5) Pressione o botão de reset no Multiprogramador.

6) Ajuste o contraste de acordo.

Para conector tipo 09 vias

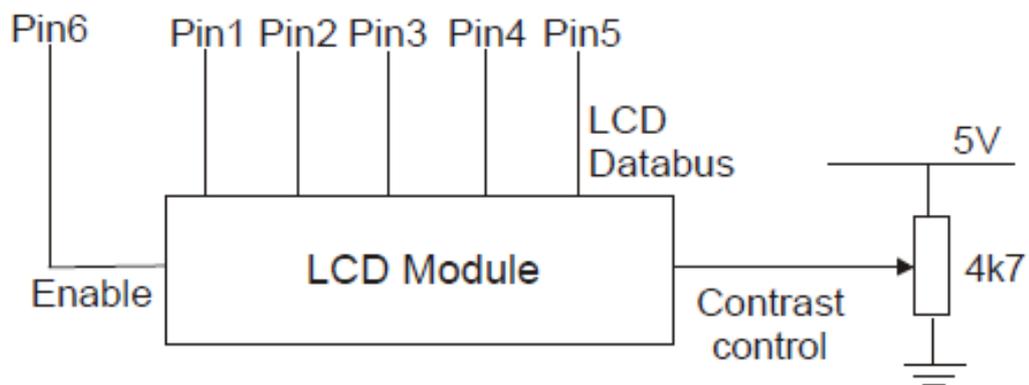


Figura C2: Diagrama em bloco do LCD fonte. Cortesia Vishay Eletronics, 2017.

Para enviar um comando para o LCD, os dados devem ser enviados em duas etapas, o MSB seguido pelo LSB [byte é dado nos pinos 1 - 4]. Como cada byte é enviado para o LCD, o B5 deve ser alto e baixo, para que o LCD reconheça o byte. Após o segundo byte ter sido reconhecido, o LCD executa o comando. O PICmicro placa deve esperar pelo menos o comprimento do tempo de execução para esse comando, antes que o próximo comando possa ser enviado. Um diagrama de tempo deste processo é mostrado abaixo. (FABRICANTE VISHAY ELETRONICS).

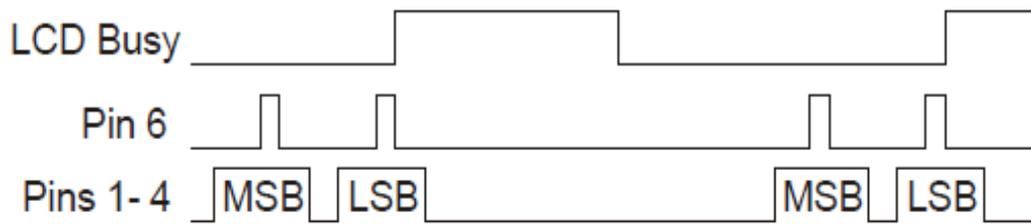


Figura C3: Diagrama de Tempo Cortesia Vishay Eletronics, 2017.

O primeiro comando a ser enviado para o LCD deve ser "Conjunto de funções" [para configurar o LCD], isso geralmente é seguido por "Display Control" e, em seguida, "Clear Display". De acordo com o "Entry Mode Set", após cada caractere ser enviado para o LCD (Conforme Figura C2), a posição do cursor muda por padrão, no qual é incrementado. (FABRICANTE VISHAY ELETRONICS).

Tabela C1: Conjunto de instruções do Display

Bit Name	L	H
I/D	Posição de decremento do cursor	Posição de incremento do cursor
SH	Sem mudança no Display	Mudança de display
D	Desliga display	Liga display
C	Desliga cursor	Liga Cursor
B	Cursor piscando desligado	Cursor piscando ligado
S/C	Movimenta o Curso	Mudança de display
R/L	Mudança para esquerda	Mudança para direita

A Figura C4 apresenta o resultado no display 16x2, formando o caracter correspondente ao endereço de acordo com o grupo de instrução.

A Figura C5 apresenta caracteres completos formados de acordo com o grupo de instrução.

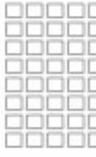
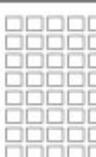
Upper 4bit Lower 4bit	LLLL	LLLH	LLHL	LLHH	LHLL	LHLH
LLLL	CG RAM (1)					
LLLH	(2)					
LLHL	(3)					

Figura C4: Alguns caracteres formados de acordo com cada grupo de instrução. Cortesia Vishay Eletronics, 2018

C.4. Parâmetros Elétricos fornecidos pela Vishay Eletronics.

Tabela C2: Parâmetros Elétricos do LCD fornecidos pela Vishay Eletronics

Item	Símbolo	Condição	Valor padrão			Unid.	
			MIN.	TYP.	Max.		
Tensão de entrada	VDD	VDD = + 5V	4.7	5.0	5.3	V	
		VDD = + 3V	2.7	3.0	5.3	V	
Corrente	IDD	VDD = 5V	–	1.2	3.0	mA	
Voltagem para temperatura normal Módulo de Versão	VDD-V0	- 20 °C	–	–	–	V	
		0°C	4.2	4.8	5.1		
		25°C	3.8	4.2	4.6		
		50°C	3.6	4.0	4.4		
		70°C	–	–	–		
Tensão de entrada do LED	VF	25°C	–	4.2	4.6	V	
Corrente de entrada do LED	IF	25°C	Aarray	–	130	260	mA
			Edge	–	20	40	
Corrente da fonte de alimentação	IEL	Vel = 110VAC:400Hz	–	–	5.0	mA	

Upper 4bit Lower 4bit	LLLL	LLLH	LLHL	LLHH	LHLL	LHLH	LHHL	LHHH	HLLL	HLLH	HLHL	HLHH	HHLL	HHLH	HHHL	HHHH
LLLL	CG RAM (1)															
LLLH	(2)															
LLHL	(3)															
LLHH	(4)															
LHLL	(5)															
LHLH	(6)															
LHHL	(7)															
LHHH	(8)															
HLLL	(1)															
HLLH	(2)															
HLHL	(3)															
HLHH	(4)															
HHLL	(5)															
HHLH	(6)															
HHHL	(7)															
HHHH	(8)															

Figura 5C: Caracteres formados de acordo com cada grupo de instrução. Cortesia Vishay Eletronics

APÊNDICE D

DESCRIÇÃO DA PLACA ELETRÔNICA ARDUÍNO UNO

D.1. Breve histórico

Em 2005, foi desenvolvido o projeto Arduíno, uma plataforma de prototipagem eletrônica, de código aberto (hardware e software open source⁶), que utiliza um microcontrolador para implementar de maneira simples e com baixo custo os mais diversos circuitos e projetos nas áreas de eletrônica e automação. Em 2010, após diversos desenvolvimentos, foi lançada a placa Arduíno UNO, a mais popular das placas Arduíno e utilizada nesse projeto medição do nível de água no Reator Argonauta. Esta placa é a padrão para projetos com o uso desta plataforma. Em 2011 foi alcançado o patamar de 500.000 placas vendidas. A placa do Arduíno UNO é o modelo utilizado nesta dissertação. (DE VAZZI, 2017).

D.2. Principais informações.

A plataforma Arduíno como citada na introdução dessa dissertação é uma opção extremamente barata e de fácil programação, não exigindo de seu usuário um conhecimento rebuscado em eletrônica e programação. Além disso, esta plataforma é de acesso livre, sendo seus códigos amplamente compartilhados pelos seus diversos usuários na internet. (DE VAZZI, 2017)

Segundo Mc Roberts A maior vantagem do Arduíno sobre outras plataformas de desenvolvimento de micro controladores é a facilidade de sua utilização; pessoas que não são da área técnica podem, rapidamente, aprender o básico e criar seus próprios projetos em um intervalo de tempo relativamente curto. Artistas, mais especificamente, parecem considerá-lo a forma perfeita de criar obras de arte interativas rapidamente, e sem conhecimento especializado em eletrônica. Há uma grande comunidade de pessoas utilizando Arduínos, compartilhando seus códigos e diagramas de circuito para que outros os copiem e

modifiquem. A maioria dessa comunidade também está muito disposta a auxiliar outros desenvolvedores (McRoberts, 2011).

Ainda de acordo com Mc Roberts, O Arduíno é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduíno é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (McRoberts, 2011).

D.3. Características

Sob uma licença Creative Commons⁷, é possível copiar, modificar, ou desenvolver um projeto baseado nos diagramas e layout das placas, disponibilizadas pelo projeto Arduíno. A única restrição é o uso do nome Arduíno, que é exclusivo da equipe que desenvolveu esta plataforma. Por isso encontra-se no mercado, os originais Arduíno, produzidos na Itália, e vários compatíveis, porém com outros nomes e países de origem como: Freeduino, Severino, Sanguino, Roboduino, Seeduino, Garagino, dentre outros.

Dentre todas as plataformas, as compatíveis com o Arduíno UNO apresentam uma ótima relação custo x benefício, sendo assim se tornam um excelente ponto de partida para o usuário iniciante e para o uso em aplicações de baixa complexidade atrelada a um baixo custo. (DE VAZZI, 2017)

Baseado no microcontrolador ATmega328, produzido pela ATMEL⁸, o Arduíno UNO possui 14 pinos de entrada/saída digital, dos quais 6 pinos podem ser usados como saídas PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso), 6 entradas analógicas, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP (In-Circuit Serial Programming - Conector Serial de Programação), um botão de reset, LEDs (Light Emissor Diode – Diodo Emissor de Luz) indicativos do estado do pino 13 e da transmissão/recepção de dados através da interface serial (Pinos 0 e 1). A placa contém todos os componentes necessários para o adequado funcionamento do microcontrolador e sua interface com o computador. (DE VAZZI, 2017).

D.4. Descrições dos Conectores da placa do Arduíno.

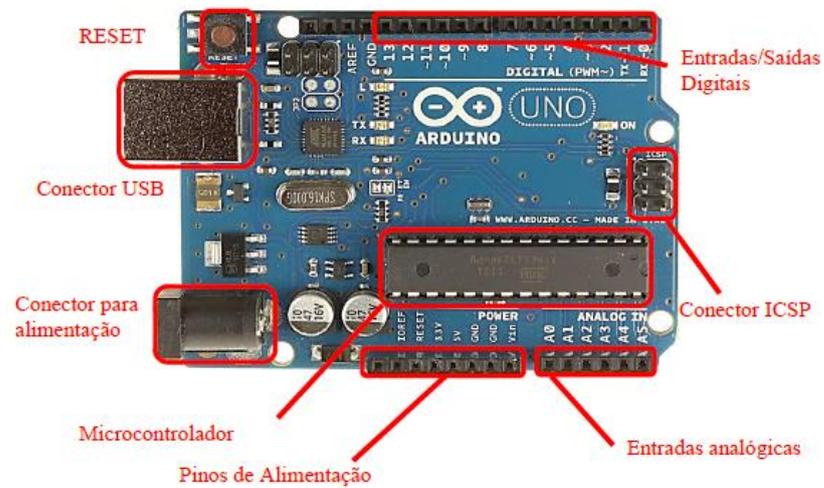


Figura D1 – Identificação dos pinos de conexão e dos principais componentes da placa do *Arduino UNO*. <http://www.forefront.io/attachments/uno.jpg>, 2018.

A placa (Figura D1) pode ser alimentada pela conexão USB, com uma fonte de alimentação externa ou por uma bateria acoplada ao conector para alimentação. A alimentação é selecionada automaticamente. Uma outra possibilidade, porém, menos recomendada, é a alimentação por meio dos pinos Vin e GND. A tensão da fonte externa pode variar de 6 a 20 volts. No entanto, recomenda-se uma tensão entre 7V e 12V.

D.5. Descrição dos pinos de alimentação da placa *UNO*

Tabela D1 – Descrição dos pinos de alimentação da placa do *Arduino UNO*.

Fonte: *Documentation Arduino UNO*, em www.arduino.cc, consultado em 04/11/2018

VIN	Entrada de alimentação para a placa quando se está utilizando uma fonte de alimentação externa, em oposição à conexão USB ou outra fonte de alimentação regulada ligada através do conector de alimentação. Quando a placa é alimentada através do conector Jack, a tensão fornecida pela fonte estará nesse pino.
GND	Pinos terra, tensão 0 V de referência.
5V	Fornece tensão de 5 V para alimentação de sensores, placas auxiliares e circuitos externos. A corrente máxima suportada pelo microcontrolador é de 200 mA.
3V3	Fornece tensão de 3,3 V para alimentação de sensores, placas auxiliares e circuitos externos. A corrente máxima suportada é de 50mA.
RESET	Pino conectado ao RESET do microcontrolador. Pode ser utilizado para um reset externo do microcontrolador. Quando este pino comuta para o valor LOW (0V) o microcontrolador é reiniciado.
IOREF	Fornece uma tensão de referência para que placas dedicadas ao Arduino (shields) possam selecionar o tipo de interface apropriada, dessa forma shields que funcionam com as placas Arduino que são alimentadas com 3,3V podem se adaptar para ser utilizados em 5V e vice-versa.

Cada um dos 14 pinos digitais presentes na placa do Arduino *UNO* pode ser utilizado como uma entrada ou uma saída digital e podem apresentar duas tensões distintas 0 (LOW – Nível baixo) e 5v (HIGH – Nível alto), com uma corrente máxima de 40mA. Alguns desses pinos tem funções secundárias específicas, conforme apresentadas a seguir:

Tabela D2 – Funções especiais de alguns dos pinos de entrada/saída do *Arduíno UNO*. Fonte: *Documentation Arduino UNO*, em www.arduino.cc, consultado em 04/11/2018

Serial	Pinos 0 (RX) e 1 (TX). Usados para receber (RX) e transmitir (TX) dados seriais TTL.
Interrupções Externas	Pinos 2 e 3. Estes pinos podem ser configurados para disparar uma interrupção de acordo com alguma variação de parâmetro percebida pelo circuito.
SPI (Serial Peripheral Interface ou Interface de comunicação serial para periféricos)	Pinos 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). A SPI é um protocolo de dados seriais síncronos utilizado em microcontroladores para comunicação entre o microcontrolador e um ou mais periféricos. Também pode ser utilizado entre dois microcontroladores. A comunicação SPI sempre tem um master. Isto é, sempre um será o master e o restante será slave. Por exemplo, o Arduíno é o master e os outros periféricos são slave. Esta comunicação contém 4 conexões: MISO (Master IN Slave OUT) - Dados do Slave para Master; MOSI (Master OUT Slave IN) - Dados do Master para Slave; SCK (Serial Clock) - Clock de sincronização para transmissão de dados entre o Master e Slave; SS (Slave Select) - Seleciona qual Slave receberá os dados.
LED	Pino 13. Há um LED integrado ao pino digital 13. Quando este pino está no valor HIGH este LED está aceso, quando o pino está em LOW o LED está apagado.
I2C (Inter Integrated Circuit)	Pinos 4 (SDA) e 5 (SCL). Fornecem suporte a comunicação I2C. I2C é um protocolo de comunicação (ou bus), ou seja, com os mesmos fios conectamos todos os dispositivos da rede I2C. Essa característica, de barramento, é um dos grandes atrativos do I2C, pois reduzimos em muito a necessidade de pinos de conexão no Arduíno, pois usaremos sempre os mesmos fios para a conexão, não importa se estamos utilizando 1 ou 127 dispositivos. SDA significa Serial Data e SCL significa Serial Clock. O SDA é o pino que efetivamente transfere os dados, e o SCL serve para temporização entre os dispositivos, de modo que a comunicação pela SDA possa ter confiabilidade. Tanto o envio quanto a recepção de dados é realizada utilizando a linha SDA, ou seja, é uma linha bi-direcional de comunicação, ora estamos enviando dados por este pino, ora estamos recebendo dados.

O microcontrolador apenas processa dados digitais, sendo assim se torna necessário converter o sinal analógico em digital. O conversor Analógico digital, ADC ou conversor A/D, presente no projeto do *UNO*, quantifica o valor analógico conforme a quantidade de bits da sua resolução. O tempo para essa conversão é

de aproximadamente 100 microsegundos, dessa forma a máxima frequência de leitura que pode ser obtida é de 10.000 vezes por segundo ou 10 kHz.

O Arduíno *UNO* possui 6 entradas analógicas, identificadas de A0 a A5, cada uma tem 10 bits de resolução (1024 valores diferentes, de 0000000000 a 1111111111). Por padrão elas medem de 0 a 5,0 V, embora seja possível alterar o limite superior utilizando o pino AREF. Considerando o padrão de 0 a 5,0 volts podemos concluir que a resolução nas entradas analógicas é de, aproximadamente, 4,89 mV.

Tabela D3: Parâmetros Elétricos da placa Arduíno Uno. Fonte: *Overview Arduíno UNO*, em www.arduino.cc, consultado em 27/10/2018.

Microcontrolador	ATmega328
Tensão Operacional em corrente contínua	5V
Tensão de entrada em corrente contínua (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada em corrente contínua (limites)	6-20V
Pinos E/S digitais	14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente contínua máxima por pino E/S	40 mA (total de 200 mA)
Corrente contínua máxima para o pino de 3,3V	50 mA
Flash Memory ⁹	32 KB dos quais 0,5KB são utilizados pelo bootloader ¹⁰
SRAM ¹¹	2 KB
EEPROM ¹²	1 KB
Frequência de Clock ¹³	16 MHz

A placa controladora Arduino também apresenta como vantagem a tensão baixa de operação e exige baixa potência para sua operação o que permite instalar esse tipo dispositivo em qualquer circuito. Apesar de exigir baixa potência para sua operação. O Arduino permite através do uso de relés auxiliares o acionamento de cargas de potencias até da ordem de mega Watts.

APÊNDICE E

PROGRAMAÇÃO DA PLACA ARDUÍNO

E.1. Programa Arduíno para Medição do nível de água no Reator Argonauta

```
//Programa Indicação Nível de Água Reator Argonauta
//Adptação feita por João Daniel março 2018

// Incluímos a biblioteca externa para ser utilizada
#include <LiquidCrystal.h> // Entre os símbolos <> irá procurar na pasta da biblioteca configurada

// Primeiro inicia a biblioteca indicando os pinos da interface
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);

// Definimos as constantes
#define COLS 16 // Colunas del LCD
#define ROWS 2 // Filas del LCD

// Configuramos os pinos do sensor Trigger y Echo
const int PinTrig = 3;
const int PinEcho = 11;

// Constante velocidade sonica em cm/s
const float VelSon = 34000.0;

// Número de amostras
const int numLeituras = 10;

// Distância entre Cheio e Vazio
const float distanciaCheio = 30.48;
const float distanciaVazio = 7.00;

float leituras[numLeituras]; // Matriz para armazenar leituras
int leituraAtual = 0; // Medida atual
float total = 0; // Total das medidas
float media = 0; // Média das medidas
bool primeiraMedia = false; // Para saber que estamos calculado pelo menos uma

void setup()
```

```

{
// Iniciamos o display para mostrar a série de resultados
Serial.begin(9600);
// Colocamos o pin Trig em modo de saída
pinMode(PinTrig, OUTPUT);
// Colocamos o pin Echo em modo de entrada
pinMode(PinEcho, INPUT);

// Inicializamos a Matriz
for (int i = 0; i < numLeituras; i++)
{
    leituras[i] = 0;
}

// Configuramos as filas e as columnas do LCD e neste caso 16 columnas e 2 linhas
lcd.begin(COLS, ROWS);
}
void loop()
{
// Eliminamos a última medida
total = total - leituras[leituraAtual];

iniciarTrigger();

// A função PulseIn leva o tempo necessário para alternar entre estados, neste caso, para HIGH
unsigned long tempo = pulseIn(PinEcho, HIGH);

// Temos a distância em cm, temos que converter o tempo em segundos, já que está em
microsegundos
// Por isso se multiplica por 0.000001
float distancia = tempo * 0.000001 * VelSon / 2.0;

// Armazenamos a distância na matriz
leituras[leituraAtual] = distancia;

// Adicionamos a leitura ao total
total = total + leituras[leituraAtual];

// Avançamos para a próxima posição da matriz
leituraAtual = leituraAtual + 1;

// Verificamos se atingimos o final da matriz
if (leituraAtual >= numLeituras)
{
    primeraMedia = true;
    leituraAtual = 0;
}
}

```

```

// Calculamos a media
media = total / numLeituras;

// Só mostramos se calculamos pelo menos uma média
if (primeraMedia)
{
    float distanciaLleno = distanciaCheio - media;
    float cantidadLiquido = distanciaLleno * 3648.19 / 1000;
    int porcentaje = (int) ( distanciaLleno * 100 / ( distanciaCheio - distanciaVacio ) );
    float alturamaxima = ( distanciaCheio - media);

    // Mostrando na tela LCD
    lcd.clear();
    // Media
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(String(alturamaxima) + " cm" + " Nivel");

    // Porcentagem
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(String(porcentaje) + " %");

    Serial.print(media);
    Serial.println(" cm");

    Serial.print(cantidadLiquido);
    Serial.println(" l");

    if (cantidadLiquido < 28.27 )
    {
        lcd.setCursor(10, 1);
        lcd.print("Baixo");
    }

    if ((cantidadLiquido >= 28.27) && (cantidadLiquido < 56.54))
    {
        lcd.setCursor(10, 1);
        lcd.print("Medio");
    }

    if (cantidadLiquido > 56.54 )
    {
        lcd.setCursor(10, 1);
        lcd.print("Alto");
    }
}

```

```
}  
else  
{  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("Calculando: " + String(leituraAtual));  
}  
  
delay(500);  
}  
  
// Método que inicia la sequencia do Trigger para começar a medir  
void iniciarTrigger()  
{  
  // Colocamos o Triiger em estado baixo e esperamos 2 ms  
  digitalWrite(PinTrig, LOW);  
  delayMicroseconds(2);  
  
  // Colocamos o pin Trigger em estado alto e esperamos 10 ms  
  digitalWrite(PinTrig, HIGH);  
  delayMicroseconds(10);  
  
  // Começamos colocando o pin Trigger em estado baixo  
  digitalWrite(PinTrig, LOW);  
}
```

E.2. Simulação para testar o programa

Para testar a programação foi montado um dispositivo para simular a medição do nível de água nas mesmas condições de altura do Reator Argonauta (Figura E1).



Figura E1: Montagem para testar a programação no Arduino.

As duas vasilhas possuem cerca de 30cm de altura, dimensões iguais a do reator, neste caso em especial foi criada uma lógica digital que permite através dos dados do sensor ultrassônico, controlar de forma constante o enchimento e esvaziamento dos tanques, o que permitiu o acompanhamento do nível de água no vaso inferior enquanto os tanques enchiam e esvaziavam num circuito “de repetição”