

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**GUSTAVO SOUZA PINHEIRO DOS SANTOS**

**METODOLOGIA PARA AUXILIAR NO TREINAMENTO DE MANOBRAS DE  
OPERAÇÃO DE BOMBAS DE UMA USINA NUCLEAR UTILIZANDO REALIDADE  
VIRTUAL**

**Rio de Janeiro  
2021**

GUSTAVO SOUZA PINHEIRO DOS SANTOS

**METODOLOGIA PARA AUXILIAR NO TREINAMENTO DE MANOBRAS DE  
OPERAÇÃO DE BOMBAS DE UMA USINA NUCLEAR UTILIZANDO REALIDADE  
VIRTUAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos de Abreu Mol  
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique dos Santos Grecco

Rio de Janeiro  
2021

SANT Santos, Gustavo Souza Pinheiro dos

Metodologia para auxiliar no treinamento de manobras de operação de bombas de uma usina nuclear utilizando realidade virtual / Gustavo Souza Pinheiro dos Santos – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2021.

121fl.; 31 cm.

Orientador: Antônio Carlos de Abreu Mol  
Orientador: Cláudio Henrique dos Santos Grecco

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2021.

1. Realidade Virtual. 2. Treinamento. 3. Engenharia de Fatores Humanos 4. Simulador. 5. Usina Nuclear.

**METODOLOGIA PARA AUXILIAR NO TREINAMENTO DE MANOBRAS DE  
OPERAÇÃO DE BOMBAS DE UMA USINA NUCLEAR UTILIZANDO REALIDADE  
VIRTUAL**

GUSTAVO SOUZA PINHEIRO DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE  
ENGENHARIA NUCLEAR COMO REQUISITO PARCIAL NECESSÁRIO PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA NUCLEARES.

Aprovada por:

---

Prof. Antônio Carlos de Abreu Mol, D.Sc.

---

Prof. Cláudio Henrique dos Santos Grecco, D.Sc.

---

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc.

---

Prof. Renato Yoichi Ribeiro Kuramoto, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JUNHO DE 2021

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me protegido e guiado até este momento especial da minha vida, a minha tão amada mãe que com toda sua trajetória de vida, sempre me incentivou a querer buscar e vencer novos desafios. Ao meu tão amado pai, que desde sempre me fez perceber que com trabalho duro e dedicação tudo é possível. A minha esposa e filha, que conseguiram lidar com a minhas constantes ausências e extremo cansaço. Sem o apoio e compreensão de vocês nada disso seria possível.

Aos colegas de trabalho, em especial Ison Soares que me apoiou incondicionalmente para o êxito deste desafio; Anselmo Barbosa, Fabiano Portugal e Douglas Salmão, que sempre estiveram dispostos a apoiar no que fosse preciso; Luciano Zadaronsy pela riqueza de informações e detalhes e aos amigos, Rodrigo Ferraro e Jorge Alberto, sem a contribuição e as intermináveis conversas sobre o tema da dissertação, seria impossível terminá-la sem vocês.

Ao meu colega, mestre e amigo Jorge Francisco Marques, que com sua postura e conhecimento, me fez ousar ir em busca de um nível de excelência próximo ao dele.

Ao meu orientador, professor Antônio Carlos Abreu Mol, que arduamente e pacientemente me ajudou nesta dissertação. Persistiu e me apontou o caminho, fazendo-me perceber quão é grande a magnitude da realidade virtual com a área nuclear.

Ao meu orientador Cláudio Henrique dos Santos Grecco, pelos ensinamentos enriquecedores, pelo incentivo, pela disponibilidade e apoio para realização da minha pesquisa.

Aos professores do IEN que se dedicaram em transmitir seus conhecimentos. Em especial o professor Celso Lapa, pelas conversas e orientações nos intervalos e ao final da aula, elas foram o embrião para a formação desta dissertação. Meu eterno obrigado.

Ao professor membro da Banca Examinadora, Renato Yoichi Ribeiro Kuramoto, que aceitou participar e contribuir com este trabalho.

À equipe do LABRV, Joaquim Santos, Paulo Oliveira e Yuri Fernandes pelo apoio fundamental e interesse dispensados no decorrer deste trabalho.

Agradeço a todos os funcionários do IEN assim como todos que de alguma forma apoiaram para o sucesso deste trabalho.

“Imaginação é tudo, é a prévia das atrações futuras”

Albert Einstein

## RESUMO

Considerando as diversas atividades a serem desenvolvidas em usinas nucleares de potência, sempre tem que se tomar bastante cuidado na sua execução, pois são críticas e uma manobra errada pode causar danos. Uma dessas manobras por exemplo é a comutação de bombas, onde uma execução incorreta pode causar até mesmo o desligamento da unidade. Então para evitar este tipo desligamento, treinamentos são bem interessantes e necessários. Entretanto para fazer um treinamento amplo e com todas as situações previstas, demanda um prazo muito extenso e algumas vezes não inclui a parte prática, onde a mesma só pode ser observada em situações especiais, como por exemplo na parada da unidade, não havendo então, uma oportunidade para um treinamento mais fidedigno durante operação normal. Sendo assim, o objetivo desta dissertação é a criação de um ambiente virtual, para que possa ser feito um treinamento na manobra crítica de operação de comutação de bombas. Para esse fim, como método foi primeiramente utilizado o procedimento específico para a execução real da manobra de comutação de bombas como referência. Depois foi analisado o procedimento que faz referências aos alarmes na sala de controle, pertinentes a manobra de comutação de bombas. Então foi interpretado a folha de lógica, afim de reproduzir no ambiente virtual, o mesmo comportamento do ambiente real. Logo em seguida foi analisado o treinamento atual. Na sequência, foram promovidas visitas ao campo, sala de controle e simulador de sala de controle, com intuito de obter material e dados, para a montagem do ambiente virtual. Por fim, de posse de toda a informação coletada, foi criado um ambiente virtual. O resultado foi a criação de sistema e equipamentos de interesse para a manobra de comutação de bombas, de forma interativa no ambiente virtual, com grande fidelidade ao ambiente real. Após essa criação foi feito um teste pelos operadores e instrutores de usina nuclear sobre este ambiente virtual. Por fim, o resultado do teste deste grupo, foi considerado muito positivo, demonstrando que o ambiente virtual representa o ambiente real e que pode ser uma ótima ferramenta para auxiliar no treinamento existente. Desta forma a escolha de um sistema a ser reproduzido em ambiente virtual que represente o desafio de treinar manobras críticas que afetem o reator foi fundamental. A escolha desta manobra demonstra que o ambiente virtual criado é uma boa ferramenta para auxiliar neste tipo de treinamento de forma significativa, pois promove a experiência de desafios impostos, que são comuns a vários outros sistemas de uma usina nuclear.

**Palavras-chave:** Realidade Virtual, Treinamento, Engenharia de Fatores Humanos, Simulador, Usina Nuclear.

## ABSTRACT

Several activities to be developed in nuclear power plants, whenever great care is taken in their execution, as they are critical and a wrong maneuver can cause damage. One of these maneuvers, for example, is a switching of pumps, where an incorrect execution can even cause the unit to shut down. So to avoid this kind of disconnection, training is very interesting and useful. However, in order to carry out a comprehensive training and with all the foreseen forecasts, it requires a very long term and sometimes does not include a practical part, where it can only be observed in special situations, such as when the unit is stopped, and there is not, an opportunity for more reliable training during normal operation. Therefore, the objective of this dissertation is the creation of a virtual environment, so that training can be done in the critical maneuver of the pump switching operation. For this purpose, as a method, the specific procedure for the real execution of the pump switching maneuver as a reference was first used. Then the procedure that references the alarms in the control room, pertinent to the pump switching maneuver, was analyzed. Then a logic sheet was interpreted, in order to reproduce any virtual environment, or even behavior of the real environment. Soon afterwards, the current training was analyzed. Subsequently, visits to the field, a control room and a control room simulator were promoted, in order to obtain material and data, for the setting up of the virtual environment. Finally, with all the information collected, a virtual environment was created. The result was the creation of systems and equipment of interest for a pump switching maneuver, interactively in the virtual environment, with great fidelity to the real environment. After this creation, a test was carried out by the operators and instructors of the nuclear plant on this virtual environment. Finally, the test result of this group, was considered very positive, demonstrating that the virtual environment represents the real environment and that it can be a great tool to assist the existing one in training. Thus, the choice of a system to be reproduced in a virtual environment that represents the challenge of training critical maneuvers that affect the reactor was fundamental. The choice of this maneuver demonstrates that the virtual environment created is a good tool to assist in this type of training in general, as it promotes an experience of imposed challenges, which are common to several systems of a nuclear power plant.

**Keywords:** Virtual Reality, Training, Simulator, Human Factors Engineering, Nuclear Power Plant.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Anexo IV Norma CNEN 1.01 .....	23
Figura 2: Sistema de Água de Refrigeração Principal – Sala das Bombas .....	36
Figura 3: Sala das Bombas de Água de Refrigeração Principal seis circuitos independentes .	37
Figura 4: Arranjo Esquemático da Bomba da água de refrigeração principal.....	38
Figura 5: Composição de um subsistema de lubrificação de óleo.....	39
Figura 6: Importância global na usina da bomba da água de refrigeração principal.....	40
Figura 7: Percurso da Água de Refrigeração Principal (mar) .....	40
Figura 8: Indicação dos principais componentes atuados .....	41
Figura 9: Painel de comando local .....	45
Figura 10: Painel de comando local - comutação manual bomba 1 para bomba 2 .....	50
Figura 11: Representação das duas bombas de óleo lubrificante .....	51
Figura 12: Representação do manômetro local .....	52
Figura 13: Representação dos pressostatos em série com o manômetro local .....	54
Figura 14: Representação no fluxograma com os principais componentes.....	55
Figura 15: Fluxograma simples com os principais componentes.....	56
Figura 16: Lógica simplificada - Parcela do circuito de óleo lubrificante na lógica de proteção da bomba principal .....	57
Figura 17: Indicação das válvulas de descarga.....	58
Figura 18: Alinhamento com uma bomba operando - bomba de óleo 1 operando e bomba 2 em prontidão .....	62
Figura 19: Alinhamento com duas bombas operando - Comutação bomba 1 para bomba 2 em andamento - Duas bombas operando.....	63
Figura 20: Alinhamento com uma bomba operando - Comutação bomba 1 para 2 concluída - Bomba 2 operando e bomba 1 em prontidão .....	64
Figura 21: Construção do objeto bomba principal e objeto painel de comandos das bombas de óleo .....	65
Figura 22: Construção do ambiente virtual .....	66
Figura 23: Construção do ambiente virtual – Renderizado .....	66
Figura 24: Construção da Funcionalidade .....	67
Figura 25: Ambiente do Adobe Ilustrador.....	68
Figura 26: Ambiente de Desenvolvimento do Microsoft Visual Studio .....	69
Figura 27: Ambiente de interface principal de Desenvolvimento do Unity 3D.....	70
Figura 28: Ambiente de interface Gráfica do Programa de Modelagem Tridimensional 3Ds Max.....	70
Figura 29: Óculos de Realidade Virtual .....	72
Figura 30: Reprodução da sala das bombas de água de refrigeração principal no ambiente virtual.....	74
Figura 31: Reprodução da Bomba da Água de Refrigeração Principal no ambiente virtual....	75
Figura 32: Reprodução das bombas de óleo sob o gradeado do piso no ambiente virtual.....	76
Figura 33: Reprodução do Manômetro no ambiente virtual.....	77

Figura 34: Reprodução dos painéis de comando para as bombas de óleo lubrificante no ambiente virtual .....	77
Figura 35: Reprodução dos painéis de comando para as bombas de óleo lubrificante no ambiente virtual .....	78
Figura 36: Menu de Maus Funcionamentos do ambiente virtual .....	79
Figura 37: Bomba 1 momento antes da falha .....	80
Figura 38: Falha na bomba 1, com sinalização de “falha térmica”, “comutação” e de “desligada” acesas, e de “ligado” apagada. Sinalização de “ligada” para a bomba 2 acesa, e chave seletora Q4 ainda na posição para a bomba 1 .....	80
Figura 39: Bomba 1 ligada, momentos antes da baixa eficiência. Pressão no manômetro 3,5 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e bomba 2 desligada, chave seletora Q4 posição para bomba 1 .....	82
Figura 40: Bomba 1 ligada. Baixa eficiência em andamento. Pressão do manômetro reduzindo e chegando em aprox. 2,6 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e bomba 2 desligada, chave seletora Q4 posição para bomba 1 .....	82
Figura 41: Baixa eficiência na bomba 1. Partida automática da bomba 2 em prontidão – Sinalização de bomba 1 e 2 ligadas. Pressão do manômetro em aproximadamente 5,0 bar. Sinalização de duas bombas operando e chave seletora Q4 na posição para bomba 1 .....	83
Figura 42: Bomba 1 ligada. Pressão do manômetro em 3,5 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e chave seletora Q4 na posição para bomba 1 .....	84
Figura 43: Bomba 1 e 2 ligada. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2. ....	84
Figura 44: Bomba 2 ligada. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2. Pressão do manômetro em 3,5bar. Sinalização da bomba 2 ligada e bomba 1 desligada. Comutação com Sucesso. ....	85
Figura 45: Bomba 1 ligada. Momentos antes da comutação manual. Chave seletora Q4 na posição bomba 1. Pressão do manômetro em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada. ....	86
Figura 46: Bomba 1 ligada. Chave seletora Q4 comutada para bomba 2. Pressão do manômetro mantida em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada. Sinalização de falha acesa para a bomba 2. Comutação manual sem sucesso. ....	86
Figura 47: Bomba 1 ligada. Momentos antes da comutação manual. Chave seletora Q4 na posição bomba 1. Pressão do manômetro mantida em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada. ....	88
Figura 48: Comutação manual em andamento. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2. Sinalização acesa de bomba 1 e 2 ligadas. Sinalização acesa de 2 bombas operando. Sinalização de falha apagada. Pressão do manômetro em 6,5bar e reduzindo.....	88
Figura 49: Comutação manual em andamento. Chave seletora Q4 continua comutada para posição bomba 2. Sinalização acesa de bomba 1 e 2 ligadas. Sinalização acesa de 2 bombas operando. Sinalização de falha apagada. Pressão do manômetro em 5,2bar e reduzindo.....	89
Figura 50: Mensagem de falha total do sistema de óleo da Bomba Principal.....	89
Figura 51: Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 1 – Operadores de Campo .....	96
Figura 52: Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle .....	97

Figura 53: Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 3 Instrutores de Simulador de Usina Nuclear .....	97
Figura 54: Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 1 .....	101
Figura 55: Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 2 .....	102
Figura 56: Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 3 .....	103

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características da bomba principal.....	38
Tabela 2 - Resultado do Questionário – Grupo 1 – Operadores de Campo .....	95
Tabela 3 - Resultado do Questionário – Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle .....	95
Tabela 4 - Resultado do Questionário – Grupo 3 – Instrutores de Simulador.....	96

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ARP	-	Água de Refrigeração Principal
BRR	-	Bomba de Refrigeração do Reator
CNEN	-	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTAS	-	Centro de Treinamento Avançado em Simulador
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética
EFH	-	Engenharia de Fatores Humanos
GV	-	Gerador de Vapor
IAEA	-	International Atomic Energy Agency
IEN	-	Instituto de Engenharia Nuclear
IRD	-	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LABRV	-	Laboratório de Realidade Virtual
MCW	-	Main Cooling Water
MOU	-	Manual de Operação da Usina
ONS	-	Operador Nacional do Sistema Interligado
OSR	-	Operador Sênior de Reator
PZR	-	Pressurizador
OR	-	Operador de Reator
RV	-	Realidade Virtual
SIN	-	Sistema Interligado Nacional
UHE	-	Usina Hidrelétrica
UTN	-	Usina Termo Nuclear
WANO	-	World Association of Nuclear Operators

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>17</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA .....	17
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	24
1.3 OBJETIVO GERAL.....	28
<b>1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO</b> .....	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>29</b>
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 REALIDADE VIRTUAL PARA TREINAMENTO .....	29
2.2 DISPONIBILIDADE DE UMA USINA NUCLEAR.....	33
2.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	33
2.4 SISTEMA DE CONTROLE DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU	34
2.5 SISTEMA DE LIMITAÇÃO DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU	34
2.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU	35
2.7 SISTEMA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL .....	35
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>37</b>
<b>3 PARÂMETROS BÁSICOS PARA ESTRUTURA FÍSICA</b> .....	<b>37</b>
3.1 ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS DO AMBIENTE .....	37
3.2 VISUALIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DA IMPORTÂNCIA GLOBAL NA USINA DA BOMBA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL.....	39
3.3 PERCURSO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL (MAR).....	40
3.4 O PAINEL DE COMANDO LOCAL.....	41
<b>3.4.1 Chave Geral</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4.2 Chave Q3 - Seleção Operação (Três Posições –Remoto, Local, Teste)</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4.3 Chave Q4 – Liga (Duas Posições –Bomba 1 ou Bomba 2)</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4.4 Botão Liga /Desliga</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4.5 Botão teste liga/ desliga (seção dos botões da bomba 1)</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4.6 Botão teste liga/desliga (seção dos botões da bomba 2)</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4.7 Botão Reset</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4.8 Botão teste de lâmpada</b> .....	<b>43</b>

<b>3.4.9 Sinalizações .....</b>	<b>44</b>
3.4.10 Horímetros .....	44
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>46</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
4.1 PESQUISA DOCUMENTAL E BIBLIOGRAFIA .....	48
4.2 PESQUISA DE CAMPO .....	49
4.3 DEFINIÇÕES DAS MANOBRAS IMPORTANTES .....	50
4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO VIRTUAL DO PAINEL DA BOMBA DE ÓLEO E DO AMBIENTE DA BOMBA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL .....	64
<b>4.4.1 Adobe Ilustrador e Microsoft Visual Studio .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4.2 UNITY 2018.3.10f1 .....</b>	<b>69</b>
<b>4.4.3 3D Studio Max 2018 .....</b>	<b>70</b>
<b>4.4.4 Óculos de Realidade Virtual.....</b>	<b>72</b>
<b>4.4.5 Aplicação da Metodologia.....</b>	<b>72</b>
4.4.5.1 Sala das bombas de água de refrigeração principal .....	73
4.4.5.2 Bomba da Água de Refrigeração Principal .....	74
4.4.5.3 Bomba de Óleo .....	75
4.4.5.4 Manômetro .....	76
4.4.5.5 Painel de Comando Local para as Bombas de Óleo .....	77
4.4.5.6 Menu de mau funcionamento .....	78
4.5 AVALIAÇÃO .....	90
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>91</b>
<b>5 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO.....</b>	<b>91</b>
5.1 ESCALA LIKERT .....	91
5.2 ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO .....	92
5.3 PÚBLICO ALVO .....	92
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>94</b>
<b>6 RESULTADOS.....</b>	<b>94</b>
6.1 AVALIAÇÃO PELA ESCALA LIKERT .....	94
6.2 RESULTADO DA ESCALA LIKERT .....	96
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>98</b>
<b>7 DISCUSSÕES .....</b>	<b>98</b>
7.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS BASEADO NA ESCALA LIKERT .....	101

<b>7.1.1 Avaliação Comparativa do primeiro conjunto de questões – Categoria 1.....</b>	<b>101</b>
<b>7.1.2 Avaliação Comparativa do segundo conjunto de questões – Categoria 2.....</b>	<b>102</b>
<b>7.1.3 Avaliação Comparativa do terceiro conjunto de questões – Categoria 2.....</b>	<b>102</b>
<b>7.1.4 Trabalhos relacionados .....</b>	<b>103</b>
<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>106</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>106</b>
<b>8.1 PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>115</b>



## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o tema da dissertação, caracterização do problema e os objetivos da pesquisa.

#### 1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

As usinas nucleares desempenham um papel importante na matriz energética de qualquer país, além de pertencerem ao grupo de indústrias complexas (GONÇALVES e RUIZ, 2016). Nesse contexto, possuem uma série de sistemas e equipamentos diferentes, que de uma forma – direta ou indireta – influenciam um no comportamento do outro, e por vezes até no desempenho da usina. Nas usinas nucleares estes sistemas podem ser divididos basicamente em três grandes sistemas: primário, secundário e terciário. O sistema primário diz respeito à parte nuclear e consiste de forma geral dos seguintes componentes: a) núcleo do reator, b) elementos combustíveis, c) barras de controle, d) vaso do reator, e) bombas de refrigeração do reator e f) gerador de vapor. Cada um destes componentes possui seus subsistemas. O sistema secundário corresponde à parte de geração de energia elétrica; composto basicamente pelo gerador elétrico, turbina à vapor, bombas e tubulações de água e de vapor. Já o sistema terciário é o que permite o sistema subsequente funcionar, ou seja, fornece a fonte fria para que ocorra a condensação do vapor no ciclo-água vapor, de forma que permita o circuito secundário funcionar como um circuito fechado viabilizando a operação da usina nuclear de forma competitiva, eficaz e segura (TAHUATA, 2014). Ele é composto basicamente de bombas, galerias e tubulações, cada qual com seus subsistemas. No circuito terciário, o componente de maior relevância é a bomba da água de refrigeração principal (ou bomba de água de circulação), que é a responsável por transportar a água do mar, desde a Estrutura da Tomada d'Água Principal até a descarga no Poço de Selagem Principal, passando antes pelos condensadores, proporcionando neste, a condensação do vapor, seja da exaustão das turbinas seja da atuação das válvulas do sistema de

desvio de vapor. Em sua tese, Marcio Luiz da Fonseca discorre sobre o funcionamento do sistema terciário de uma usina nuclear (FONSECA, 2006), cuja função é de fornecer a fonte fria (água do mar), para um circuito fechado de água desmineralizada, que promove a refrigeração de diversos componentes do sistema secundário, dentre eles o gerador elétrico

A operação correta de todos estes sistemas demanda um treinamento intenso composto de extensiva carga horária teórica e prática. Cito como exemplo, um sistema usado em muitas termelétricas convencionais e que também é usado em termelétricas nucleares e que em caso de falha do mesmo impacta no reator. É o sistema que fornece a fonte fria aos condensadores (FONSECA, 2006). Na usina utilizada para o estudo, trata-se do sistema de Água de Refrigeração Principal (ARP), onde uma das manobras mais delicadas é a comutação das bombas de óleo deste sistema. Neste sistema, existe uma operação perfeita, que é preciso ter conhecimento profundo do comportamento esperado, e se for feita errada a consequência é séria. Pode ser necessário realizar operações diferentes dependendo da resposta do sistema de óleo. Com a usina em operação a 100% de potência, um treinamento prático de fato neste sistema, não pode ser feito e desta forma o treinamento, é feito com arguição e apontamento, se tornando de certa forma abstrato. Esta manobra de comutação de bombas de óleo é um processo que requer atenção e exige conhecimento, pois demanda interpretações do comportamento do sistema de óleo. Em vista de tudo isso, é praticamente impossível com a usina a plena carga um treinamento (ou retreinamento) que permita o operador sem experiência realizar as diversas operações e vivenciar os vários desafios já conhecidos. Um treinamento eficaz proporciona operações diferentes em situações diferentes, coisa que em operação a plena carga não pode ser permitido, pois pode-se alterar o funcionamento da própria usina. Por outro lado, o treinamento ou retreinamento feito atualmente neste sistema não é prático, uma vez que não é atuado efetivamente o sistema. O operador aponta com base em suposições. Porém, também não oferece risco algum em mudar o estado da planta apenas para treinar ou retreinar.

As consequências de uma operação equivocada na comutação das bombas de óleo do sistema de água de refrigeração principal, afeta diretamente a operação da bomba principal, causando seu desligamento. E, de forma indireta, causará a redução de potência da usina, devido à perda de eficiência do condensador. Como a bomba principal é responsável por levar a água do mar (fonte fria) até os condensadores, a mesma deixa de chegar aos mesmos. A consequência é que a condensação neste equipamento não ocorre, e assim o vácuo que antes era criado no condensador pela colapso da molécula de água que estava na forma de vapor e era convertida para forma líquida, não ocorre mais. Isto afeta diretamente a eficiência do condensador e consequentemente da turbina, pois irá exigir mais torque na mesma para continuar gerando a

mesma quantidade de potência elétrica antes estabelecida. Dessa forma mais energia é demandada da fonte quente. Em uma térmica convencional aumenta-se a queima na caldeira. Em uma térmica nuclear aumenta-se a taxa de queima de combustível nuclear, com mais fissões e assim, poder aumentar a potência do reator num primeiro momento (TOMALSQUIM, 2016). Este comportamento no reator não é desejado, e tanto ações automáticas como manuais devem ser tomadas para evitar uma potência do reator acima do limite permitido por projeto e pelo órgão fiscalizador.

Algumas usinas do tipo PWR (Pressurize Water Reactor - Reatores a Água Pressurizada) são dotadas de sistema que desenvolvem algumas funções de segurança, de limitação e de controle. Fazem as variáveis tais como: pressão, temperatura, vazão, taxa de fissão, garantirem a operação segura, bem como a disponibilidade. A usina utilizada neste estudo possui as funções mencionadas acima.

Na usina em questão, no caso de perda de uma bomba de Água de Refrigeração Principal, caso ação manual não seja feita, e estando todos os controles da turbina e do reator ligados, para se atingir um maior torque na turbina, as válvulas governadoras da turbina irão abrir automaticamente em resposta ao controle da turbina. Isto fará a pressão do vapor principal diminuir rápida e gradativamente. A usina que fez parte desta dissertação, possui um controle de pressão mínima de vapor principal e o mesmo pode ser sensibilizado, minimizando a queda da pressão de vapor principal e o resfriamento imposto ao primário. Como o circuito secundário está acoplado (via GV's) termodinamicamente ao circuito primário, este irá sentir seus efeitos, pois ao cair a pressão do vapor principal, por causa da maior abertura da válvula governadora, a pressão no gerador de vapor cairá também. O gerador de vapor tem em seu interior água e vapor em meio saturado, quando a sua pressão cair devido a abertura da válvula governadora da turbina, cairá a sua temperatura também (TOMALSQUIM, 2016). Esta influenciará na temperatura de entrada do reator, que irá reduzir a temperatura média, ou seja, irá causar um resfriamento no reator. Isto por si só insere reatividade positiva no reator e fará a potência do reator ir além de 100%. O controle de temperatura média percebe que a temperatura diminuiu, e a mesma deve ficar constante no valor de referência estabelecido para a operação a plena carga (308,5<sup>o</sup>C na usina deste estudo). Com isso este controle também dará comando para as barras de controle extraírem do núcleo a fim de elevar novamente o valor da temperatura média para o valor de referência. Isto também irá contribuir para que o reator opere numa potência maior que 100%. Considerando que nenhuma ação manual da sala de controle será feita, o sistema de limitação toma ações no sentido da segurança, e em 103% promove de forma

automática comandos de inserção de barra de controle, reduzindo a potência do reator novamente para abaixo de 100%.

Em vista de tudo isto, quando uma bomba da água de refrigeração principal é desligada de forma não programada, as ações dos operadores de sala de controle são a de iniciar a redução de potência imediatamente para algo em torno de 1270MW (~90% potência do reator), a fim de compatibilizar a perda de eficiência nos condensadores, causada pelo desligamento não programado de uma bomba da água de refrigeração principal.

Desta forma, o que se deseja evitar é que uma simples manobra de comutação de bomba de óleo, se feita erroneamente, cause um transiente desta magnitude na usina.

Existe o risco ainda de um desligamento não programado da unidade, caso um mesmo condensador perca suas duas bombas de água de refrigeração principal. Isso ocorre quando uma bomba da água de refrigeração principal está em manutenção e existe necessidade de trocar a bomba de óleo da bomba da água de refrigeração principal adjacente, ou seja, as duas bombas de água de refrigeração principal podem ficar desligadas. Nesta situação a usina já se encontrava em no máximo 90% de potência no reator ou 1270MW. Neste caso de desligamento da segunda bomba da água de refrigeração principal do mesmo condensador, causará rapidamente uma piora significativa na eficiência do condensador, com sensível degradação no vácuo do mesmo, fazendo com que a pressão em seu interior suba rapidamente. Então o sistema de controle da turbina de forma protetiva, ativa de forma automática o desligamento rápido da turbina pelo critério de alta pressão no condensador no valor máximo de 0,6 bar. O Sistema de Desvio de Vapor deveria entrar em operação de forma automática, abrindo suas válvulas, de forma a aliviar e controlar a pressão de vapor principal no valor de 80 bar. Entretanto, nesta situação, o mesmo também não irá abrir suas válvulas e controlar a pressão em 80 bar, pois utiliza o condensador, que está indisponível devido sua pressão alta. Assim, a pressão de vapor principal, por não ter um caminho que promova a sua redução e controle, irá aumentar até atingir o valor de 85 bar. Este é um dos critérios de desligamento rápido do reator. Desta forma é gerado automaticamente um sinal que irá enviar comando simultâneo para a queda de todas as barras de controle e abertura das válvulas de alívio dos GV. As barras de controle, que antes estavam na parte superior do núcleo (extraídas), irão atingir o fundo do vaso do reator em até 3 segundos, ou seja, ficarão totalmente inseridas no núcleo. Desta forma promovem uma grande captura de nêutrons e cessam a reação nuclear, tendo como resultado o desligamento do reator de forma rápida. Já no lado secundário, conforme dito anteriormente, este mesmo sinal de pressão de vapor principal maior que 85 bar, irá promover a abertura e controle das válvulas de alívio para a atmosfera, realizando de forma automática um resfriamento parcial de 85 bar para

74 bar, a uma taxa de 100 k/h, realizando o controle da pressão do vapor principal em 74 bar. A usina é então estabilizada neste patamar com Reator desligado, todas as barras de controle inseridas até o fundo do vaso de proteção do reator e remoção de calor via válvulas de alívio do gerador de vapor.

De acordo com a norma CNEN 1.14 - RELATÓRIOS DE OPERAÇÃO DE USINAS NUCLEOELÉTRICAS, resolução CNEN16/01 de janeiro de 2002, estes eventos devem compor parte dos Relatórios Mensal e Anual. Sendo assim, transientes desta natureza impactam diretamente nos relatórios de operação de usinas nucleares. Para entender o impacto de qualquer redução não programada de potência é necessário a compreensão de alguns itens da norma CNEN 1.14. O objetivo desta norma é descrito da seguinte forma:

1.1 Esta norma tem por objetivo estabelecer os requisitos do programa de notificações de eventos significativos e dos relatórios de operação de usinas nucleoeletricas exigidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). (CNEN 1.14, 2002, p.3).

Apesar do objeto desta dissertação não produzir uma notificação de evento significativo, ele impacta diretamente no relatório de operação, logo é necessário a compreensão de alguns conceitos e definições previstos em norma, tais como:

18)- Evento operacional (ou simplesmente evento) - uma falha ou uma seqüência de falhas relacionadas entre si. [...] 36) Redução forçada de potência - redução de potência elétrica da usina após a ocorrência de um evento, redução essa necessária para adoção de ação corretiva conseqüente desse evento. Entende-se por redução forçada de potência não apenas aquela que ocorre imediatamente mas também aquela que ocorre até o fim da semana seguinte à ocorrência do evento. Esta definição não inclui as reduções de potência necessárias para manutenção preventiva de rotina e atividades de calibração. 37)- Relatório Anual de Operação (RAO) - relatório rotineiro, abrangendo a operação da usina durante o ano civil recém-findo.” (CNEN 1.14, 2002, p.5-6).

No Relatório Anual de Operações deve constar “b) informações que descrevam, de forma completa, cada paralisação forçada ou redução forçada de potência, incluindo: i) causas prováveis, sistemas e componentes envolvidos” (CNEN 1.14, 2002, p.8).

Assim, a redução ou desligamento forçados pela perda da bomba da água de alimentação principal impacta no RMO, que por conseguinte impactará no RAO. O RMO refere-se ao “Relatório Mensal de Operação (RMO) - relatório rotineiro de operação, abrangendo a operação da usina durante o mês civil recém-findo. (CNEN 1.14, 2002, p.6).

Ainda no RMO deve constar, conforme item “d) reduções da potência e desligamentos ocorridos na unidade; taxa de paralisação e desligamentos programados para o semestre que se segue” (CNEN 1.14, 2002, p.8).

Neste contexto, a redução provocada pela perda do sistema de óleo e conseqüentemente da bomba da água de refrigeração principal, se encaixa.

As usinas nucleares brasileiras, assim como outras do mundo, têm na sua política de gestão integrada de segurança itens como Treinamento e Melhoria Contínua conforme descrito logo abaixo:

O treinamento para qualificação dos empregados e prestadores de serviço deverá assegurar os conhecimentos relativos aos diversos aspectos da segurança integrada necessários à execução adequada de seus trabalhos; A Empresa deve buscar o contínuo aperfeiçoamento de suas práticas relacionadas com a Gestão Integrada da Segurança. (ELETRONUCLEAR, 2021).

Sendo assim, é de grande importância promover treinamentos que assegurem conhecimentos relativos aos diversos aspectos da segurança, assim como promover uma busca contínua para aprimoramento de treinamentos existentes e promoção de outros tão eficientes quanto os que são praticados atualmente (IAEA, 2019).

Com a realidade virtual podemos reproduzir sistemas e manobras que impactam na usina, simulando situações tantas vezes quanto forem necessárias, sem causar nenhum transiente de fato na planta, exposição ao trabalho ou público em geral. Os treinamentos utilizando realidade virtual podem ser um poderoso aliado na colaboração da manutenção da alta segurança que existe nas usinas nucleares, em especial nas brasileiras.

Desta forma, o painel do sistema de óleo das bombas da água de refrigeração principal foi escolhido para ser representado no ambiente virtual, pois de certa forma impacta o reator, mesmo estando numa parte convencional. Vale ressaltar que as bombas mais importantes da usina também possuem sistemas de óleo que cumprem as mesmas funções do citado anteriormente, porém sua lógica de atuação é bem diferente: são as Bombas de Refrigeração do Reator - BRR. Elas são responsáveis pela circulação forçada de água através do núcleo, transportando o calor para a fonte fria, o gerador de vapor. Os cuidados e desafios são os mesmos para ambos os sistemas, porém a dinâmica do comportamento na planta em caso de falha muda. Esta bomba afeta diretamente o reator e por isso ações severas e rápidas são tomadas de forma automática no caso da perda de uma ou mais BRR's.

A escolha de simulação virtual do sistema de óleo da Bomba da Água de Refrigeração Principal se deve ao fato do mesmo contemplar o que se deseja observar em simulador, conforme a norma CNEN1.01 Licenciamento de Operadores de Reatores Nucleares, (FIGURA 1), que foi utilizado como fonte de consulta e pode ser utilizado para qualquer sistema. O treinamento em simulador é fundamental para garantir a segurança e confiabilidade das usinas nucleares (IAEA, 2019).

Anexo IV

Níveis de Evolução de um Cenário para Exames de Simulador de OSR

<b>1. Alarmes e Anunciadores</b> a. Notar e reconhecer b. Interpretar/verificar c. Priorizar
<b>2. Diagnóstico</b> a. Reconhecer b. Acurácia (precisão) c. Diagnosticar d. Resposta do turno
<b>3. Respostas do sistema</b> a. Interpretar b. Estar atento c. Efeitos das ações
<b>4. Procedimentos</b> a. Referências b. Uso correto c. Implementação pelo turno
<b>5. Operações no painel de controle</b> a. Localizar b. Manipular c. Resposta d. Controle manual
<b>6. Comunicações</b> a. Clareza b. Turno informado c. Receber informações
<b>7. Direção das operações</b> a. Ação em tempo (dentro do prazo) b. Orientações seguras c. Visão geral e supervisão d. Realimentação da equipe
<b>8. Especificação Técnica</b> a. Reconhecer b. Localizar c. Conformidade

**Exceção:** Item 5. Não será requerida a demonstração de habilidade como OR quando o candidato a uma licença de OSR já possuir uma licença de OR.

**Figura 1:** Anexo IV Norma CNEN 1.01

**Fonte:** CNEN 1.01 (2014)

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Apesar do acidente de Fukushima ter sido um grande fator negativo para a indústria nuclear, muitos aprendizados foram adquiridos e incorporados nas usinas em operação e nas que estão em construção. Em virtude deste acidente foi aumentada ainda mais, a segurança em usinas nucleares. Diferentes reações ocorreram de país para país. Por exemplo, a Alemanha optou por reduzir o uso da energia nuclear (PORTUGAL, 2017), mas poucos países seguiram esta linha de pensamento. A Bélgica por outro lado, que inicialmente decidiu não fazer a extensão de vida de suas usinas nucleares, voltou atrás em sua decisão, definindo uma estratégia para aumentar a vida útil das suas usinas nucleares (PETRONOTICIAS, 2019).

Apesar deste sério acidente sem precedentes na história, um crescimento e necessidade pela energia nuclear ainda é observado.

De acordo com os dados do relatório Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, da International Atomic Energy Agency (IAEA, 2019), haviam 450 reatores de energia nuclear em operação no mundo no final de 2018, com uma capacidade total instalada de 396 GW e ainda 55 novas usinas nucleares com capacidade total de 57 GW estavam em construção. Durante o ano de 2018, nove novos reatores de energia nuclear com capacidade total de 10.358 MW foram conectados à rede e sete reatores com capacidade total de 5424 MW foram retirados. Em 2018, começaram as obras de cinco novas usinas nucleares, as quais deverão adicionar uma capacidade total de 6.339 MW. A geração de eletricidade a partir de reatores nucleares operacionais aumentou cerca de 2,4% em 2018, atingindo 2563 TWh. A energia nuclear representou cerca de 10% da produção total de eletricidade em 2018 (IAEA, 2019).

Segundo este mesmo documento, dentre as usinas em operação, segundo dados da IAEA de dezembro de 2018, a maioria (298 construídas) são usinas que utilizavam reatores do tipo Pressurized Water Reactor – PWR.

Conforme o relatório Electricity Information, publicado pela International Energy Agency em 2018 (IAEA, 2019), os reatores nucleares contribuíram com 10,4% da produção de energia elétrica no planeta. Já as usinas térmicas convencionais, são as que mais contribuíram, com 65,1% da geração total. As usinas hidrelétricas contribuíram com 16,6%. E a geração de energia por fontes renováveis (eólicas, fotovoltaicas e etc.) totalizaram 5,6% (IAEA, 2019).



O consumo mundial de energia deve aumentar em 16% até 2030 e em 38% até 2050, a uma taxa de crescimento anual de cerca de 1%. O consumo de eletricidade aumentará a uma taxa mais alta de cerca de 2,2% ao ano até 2030 e cerca de 2% ao ano posteriormente. A participação da eletricidade no consumo final total de energia aumentará de 18,8% em 2018 para 21% em 2030 e para 26% em meados do século (IAEA, 2019).

Uma grande quantidade de plantas nucleares em operação no mundo tem aproximadamente 25 a 40 anos de operação, e com as renovações de suas licenças, essas instalações poderão ter suas vidas estendidas por até mais 35 anos, ou seja, as usinas poderão operar por até 75 anos em muitos casos (AVELAR, 2008).

No Brasil as usinas em operação são do tipo PWR e também se encontram em andamento estudos para o alongamento da vida útil de ambas, e assim como no restante do mundo, também desempenham um papel importante na matriz energética contribuindo para estabilidade e robustez de um sistema elétrico, o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). Segundo o relatório “ONS NT-0105/2017- Impactos da suspensão da operação das UTNs Angra 1 e Angra 2 em 2019”, de outubro de 2017, elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, o mesmo afirma que a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) tem, característica de capacidade instalada, previsão de alta disponibilidade e elevada confiabilidade. Isto torna a CNAAA um dos principais recursos para atendimento à carga do subsistema Sudeste/Centro-Oeste e do SIN, mesmo se avaliar isoladamente Angra 1 e Angra 2. Como estas usinas enviam sua produção de energia elétrica diretamente no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, que é a maior carga do SIN, contribui para evitar congestionamentos nas interligações entre subsistemas. Estas usinas são fontes preferenciais para despacho, seja por mérito econômico ou por razões de segurança eletroenergética, devido aos seus baixos custos unitários variáveis previstas e as características operativas de baixa flexibilidade. A operação da CNAAA durante um mês corresponde a 0,9% da energia armazenável máxima do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, o que corresponde a um acréscimo de 10,3% da energia armazenável máxima deste subsistema anualmente. Além disso, para garantir o atendimento ao critério diferenciado, de perda dupla, utilizado em eventos especiais, é necessária a presença de Angra 1 e Angra 2. A indisponibilidade dessas usinas irá exigir um despacho, de aproximadamente 400 MW, na área Rio de Janeiro.

Então é possível afirmar que a CNAAA tem papel fundamental no atendimento de energia elétrica no subsistema Sudeste/Centro-Oeste e ao SIN.

Um índice de capacidade de disponibilidade alto, na ordem de 90 % e uma participação na matriz energética com algo em torno 2000MW, correspondente a cerca de 3% da geração total

do país (IPDO-ONS, 2020), são fatos altamente relevantes para que ocorra uma operação eficiente de uma usina nuclear. Uma operação eficiente é de suma importância para qualquer sistema elétrico. Grandes variações de potência não programadas devem ser evitadas sempre que possível, para que não desestabilize o sistema elétrico e outras ações necessitem ser demandadas para amortecer o transiente que será causado.

As usinas nucleares fazem parte das indústrias complexas, e de forma geral se caracterizam por seus elevados níveis de segurança e disponibilidade (AVELLAR, 2008). Nestas duas características, está intrinsecamente ligado o projeto da usina, o qual é composto de vários materiais e sistemas específicos, conforme descrito no FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT – FSAR revisão 13 de abril de 2018. Entretanto, uma grande parte destas características é influenciada, positivamente ou negativamente, pelo fator humano, ou seja, pelo seu corpo técnico. O fator humano é tão importante que nesta revisão 13 do FSAR, foi incluído todo um capítulo sobre a Engenharia de Fatores Humanos (EFH). Pessoas competentes e comprometidas com uma cultura de segurança é fundamental, assim como, pessoal altamente treinado e retreinado, também é um fator primordial para manter a segurança e a disponibilidade da planta.

É importante ressaltar que os aspectos de EFH não são inerentes apenas aos projetos de Interface Homem Máquina e das salas de controle, mas em todas as partes da planta onde houver atividades executadas por pessoas ou onde elas forem especificadas (AVELLAR, 2018, p.8).

Treinar significa realizar atividades que produzam sedimentação de conhecimentos específicos, habilidades e comportamentos necessários ao desenvolvimento de atividades específicas, de acordo com normas internas ou externas (NETTO, 2014).

Durante o treinamento o objetivo central é condicionar o treinando a realizar tarefas de forma sistemática, ou seja, deseja-se intensificar os reflexos para execução da atividade de forma eficaz.

Em determinados treinamentos é necessário que o treinando experimente emoções, pois estas são poderosas aliadas no treinamento do ser humano (FONTEBASSI, 2019).

Weisinger (2001) afirma que, as emoções são poderosas. As emoções guiam o ser humano quando enfrenta desafios, provações e tarefas. Situações de medo, dor, perigo, perda, a persistência em uma meta ou ideal, as mudanças, enfim, exigem que as emoções se manifestem ativamente. O ser humano tem uma tendência, baseada na aprendizagem com as experiências passadas, de repetir determinados padrões de reações que “deram certo no passado” e que se incorporaram, assim, ao nosso repertório ou bagagem emocional (GOLEMAN, 1995). Cada uma das emoções, favoráveis ou desfavoráveis, imprime uma disposição e uma direção para a ação (FONTEBASSI., 2019, p.16).

Certas tarefas nas atividades profissionais fazem com que os indivíduos as classifiquem como sendo ou não de risco, devemos esclarecer todas as dúvidas possíveis afim de eliminar ao máximo todos os riscos (FONTEBASSI, 2019).

Experiências mundiais não faltam sobre o quanto um pessoal bem treinado ou não, influenciam na segurança e disponibilidade de usinas. O acidente de TMI nos demonstra isso, como a falta de conhecimento e treinamento no comportamento termo hidráulico no núcleo. No evento em questão, os operadores ignoravam que a formação de vapor no Vaso do Reator faria com que a indicação de nível alto no pressurizador fosse enganosa e foram levados a acreditar que o sistema primário estava “se tornando sólido” (isto é, nenhuma fase de vapor dentro do PZR) (KEMENY, 1979). A lição aprendida deste acidente foi que uma sólida fundamentação teórica com conhecimento do comportamento funcional esperado, como a termo hidráulica envolvida no processo, poderia prevenir a ocorrência de eventos semelhantes (KEMENY, 1979).

Por característica de projeto, a disponibilidade de uma usina nuclear é alta pois não depende exclusivamente do clima de onde se encontra (desde que não ocorram desastres naturais) além de não produzir gases de emissão do efeito estufa, ou seja, não interfere no clima (TIRONE, 2018). A comutação ou manobra errônea de um equipamento pode conduzir a usina a uma redução de potência ou mesmo desligá-la. Particularmente as bombas de óleo do sistema de água de refrigeração principal, se comutadas erroneamente ou no caso de falha da bomba de óleo em serviços, sem a partida da bomba reserva, afetará a disponibilidade da usina e causará uma redução rápida de potência não programada ou até mesmo um desligamento, dependendo da configuração das bombas de água de refrigeração principal e da potência que a usina se encontra.

Neste contexto, o problema é a dificuldade de promover um treinamento que seja realista e significativo, para a operação de comutação de bombas de óleo do sistema de água de refrigeração principal. Dessa forma, o desafio é proporcionar um treinamento com um significado realístico para o operador.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta dissertação é criar uma ferramenta virtual para promover o treinamento de operadores de uma usina nuclear na tarefa de operação das bombas de óleo do sistema ARP, sem comprometer o funcionamento da usina, de forma significativa e próximo da realidade, por meio da Realidade Virtual.

### 1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO

1. Definir as principais operações a serem realizadas nas bombas de óleo do sistema ARP.
2. Definir o detalhamento da especificidade do componente e as operações.
3. Desenvolver um ambiente virtual (simulador) para treinamento interativo que permita ao profissional realizar todas as manobras previstas de serem executadas no painel das bombas de óleo dos sistemas de água de refrigeração principal.

## CAPÍTULO 2

### 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica do trabalho, cujo objetivo é delinear os conceitos necessários para entendimento das teorias e abordagens desta dissertação.

#### 2.1 REALIDADE VIRTUAL PARA TREINAMENTO

A Realidade Virtual (RV) vem sendo usada para diversos ramos de trabalho tais como, aviação, medicina, indústrias e etc. Essa tecnologia deixou de ser exclusiva para jogos e entretenimento e nos últimos anos passou a ser utilizada fortemente no mercado de trabalho como ferramenta que aprimora técnicas e processos dos diversos ramos.

Existe um grande desafio do setor nuclear brasileiro que é a de manter o conhecimento e a experiência técnica uma vez que a média de idade do setor nuclear é alta (PASTURA et. al., 2017). A necessidade de produzir um pessoal novo e qualificado de forma eficaz se mostra urgente. Uma das formas para auxiliar a vencer este desafio é o uso da RV. Conforme assinalado por Pastura et al (2017), “essa meta pode ser alcançada com a criação de um programa de educação permanente para utilizar o conhecimento, criar um ambiente propício ao aprendizado” (p.4.).

Assim, a RV pode ser uma grande aliada, pois podemos incorporar experiências vividas por pessoas experientes, e reproduzi-las de forma realística para os menos experientes.

O uso da Realidade Virtual no Planejamento de Repositórios de Rejeitos Radioativos disponibilizou uma ferramenta que pode auxiliar no planejamento e determinação da localização de uma instalação nuclear através de ambiente virtual (CHELLES, 2017). Tal ferramenta visa auxiliar na elaboração do Repositório Nacional para rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação, promovendo uma interação do usuário no ambiente da instalação nuclear, permitindo que o mesmo ande de forma virtual e conheça a instalação. Com isto, é possível observar detalhes e fazer inclusive possíveis correções ou melhorias físicas ou de procedimentos envolvidos na instalação, sem a mesma estar concluída. Exemplo disto é

avaliar as possibilidades de qual será a melhor rota para evacuação e contramedidas necessárias em caso de necessidade (CHELLES, 2017).

Outro trabalho, *Avaliação do Desempenho de Operadores no Treinamento da Operação de Sistemas Elétricos em Ambientes Simulados* teve como objetivo:

Pesquisar as ferramentas e métodos utilizados na avaliação de treinamentos realizados em simuladores, visando propor alternativas que poderiam resultar no aumento da eficiência desses treinamentos na operação de sistemas elétricos (NETTO, 2014, p.17).

Este trabalho proporcionou criar situações específicas para avaliar e orientar o operador em manobras rotineiras e de emergência de um sistema elétrico, e assim mensurar a qualidade do treinamento. Neste trabalho, no treinamento virtual, o objetivo foi identificar a eficiência e eficácia com que a tarefa foi realizada pelo operador.

O autor do trabalho cita, por exemplo, que, o operador pode ser eficaz, por que identificou um problema e o corrigiu, mas pode não ter sido eficiente, pois demandou tempo demais na identificação e aplicação da solução do problema, isto poderia ultrapassar o tempo previsto.

O artigo na revista IEEE Latin, *Treinamento de Montagem e Manutenção em uma Unidade Hidrelétrica de Energia usando Realidade Virtual Não Imersiva* (SOUSA et. al., 2008), destaca a importância do treinamento em realidade virtual que pode impactar diretamente na qualidade da geração de energia elétrica e no risco operacional. Destaca ainda a importância da retenção de habilidade espacial sobre tarefas de montagens e que esta retenção é maior quando do uso da Realidade Virtual em comparação aos meios tradicionais, principalmente quando envolve um certo período de tempo após o treinamento e afirma que nos últimos anos, a área de Manutenção e Treinamento industrial vem sendo objeto de estudo em diversos trabalhos envolvendo RV, por ter um grande potencial no setor de treinamento oferecendo um meio em que as exigências de treinamento e necessidade específicas possam ser integradas em um único ambiente. Apresenta também um estudo de caso da usina Hidrelétrica de Tucuruí, onde foi implementado treinamento em ambiente virtual, sendo dividido em três cursos: Curso um de componentes da Usina Hidrelétrica (UHE) que proporciona visualização e estudo das seções constituintes de uma UHE. Curso dois é o de montagem, onde apresenta uma sequência de montagem a ser obedecida conforme a sequência real da usina. Curso três é sobre manutenção, onde é feito um treinamento baseado na aprendizagem *learning by doing*, onde existem etapas para o treinamento (SOUSA et al.,2008).

Algumas usinas nucleares ao redor do mundo, já estão utilizando a realidade virtual como ferramenta para treinamentos de seus operadores há alguns anos. Um artigo Russo-Norueguês,

publicado na IAEA, RBMK Full Scope Simulator Gets Virtual Refuelling Machine (KHOUDIAKOV et al., 2006), abordou esse assunto. O Simulador RBMK de escopo total para treinamento do pessoal da sala de controle, ganhou um simulador virtual da Máquina de Reabastecimento de Combustível. Eles conectaram o simulador de escopo total com o simulador virtual da máquina de reabastecimento e isto possibilitou a realização de treinamento de toda a equipe, de forma dinâmica e em tempo real, com simulação de todas as possíveis interações físicas entre o núcleo do reator, canal de combustível, módulo de combustível, entre outros. A equipe de operadores da sala de controle treina em conjunto com as equipes de operadores de campo, em manobras que afetam ambas, como a descrita nesta dissertação. Este tipo de treinamento também foi desenvolvido em Helsinki, Finlândia, no Finnish Institute of Occupational Health e VTT Technical Research Centre of Finland, onde todos os cenários exigiam algumas operações manuais no campo e até certo grau de colaboração entre o operador de campo e a sala de controle (SATO et al., 2021). A fidelidade funcional e física (como captura do som ambiente), promovem um grau de realismo, o que foi buscado nesta dissertação. Ambos os países (Noruega e Finlândia) desenvolvem treinamentos de forma integrada com o uso de realidade virtual para seus operadores. O treinamento ocorre com a equipe de operadores licenciados no simulador da sala de controle e a equipe de operadores não licenciados no ambiente virtual, de forma dinâmica e junta para estas duas equipes, de maneira que o ambiente virtual recebe e envia informações para o simulador da sala de controle. Esta é uma excelente forma de treinar as equipes de licenciados (operadores de sala de controle) e não licenciados (operadores de campo) para situações raras e até severas (fogo, fumaça, radiação, terremoto etc.) que podem nunca ocorrer na planta. Mas que se ocorrerem, toda a equipe deve estar preparada da melhor forma possível. Os operadores podem ser capazes de realizar ações no ambiente virtual ao invés de observar situações reais de manobras raras ou de suposições de treinamentos convencionais de eventos mais severos. Essas duas situações são inviáveis de serem treinadas ou vividas de forma prática, pois ambas precisam ocorrer de fato.

Manobras infrequentes que só são realizadas por alguns profissionais e em certas situações operacionais, reduzem o número de pessoas com expertise em certas tarefas e aumenta o tempo para criar novas pessoas com a mesma expertise. Desta forma um treinamento sistemático e significativo é necessário para várias profissões, como por exemplo pilotos de avião e cirurgiões, onde seus erros trazem risco a segurança de pessoas e graves consequências. Ambos treinam até demonstrarem o completo domínio das suas atividades, reforçando obviamente, as situações mais críticas. Esta habilidade pode ser reforçada ou consolidada através da RV (NETTO, 2014). No caso dos operadores de usinas nucleares, estes são responsáveis pela

operação da planta, e seus erros podem ocasionar risco a segurança da usina, risco a vida de pessoas além de prejuízos financeiros. No Brasil, no caso de pilotos de aeronaves e cirurgias a realidade virtual é usada rotineiramente para melhorar o treinamento. Em usinas nucleares, existe um grande potencial a ser explorado em nosso país.

A grande vantagem em usar a realidade virtual para promoção de treinamentos se deve principalmente a três aspectos básicos

- Imersão: A ideia de imersão está ligada com o sentimento de estar dentro do ambiente, além do fator visual, os dispositivos ligados com os outros sentidos também são importantes para o sentimento de imersão, como som, posicionamento automático da pessoa e dos movimentos da cabeça, controles reativos, etc. (ASSIS, 2020).

- Interatividade: A ideia de interação está ligada com a capacidade do computador detectar as entradas do usuário e modificar instantaneamente o mundo virtual e as ações sobre ele (capacidade reativa). As pessoas gostam de ficar cativadas por uma boa simulação e de ver as cenas mudarem em resposta aos seus comandos. Esta é a característica mais marcante nos videogames (ASSIS, 2020).

- Envolvimento: A ideia de envolvimento, por sua vez, está ligada com o grau de motivação para o engajamento de uma pessoa com determinada atividade. O envolvimento pode ser passivo, como ler um livro ou assistir televisão, ou ativo, ao participar de um jogo com algum parceiro. A realidade virtual tem potencial para os dois tipos de envolvimento ao permitir a exploração de um ambiente virtual e ao propiciar a interação do usuário com um mundo virtual dinâmico (ASSIS, 2020).

Através de um ambiente de realidade virtual, onde pode ser reproduzido o ruído característico do ambiente, bem como as dificuldades ergonômicas, é possível reforçar, além da parte técnica, a utilização das ferramentas de prevenção de erros amplamente divulgadas na indústria nuclear.

A criação de um ambiente de realidade virtual para treinamento em sistemas de usinas nucleares brasileiras pode ser uma ótima opção para aprimoramento e produção de treinamentos de diversos profissionais, principalmente no reforço da experiência operacional, que é uma das ferramentas de prevenção de erro.



## 2.2 DISPONIBILIDADE DE UMA USINA NUCLEAR

A disponibilidade de uma usina nuclear depende das reservas e consumo de urânio, do tempo de operação das usinas e regime operativo (fator de capacidade das usinas). Como todos estes fatores são conhecidos e estimados com certa exatidão, a disponibilidade de uma usina nuclear é alta (TOMALSQUIM, 2016).

A disponibilidade de uma usina também está relacionada a capacidade técnica de seu pessoal (AVELLAR, 2018). Treinamentos impactam diretamente na operabilidade segura da planta. Um treinamento em realidade virtual com equipamentos que afetam a segurança e/ou a disponibilidade da planta, obviamente estarão contribuindo para manter em altos padrões tanto a segurança, quanto a disponibilidade. Se uma manobra for feita errada, ocorrerá, no mínimo uma redução de carga não programada. O treinamento em RV pode colaborar em manter alta esta disponibilidade, assim como a segurança.

## 2.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica de uma usina nuclear PWR depende da capacidade de transferência da energia (calor) gerada no sistema primário com temperaturas médias elevadas para o secundário (ROCHA, ALVIM, MARTINEZ, 2002). O maior responsável por esta transferência de energia é o GV (SCARPINELLA, 1972). Este por sua vez, transfere esta energia (vapor) para as turbinas, e após o vapor fornecer a energia cinética necessária ao movimento de rotação, ou seja trabalho, o mesmo vapor transfere o restante da energia através da exaustão das turbinas para o condensador, que retorna esta energia para o circuito fechado, cedendo parte do calor na transformação de fase, condensando o vapor d'água na parte externa dos tubos do condensador e retornando a água para seu estado líquido, e a outra parte de calor é cedida para água do mar, na parte interna dos tubos do condensador, promovendo um aumento de temperatura para a fonte fria, que irá desaguar novamente no mar. O vapor que condensou e está no circuito fechado do secundário retorna para os GV's novamente.

É importante destacar que justamente uma falha na manobra de comutação das bombas de óleo do sistema de ARP, que impacta na bomba de água de refrigeração principal (ou água de circulação) vai impactar na verdade o principal equipamento de eficiência térmica da planta, os

condensadores, que no ciclo térmico da usina é o componente que mais influencia a eficiência térmica da usina que é a fonte fria. No ciclo de Rankine a fonte fria é o principal parâmetro para impactar a eficiência da planta. A ferramenta virtual para treinamento desta dissertação é muito importante, pois vai impactar não só na eficiência da planta, como vai de encontro ao que outros países já identificaram como uma excelente ferramenta para treinar.

#### 2.4 SISTEMA DE CONTROLE DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU

O controle do reator pode ser realizado segundo dois princípios, controlar o fluxo neutrônico ou controlar a temperatura média. Com o controle de fluxo neutrônico conectado, o valor desejado de potência do reator é ajustado manualmente no controle do reator e a potência do turbo-gerador segue a do reator (turbina segue o reator).

Com o controle de temperatura média conectado, a demanda de potência é ajustada diretamente no controle do turbo gerador. Conseqüentemente, uma variação de potência no turbo-gerador acarreta mudança nas temperaturas do refrigerante no sistema primário e variação, no mesmo sentido, da potência do reator. A adequação às novas condições é feita pelo controle de temperatura média (reator segue a turbina).

O primeiro modo de controle é utilizado, normalmente, abaixo de 25% de potência no reator, durante as partidas e paradas da usina, enquanto o segundo modo é utilizado em operação normal, acima de 30%.

Ambos os controles atuam automaticamente sobre as barras de controle do reator.

#### 2.5 SISTEMA DE LIMITAÇÃO DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU

O sistema de limitação aciona contramedidas escalonadas e de intensidade crescente, considerando ocorrências operacionais previstas, maus funcionamentos ou condições de acidentes.

Cada meta de proteção do sistema de limitação é alcançada por uma ou mais funções, atribuída a variáveis monitoradas (potência do reator, temperatura média, posição de barras de

controle, quantidade de BRR's ligadas entre outras) e atuando contramedidas adequadas (inserção ou queda de barras de controle, limitação da potência elétrica entre outras). Este sistema toma ações antes que o sistema de proteção do reator atue. Este sistema visa principalmente a segurança, mas também a disponibilidade da usina

## 2.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO DO REATOR DE UMA USINA PWR-SIEMENS / KWU

O Sistema de Segurança de toda Usina Nuclear tem como objetivo principal proteger a Usina e limitar as consequências para o pessoal e para o ambiente, no caso de maus funcionamentos e acidentes. Ele é composto pelos seguintes elementos principais:

- Sistemas de segurança passivos;
- Sistemas de segurança ativos;
- Sistema de Proteção do Reator;

O Sistema de Proteção do Reator recebe sinais das variáveis do processo, que são tratadas por um sistema de aquisição de dados. Caso os valores limites dessas variáveis sejam atingidos, se inicia o desligamento rápido do reator e/ou a atuação de Sistemas de Segurança Ativos, que fazem parte do Sistema de Segurança da Usina, a fim de controlar uma falha de um equipamento ou um acidente. Desta forma, é assumido que o sistema de controle e o de limitação não foram suficientes para enfrentar o evento que causou a falha.

Este sistema visa exclusivamente a segurança da usina, não visa a disponibilidade, sendo assim, uma vez atingido seus valores limites, ações automáticas no sentido de desligar rapidamente o reator são iniciadas.

## 2.7 SISTEMA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL

Sistema de Água de Refrigeração Principal – ARP (FIGURA 2), compreendem principalmente as tubulações, galerias, painel de comando local, bombas de óleo e bombas usadas para transportar a Água de Refrigeração Principal (água do mar) desde a sua captação, passando pelos Condensadores, até a sua descarga.

Este sistema tem a função de bombear a água do mar através das galerias, tubulações e condensadores, proporcionando nestes a condensação do vapor de exaustão das turbinas e do vapor proveniente da atuação das válvulas do sistema de desvio de vapor, devolvendo a água do mar captada de volta ao oceano.



**Figura 2:** Sistema de Água de Refrigeração Principal – Sala das Bombas

**Fonte:** O autor (2020)

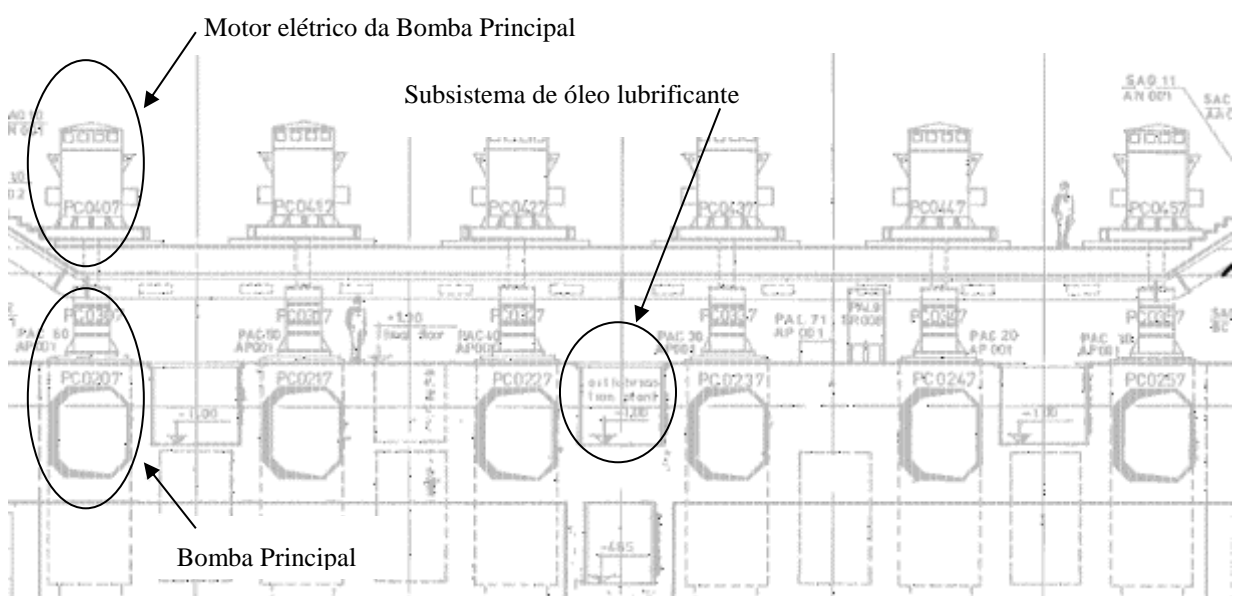
## CAPÍTULO 3

### 3 PARÂMETROS BÁSICOS PARA ESTRUTURA FÍSICA

Afim de descrever os componentes principais de um sistema de água de refrigeração principal necessários para a operação de uma usina e necessários para a reprodução em ambiente virtual, precisamos entender como o mesmo é composto, contribuindo de forma segura e viável para o funcionamento da planta.

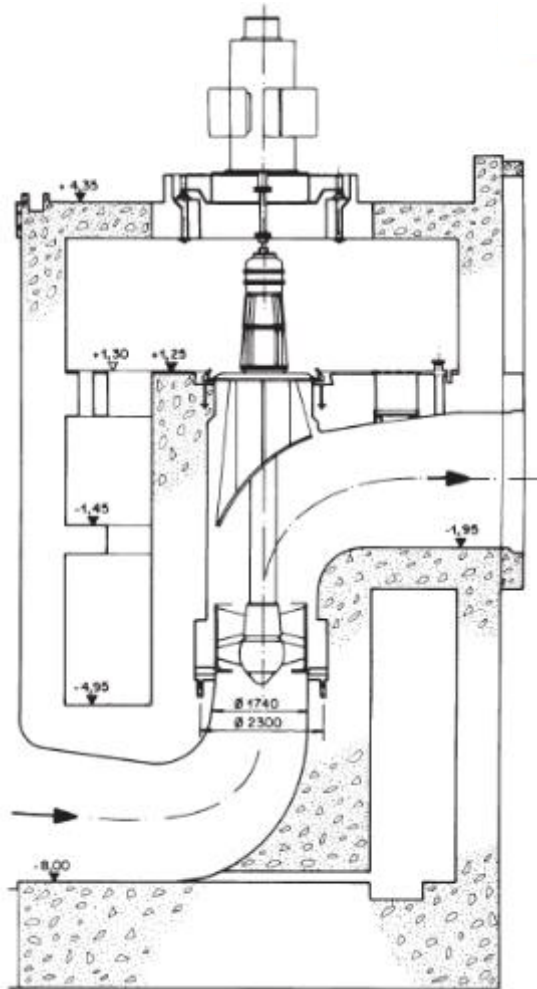
#### 3.1 ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS DO AMBIENTE

Este sistema é composto de seis circuitos totalmente independentes (FIGURA 3), com uma Bomba da Água de Refrigeração Principal ARP (FIGURA 4) e um subsistema de lubrificação de óleo, para cada um dos circuitos. Cada par de Bombas Principal e seu respectivo subsistema de lubrificação de óleo (o qual supre todos os mancais e a caixa redutora de velocidade da bomba principal) alimenta um dos condensadores com água do mar.



**Figura 3:** Sala das Bombas de Água de Refrigeração Principal seis circuitos independentes

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)



**Figura 4:** Arranjo Esquemático da Bomba da água de refrigeração principal

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

As Bombas da Água de Refrigeração Principal possuem cada uma as características descritas na tabela 1.

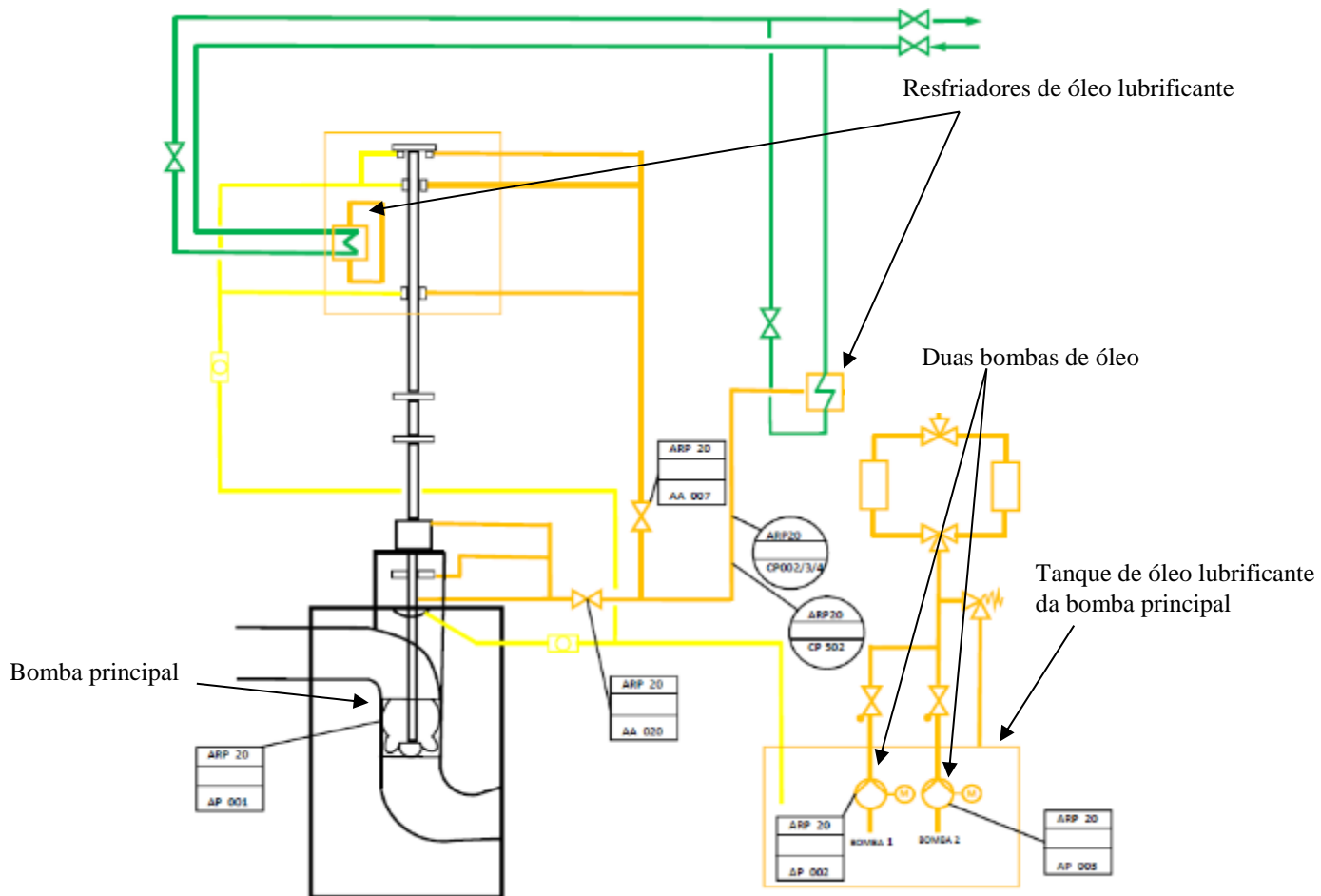
**Tabela 1 - Características da bomba principal**

Vazão de projeto	12.600 kg/s ao nível do mar
Altura de descarga de projeto	11,31 m coluna d'água
Pressão de projeto:	vácuo/3,5 bar
Montagem:	vertical
Potência do motor:	2.000 kW
Voltagem do motor:	13,8 kV

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

Cada um dos subsistemas de lubrificação de óleo consiste principalmente de um tanque, duas bombas de óleo ARP10-60 AP002/003, sendo uma reserva (prontidão), painel de comando

local e instrumentação associada (FIGURA 5). O óleo é resfriado externamente por um Sistema de Refrigeração, por meio de resfriadores de óleo.



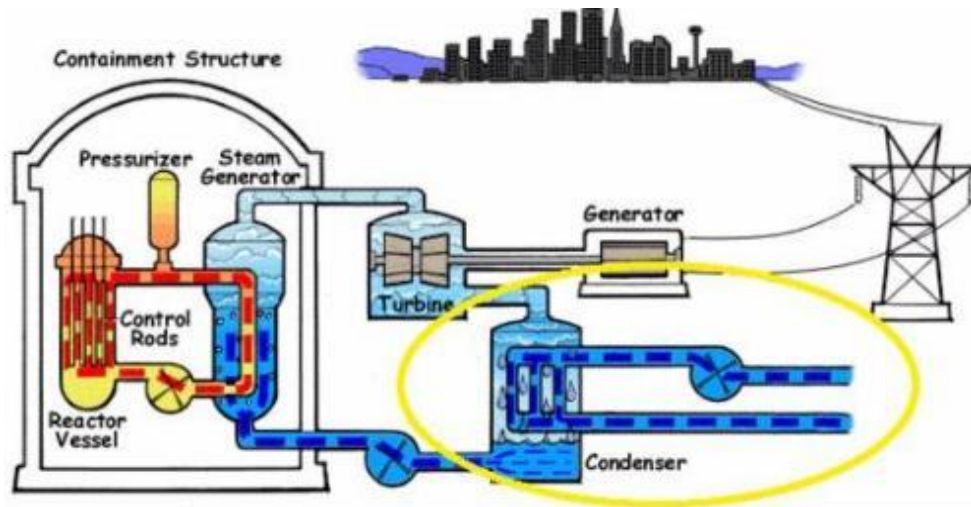
**Figura 5:** Composição de um subsistema de lubrificação de óleo

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

### 3.2 VISUALIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DA IMPORTÂNCIA GLOBAL NA USINA DA BOMBA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL

O sistema de Água de Refrigeração Principal, é um importante sistema para qualquer usina nuclear do tipo PWR. Dependendo da empresa fabricante da usina PWR, este sistema pode ter outro nome, por exemplo Água de Circulação. Independente do nome adotado o importante é cumprir sua função, a de levar fonte fria para os condensadores. Na hipótese de uma falha total

deste sistema, torna-se impossível a usina nuclear cumprir o seu papel final, que é o de gerar energia elétrica de forma limpa.



**Figura 6:** Importância global na usina da bomba da água de refrigeração principal

**Fonte:** Adaptado pelo autor do site What is nuclear (2021), disponível em: <https://whatisnuclear.com/reactors.html>

### 3.3 PERCURSO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL (MAR)

A fonte fria é a água do mar. A mesma é captada de forma submersa em um ponto distante de sua descarga. Esta água é captada através da bomba principal, e descarregada nas galerias e tubulações. Antes de chegar aos condensadores, a mesma passa por uma espécie de filtros. Então, a água do mar percorre os condensadores e novamente encontra tubulações e galerias que a devolvem novamente para o mar, como dito anteriormente, distante do ponto de captação.



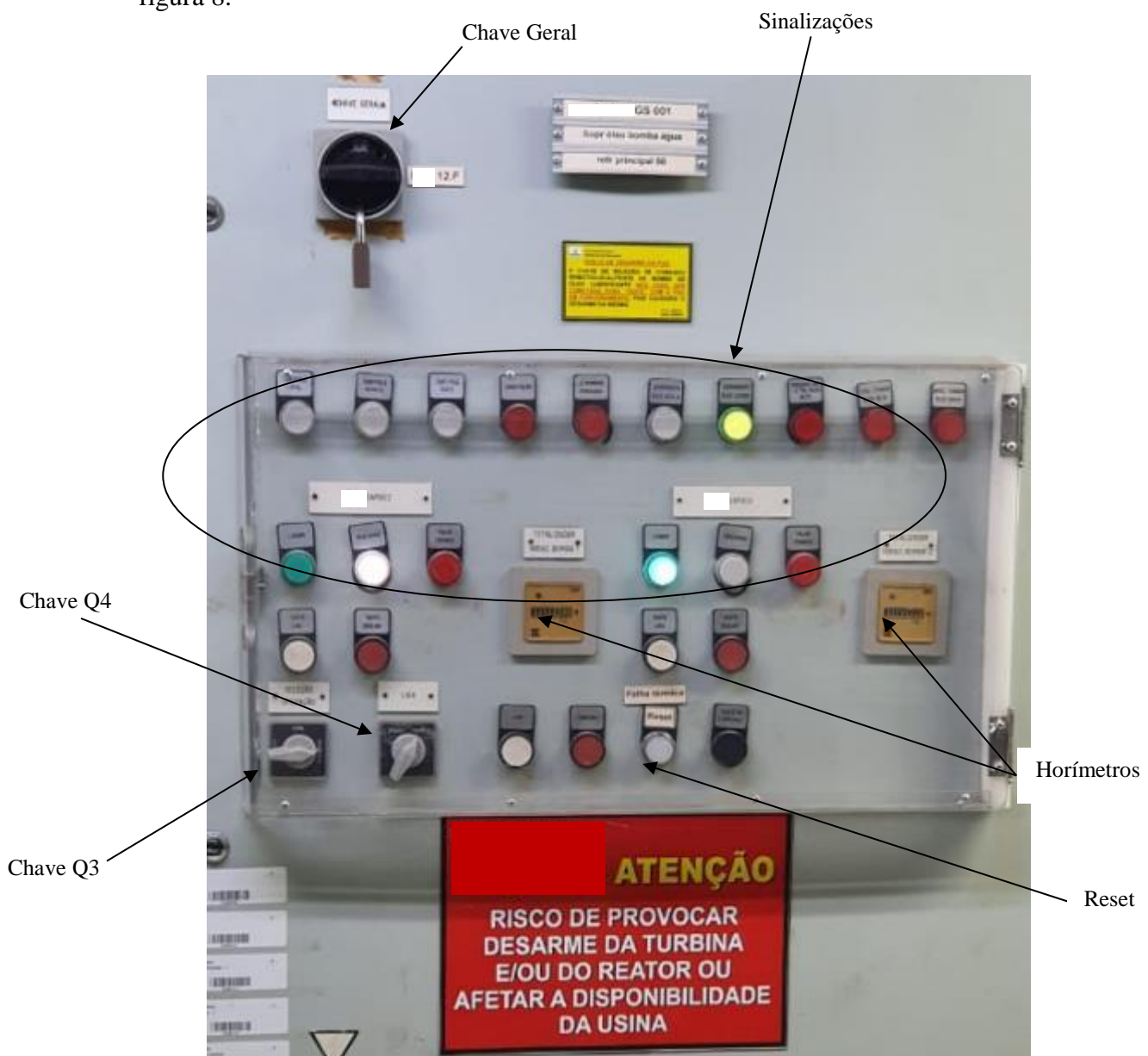
**Figura 7:** Percurso da Água de Refrigeração Principal (mar)

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)



### 3.4 O PAINEL DE COMANDO LOCAL

Este painel é o responsável por enviar comandos para as bombas de óleo da bomba da água de refrigeração principal, desta forma ele concentra toda a operação de partida e parada do sistema de óleo. Toda a sequência lógica de comutação entre as bombas de óleo, fica em seu interior, e assim é proporcionado que essa comutação ocorra de forma automática ou manual. Ficam ainda no interior deste painel toda proteção elétrica do sistema de óleo. Os componentes principais que se localizam neste painel, serão descritos a seguir e estão todos apresentados na figura 8.



**Figura 8:** Indicação dos principais componentes atuados

**Fonte:** O autor (2020)

### **3.4.1 Chave Geral**

É a chave que permite a alimentação elétrica para este painel (FIGURA 8).

### **3.4.2 Chave Q3 - Seleção Operação (Três Posições –Remoto, Local, Teste)**

Na posição REMOTO permite ação local, gera alarmes na sala de controle e permite que a sala de controle desligue o painel local completamente. Atentar para o correto posicionamento desta chave. É especialmente importante na ação de comutar as bombas de óleo com a usina em potência, não manobrar esta chave. Pode ser comutada para a posição local em caso de necessidade. Nunca deve ser comutada para a posição de teste ou local com a bomba principal ligada e a usina em potência, pois causará o desligamento momentâneo do sistema de óleo, isto é suficiente para desligar a bomba principal (FIGURA 8).

Na posição LOCAL permite apenas ação no painel local e não gera alarmes na sala de controle

Na posição TESTE permite vários ensaios no painel de comando local. Só pode ser usada apenas quando a bomba principal estiver desligada.

### **3.4.3 Chave Q4 – Liga (Duas Posições –Bomba 1 ou Bomba 2)**

É a chave que seleciona a bomba que deverá ficar ligada e qual deverá ficar em prontidão. É da máxima importância, após a comutação automática, o correto chaveamento estar de acordo com a bomba que foi ligada. Tal manobra se faz importante pois a prioridade de bomba em operação se dá através desta chave de seleção (FIGURA 8).

#### **3.4.4 Botão Liga /Desliga**

Ao ser acionado liga/desliga a bomba que estiver selecionada na CHAVE Q4 (FIGURA 8).

#### **3.4.5 Botão teste liga/ desliga (seção dos botões da bomba 1)**

Ao ser acionado liga/desliga apenas a bomba 1 (FIGURA 8).

#### **3.4.6 Botão teste liga/desliga (seção dos botões da bomba 2)**

Ao ser acionado liga/desliga apenas a bomba 2 (FIGURA 8).

#### **3.4.7 Botão Reset**

Este botão quando acionado permite o reconhecimento da falha, e após certo tempo presente, após ser acionado promove o rearme da parte lógica das bombas de óleo. Atenção deve ser dada principalmente no momento da manobra de comutação automática. Quando esta ocorrer por baixa eficiência ou falha, o botão RESET só pode ser acionado após a mudança de posição na CHAVE DE SELEÇÃO (CHAVE Q4) para a posição da bomba que estava em prontidão. Então contar o tempo de 1 minuto e assim acionar o botão RESET (FIGURA 8).

#### **3.4.8 Botão teste de lâmpada**

Acende todas as lâmpadas do painel (FIGURA 8).

### **3.4.9 Sinalizações**

Sinalizações de LIGADA, DESLIGADA e FALHA TÉRMICA para bomba 1, refletem o estado que se encontra a bomba 1.

Sinalizações de LIGADA, DESLIGADA e FALHA TÉRMICA para bomba 2, refletem o estado que se encontra a bomba 2.

Sinalização da posição da seleção de operação: CONTROLE LOCAL, CONTROLE REMOTO, CONTROLE TESTE, indica qual seleção de operação está ativa.

Sinalização COMUTAÇÃO; indica que uma comutação das bombas de óleo ocorreu ou está ocorrendo

Sinalização 2 BOMBAS OPERANDO, indica que duas bombas estão ligadas ao mesmo tempo

Sinalização SUPRIMENTO ÓLEO DESLIGADO; informa que nenhuma bomba está funcionando e o sistema está fora de serviço

Sinalização SUPRIMENTO ÓLEO LIGADO; informa que ao menos uma bomba está funcionando e o sistema está em serviço

Sinalização DIFERENCIAL FILTRO DE ÓLEO ALTA, informa que o filtro está sujo e existe impureza no óleo.

Sinalização NÍVEL TANQUE ÓLEO ALTO/ BAIXO, indica que o inventario de óleo está fora da faixa estabelecida (FIGURA 8).

### **3.4.10 Horímetros**

Fornecem a quantidade de horas que as bombas ficaram operando. Começa a contar o tempo assim que a bomba ligada e para de contar o tempo assim que a bomba desliga (FIGURA 8).

Este painel é o posto de trabalho que permite realizar as manobras do sistema de óleo lubrificante da bomba principal. As dimensões físicas do painel são 1,50cmx 80cmx 50cm

(FIGURA 9). O mesmo fica elevado a 30cm do piso e é fixado na parede. Seu cabeamento é pela parte inferior. Possui uma porta onde ficam os botões de acionamento e alarmes. No interior do mesmo encontra-se toda a parte elétrica (contatoras, fusíveis, reles térmicos, etc.). Existe ainda uma tampa transparente de acrílico fixada na porta do painel afim de proteger os botões do painel, de forma a ser uma barreira para impedir que qualquer um opere este painel. Cada botão de acionamento possui cerca de 3cm de diâmetro assim como os alarmes de anúncio. O dois horímetros que atestam a quantidade de horas que as bombas de óleo ficam em operação medem cada um 7cm x 8cm.



**Figura 9:** Painel de comando local

**Fonte:** O autor (2020)

## CAPÍTULO 4

### 4 METODOLOGIA

Afim de definir as principais operações a serem realizadas nas bombas de óleo do sistema ARP no ambiente virtual, alguns documentos importantes precisam ser utilizados, pessoas precisam ser entrevistadas e fotos e vídeos adquiridos. Para este fim serão utilizados o manual de operação do sistema, o system description, a apostila do sistema, o fluxograma do sistema, a folha de lógica, a experiência operacional (interna ou externa), entrevista com operadores e instrutores experientes, pesquisa em campo e avaliação.

O manual de operação do sistema é o documento que contém todas as manobras possíveis bem como as orientações que auxiliam na ocorrência de um evento, contribuindo de forma significativa na tomada de decisão. É este documento que fornece suporte ao pessoal de operação no enfrentamento de problemas ou manobras previstas. Neste documento será obtida a parte de interesse desta dissertação, ou seja, apenas a parte no que diz respeito sobre a comutação das bombas do sistema de óleo de lubrificante do sistema ARP.

O system description é o documento fornecido pelo fabricante da usina e foi usado na fase de projeto e comissionamento da planta. É usado como fonte de consulta para diversas áreas. Possui uma informação detalhada de todos os equipamentos do sistema, que incluem instrumentos, bombas, válvulas, etc. Neste documento será obtida apenas a parte de interesse desta dissertação, ou seja, apenas a parte no que diz respeito sobre a comutação das bombas do sistema de óleo de lubrificante do sistema ARP.

A apostila do sistema é um material que é utilizado no período de treinamento, o qual fornece todo o conhecimento teórico sobre o tema, para a formação do operador. Este documento possui a característica de fornecer dados detalhados, fluxogramas simplificados, folhas de lógica simplificadas e figuras. Este material é atualizado sistematicamente com a documentação oficial da usina, ou seja, o manual de operação, o system description, fluxograma e folha de lógica. Neste documento será obtida apenas a parte de interesse desta dissertação, ou seja, apenas a parte no que diz respeito sobre a comutação das bombas do sistema de óleo de lubrificante do sistema ARP. Por este motivo, a apostila será utilizada como referência para

elaborar alguns desenhos nesta dissertação (fluxograma e folha de lógica simplificada), os quais contemplam a parte de interesse.

O fluxograma do sistema, é o documento oficial usado pela usina para auxiliar na visualização e interpretação dos diversos alinhamentos do sistema. Ele possui um grande detalhamento de todas as partes que englobam o sistema. Devido a sua grande riqueza de detalhes, apenas a parte do sistema de óleo lubrificante da ARP que é de interesse desta dissertação, será usada. Desta forma, essa parte que é detalhada, será usada para conferir se esta compatível com o fluxograma simplificado do sistema.

A folha de lógica é o documento oficial usado pela usina, o qual contempla toda a automação dos componentes envolvidos. O mesmo possui um enorme detalhamento, por isso não será usado na sua totalidade e servirá apenas para confirmar a veracidade das informações, com a folha de lógica simplificada na apostila. Neste documento será obtida a parte de interesse desta dissertação, ou seja, apenas a parte no que diz respeito sobre a comutação das bombas do sistema de óleo de lubrificante do sistema ARP.

A experiência operacional interna ou externa, é obtida através de um relatório produzido pela própria usina e que é disponibilizado para CNEN, o qual contempla eventos significantes ocorridos que geraram aprendizado, melhorias ou recomendações. Serão selecionados apenas as experiências relevantes sobre a parte que trata o sistema de óleo lubrificante da ARP.

Entrevistas com operadores e instrutores experientes é necessária para obter o ponto de vista do pessoal que está sistematicamente operando, e sistematicamente treinamento estes profissionais. Nesta entrevista a discussão deve ser sobre a parte de interesse desta dissertação, ou seja, apenas a parte no que diz respeito sobre a comutação das bombas do sistema de óleo lubrificante do sistema ARP. Tal entrevista visa confirmar/ incluir pontos importantes a serem definidos sobre as principais operações a serem realizadas nas bombas do sistema de óleo lubrificante do sistema ARP da planta.

A pesquisa em campo consiste em consulta de temas correlatos, visita ao local de treinamentos teóricos e práticos e numa visita técnica ao local para a obtenção de fotos e vídeos além de acompanhamento de tarefas no local real.

A avaliação compreende a opinião de profissionais experientes na área sobre a ferramenta criada.

#### 4.1 PESQUISA DOCUMENTAL E BIBLIOGRAFIA

Foram feitos levantamentos bibliográficos do manual de operação do sistema de água de refrigeração principal de uma usina nuclear, análise do sytem description , utilização de apostila específica do sistema de água de refrigeração principal, literatura científica com propostas de treinamento e utilização de RV disponível, análise de norma referente a operação de usina nuclear, leitura de artigos do ONS, IAEA, WANO e EPRI.

Para detalhamento de toda a dissertação proposta, inicialmente foram analisados os documentos referentes a parte operacional:

- Manual de operação específico da Sistema de Água de Refrigeração Principal
- System Description Main Cooling Water Pump
- Folha de Lógica , do Sistema de Água de Refrigeracao Principal.
- Apostila de Sistemas Básico de Usinas nucleares do Sistema de Galerias e Bombas da água de Refrigeração Principal, de uma usina nuclear 2019

Para analisar a prática mundial relacionada ao tema desta dissertação foram analisados documentos das seguintes entidades internacionais:

IAEA - Classification, Selection and Use of Nuclear Power Plant Simulators for Education and Training, IAEA-TECDOC-1887

IAEA - Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA-RDS-1/39 ISBN 978-92-0-109319-6 ISSN 1011-2642

WANO – World Association Nuclear Operator, Procedure, PCD 2014-4 Rev 1, Appendix D Good Practice Proposal Form

EPRI – Eletric Power Research Institute

Foi feita uma análise sobre a importância e disponibilidade da CNAAA ao Sistema Integrado Nacional, através da análise dos seguintes documentos:

SGI - Sistema de Gestão de Intervenções - Manual do Usuário ONS; Resolução Normativa nº 487 de 15 de maio de 2012 ANEEL Manual de Procedimentos da Operação; ONS - RO-AN.BR.04

ONS - IPDO – Informe Preliminar Diário da Operação de 28/03/2020

ONS – Importância da UTN Angra 3 para o atendimento do SIN, ONS NT-0020/2017

Por fim foi verificado a relação das normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear que poderiam contribuir para aprimoração da dissertação, são elas:

- Norma CNEN 1.01 – Licenciamento de Operadores de Reatores Nucleares, anexo IV



- Norma CNEN 1.14 – Relatórios de Operação de Usinas Nucleoelétricas
- Norma CNEN 1.16 - Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas.

## 4.2 PESQUISA DE CAMPO

Inicialmente foi utilizado como base o trabalho de dissertação “O uso da realidade virtual para implantação de um centro de radiofarmácia em serviço de medicina nuclear” de autoria da aluna Mônica Aquino de Assis (ASSIS, M. A., 2020). Este trabalho avaliou a utilização de um simulador de realidade virtual (RV), para ser aplicado em treinamentos e capacitação dos profissionais que estão envolvidos nos processos de uma radiofarmácia. Diante da similaridade sobre o tema treinamento e da qualidade do trabalho, metodologia similar foi adotada.

A pesquisa de campo foi realizada em uma usina nuclear tipo PWR-SIEMENS / KWU, centro de treinamento (CT) e centro de treinamentos avançado em simulador (CTAS).

Na usina nuclear foi realizada uma visita, com intuito de acompanhar no campo uma manobra de troca de bomba de óleo da bomba da água de refrigeração principal estando a usina a 100% de potência. Foram observados os principais cuidados envolvidos e os principais pontos cruciais, tanto no campo quanto na sala de controle, assim como as ações esperadas dos envolvidos caso a manobra não ocorresse com sucesso. Foram obtidos fotos e vídeos para a criação do ambiente virtual.

Na visita ao CTAS, foi observado no simulador da sala de controle a reprodução de um cenário que promoveu a perda de uma bomba da água de refrigeração principal e seu impacto na variação de reatividade e por consequência na potência do reator, com a elaboração de um vídeo.

No centro de treinamento foi observado o local e material disponibilizado para o treinamento teórico do sistema de água de refrigeração principal.

Desta forma a pesquisa em campo colaborou para a elaboração de uma lógica simplificada do comportamento da bomba de óleo da bomba da água de refrigeração principal, forneceu grande quantidade de material para a construção do modelo do virtual além de fornecer a criação das perguntas para o questionário.

### 4.3 DEFINIÇÕES DAS MANOBRAS IMPORTANTES

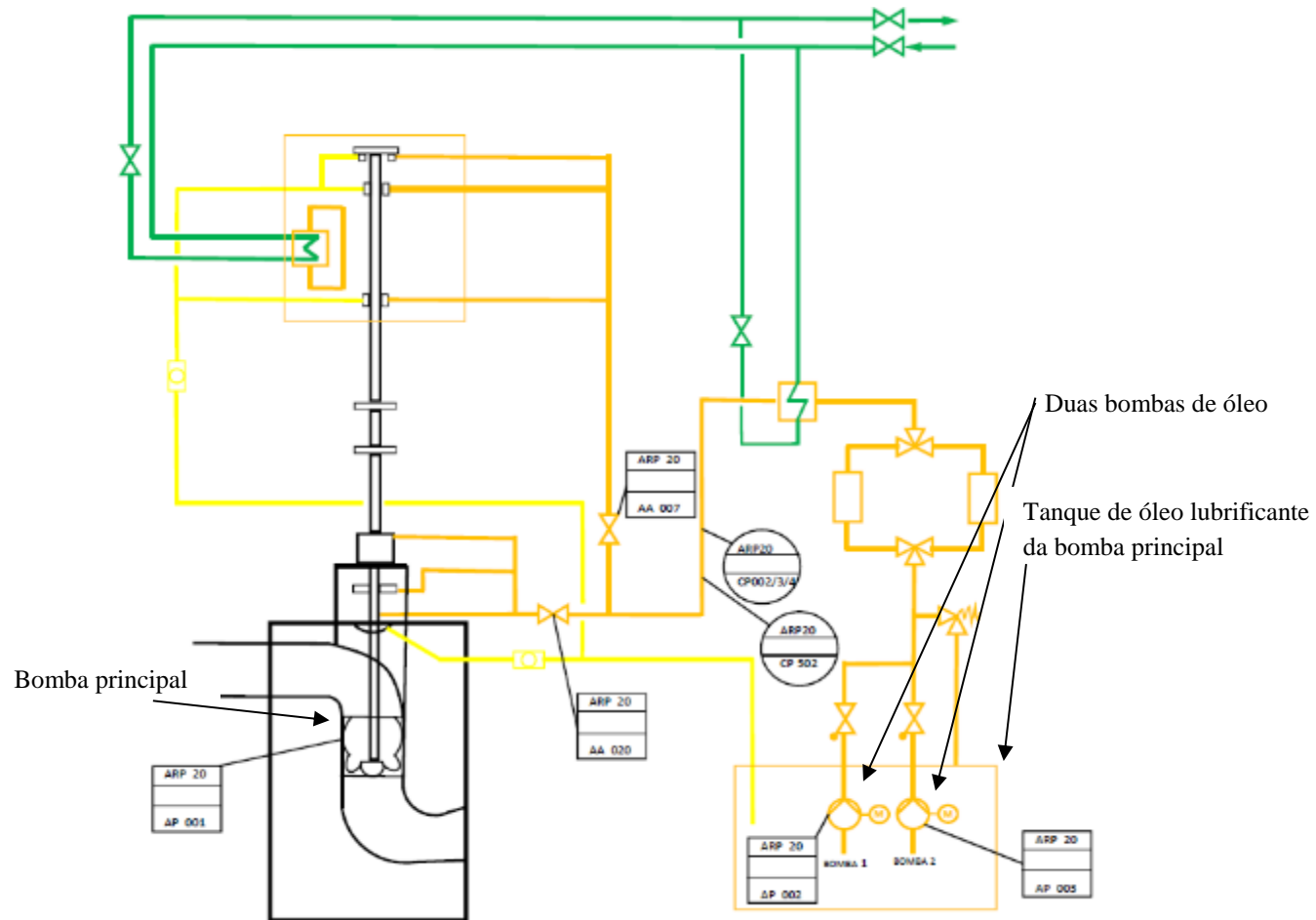
Para definir o detalhamento da especificidade dos componentes e das operações é necessário a consulta dos diversos documentos citados anteriormente (Manual de Operação do Sistema, System Description, Folha de Lógica e Apostila do Sistema) e então detalhar aqueles componentes que são de interesse em questão. Neste caso foram definidos como componentes principais o painel de comando local (FIGURA 10), os motores elétricos das bombas de óleo, manômetros, pressostatos e válvulas. Com exceção das válvulas e pressostatos, todos os componentes citados anteriormente, foram reproduzidos no ambiente virtual, de forma a representar sua fidelidade física e funcional.



**Figura 10:** Painel de comando local - comutação manual bomba 1 para bomba 2

**Fonte:** O autor (2020)

As bombas de óleo operam no interior do tanque de óleo lubrificante da bomba principal (que fica abaixo do piso dos painéis elétricos) e são acionadas pelos motores elétricos a elas acopladas. Estes motores foram reproduzidos no ambiente virtual. Estes são alimentados pelo painel de comando local e recebem comandos manuais e automáticos para ligar ou desligar. Não é possível a visualização das bombas, apenas dos seus motores, que ficam de forma vertical na parte superior externa do tanque de óleo. Estas bombas são responsáveis por enviar, através de toda a tubulação correspondente, óleo lubrificante para todos os componentes que permitem que a bomba principal permaneça funcionando corretamente (FIGURA11).

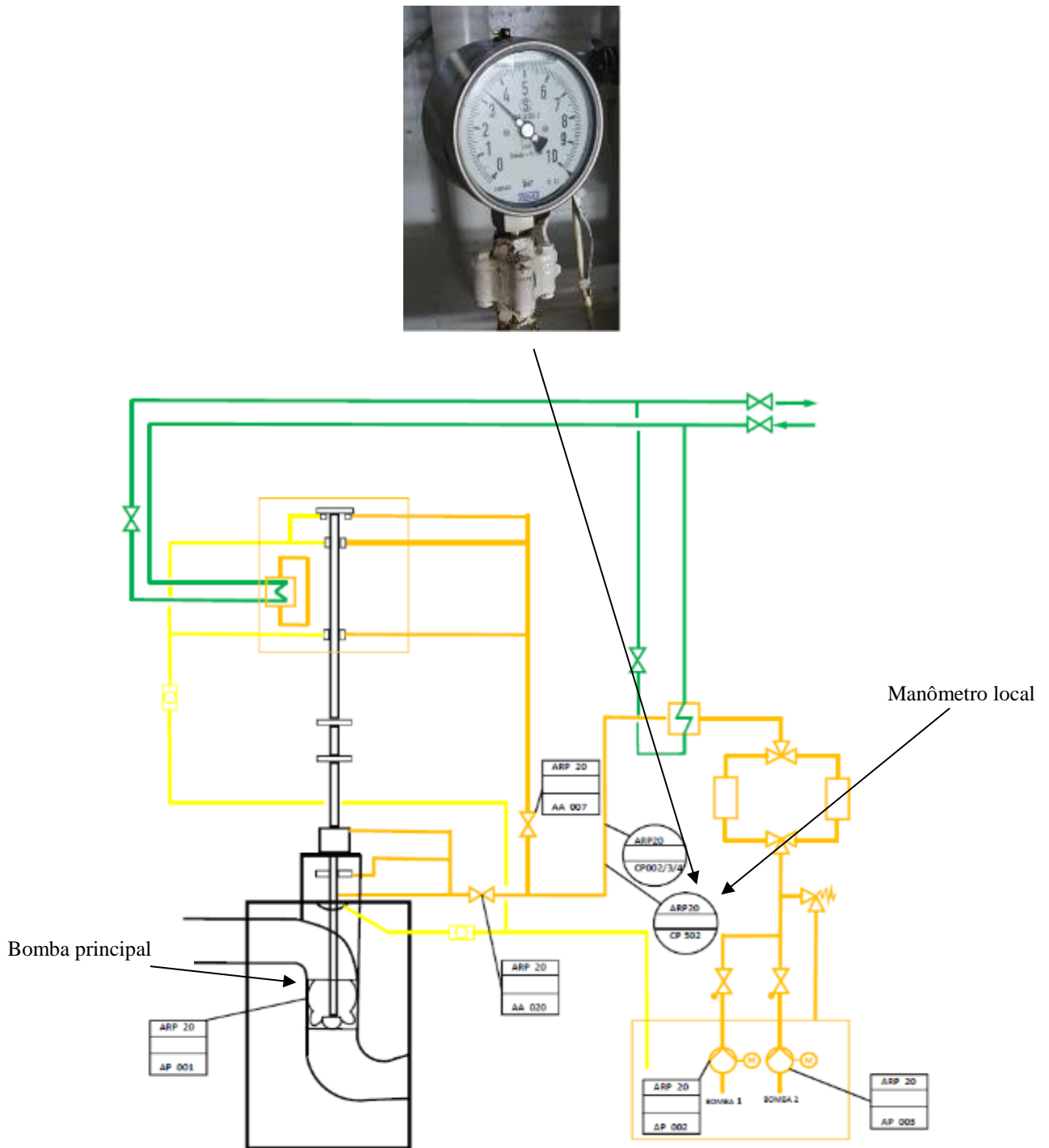


**Figura 11:** Representação das duas bombas de óleo lubrificante

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

Os instrumentos importantes são aqueles que dizem respeito a manobras no sistema de óleo. Estes são mencionados em várias partes do manual de operação, system description, bem como nas folhas de lógica. Estes instrumentos são o manômetro e os pressostatos. Em vista disso, os mesmos serão detalhados.

O manômetro na linha de descarga fornece a informação local de pressão (bar) que está sendo imposta pela bomba de óleo que está ligada. O operador a qualquer momento pode ir ao local e visualizar este valor. Como dito antes, o mesmo está instalado na tubulação de descarga das bombas de óleo e possui um diâmetro de aproximadamente 11cm e 4cm profundidade. Sua visualização não é de fácil acesso e ele fica próximo a bomba. Não tem nenhuma conexão com o painel de comando local (FIGURA 12). Este manômetro é reproduzido no ambiente virtual.



**Figura 12:** Representação do manômetro local

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

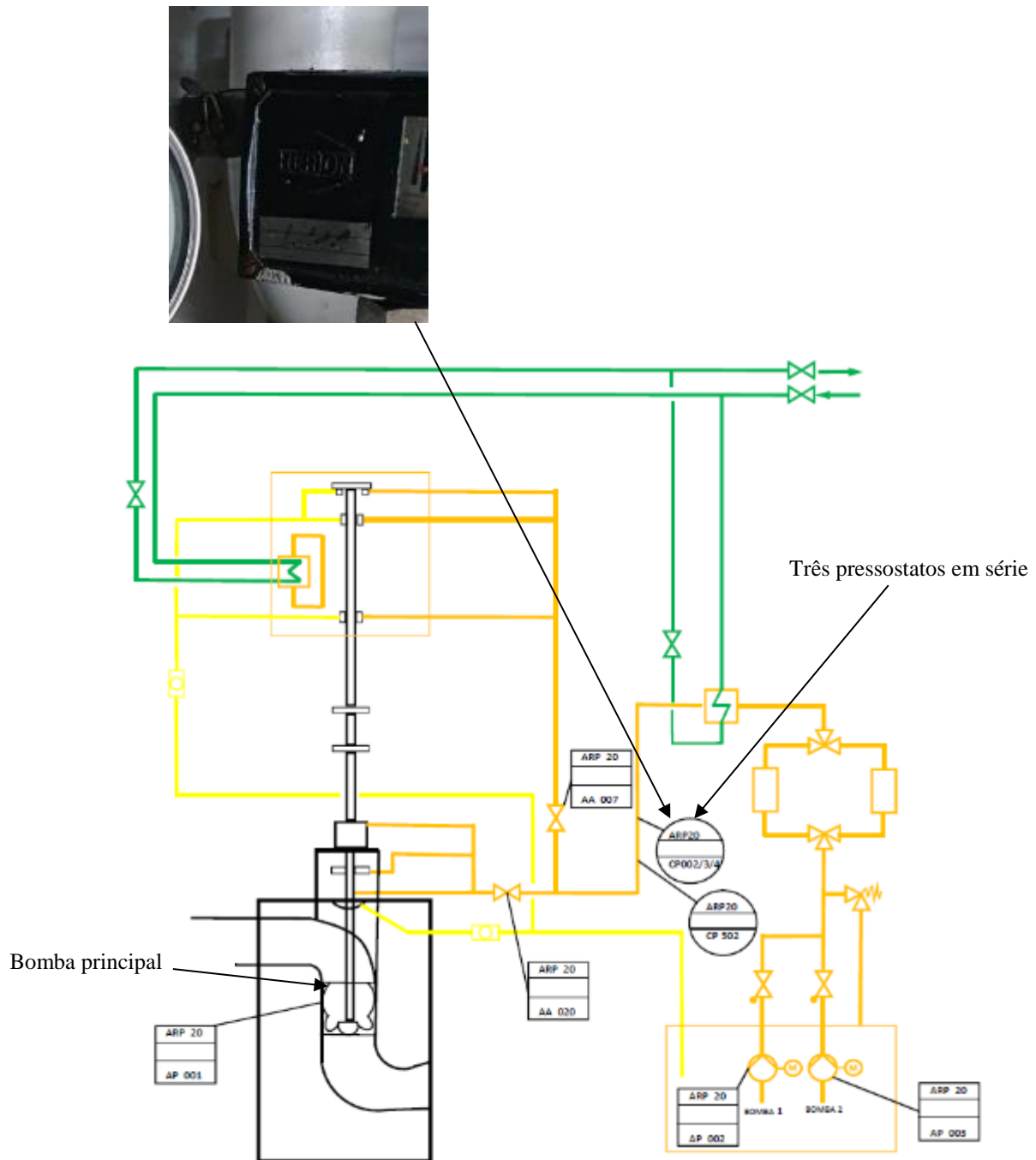
Três pressostatos em série monitoram a pressão da tubulação de descarga de óleo lubrificante e assim, fornecem sinais com diferentes propósitos para serem usados de forma automática no painel local ou na sala de controle. Uma das informações obtidas destes pressostatos fornece sinal para habilitar a partida da bomba principal (pressão de óleo maior

que 2,5bar). Um segundo, fornece um sinal como protetivo para desligar a bomba principal (pressão de óleo <1,5bar). Um terceiro fornece sinal para partida/parada automática para a bomba de óleo em prontidão (pressão <2,5bar). Estes 3 pressostatos não precisam ser representados fisicamente, mas suas ações sim, uma vez que nas operações escolhidas a independência entre eles e a lógica por trás dos mesmos, não é perceptível ao operador. Seus efeitos são vistos e percebidos pelo manômetro. Desta forma a não representação dos pressostatos não afetará o desenvolvimento do treinamento proposto. Entretanto será elucidado o que cada um está monitorando e como é usado seu sinal (FIGURA 13).

ARP20CP002 – se a pressão na linha de óleo ficar maior que 2,5bar, fornece sinal permissivo para que a bomba principal seja ligada (FIGURA 13).

ARP20CP003 – se a pressão na linha de óleo ficar abaixo de 1,5 bar, a bomba principal recebe comando para desligar (FIGURA 13).

ARP20CP004 – se a pressão na linha de óleo ficar abaixo de 2,5 bar, envia sinal de partida automática para a bomba de óleo de prontidão (FIGURA 13).



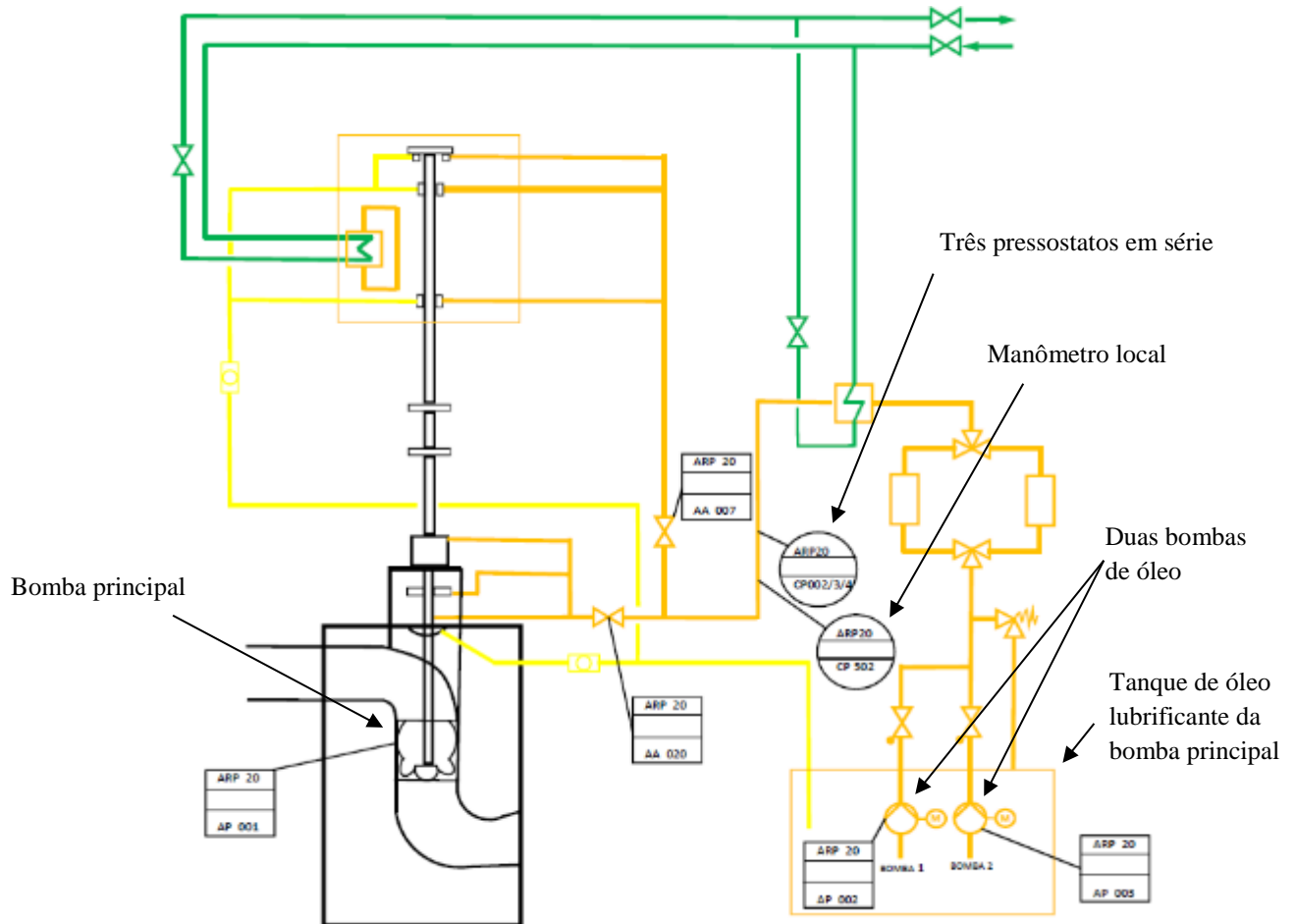
**Figura 13:** Representação dos pressostatos em série com o manômetro local

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

De forma geral, os pressostatos de descarga, enviam sinal para o painel elétrico de comando que permite ligar/desligar a bomba de óleo ou bomba principal, ou seja são os responsáveis por permitir que a bomba principal e as bombas de óleo operem corretamente. Estão instalados na tubulação de descarga em série com o manômetro local. Não é possível o operador visualizar a pressão através destes pressostatos. Estes 3 pressostatos não estão

representados fisicamente, entretanto a sua funcionalidade está. Ela foi inserida no ambiente virtual através do manômetro.

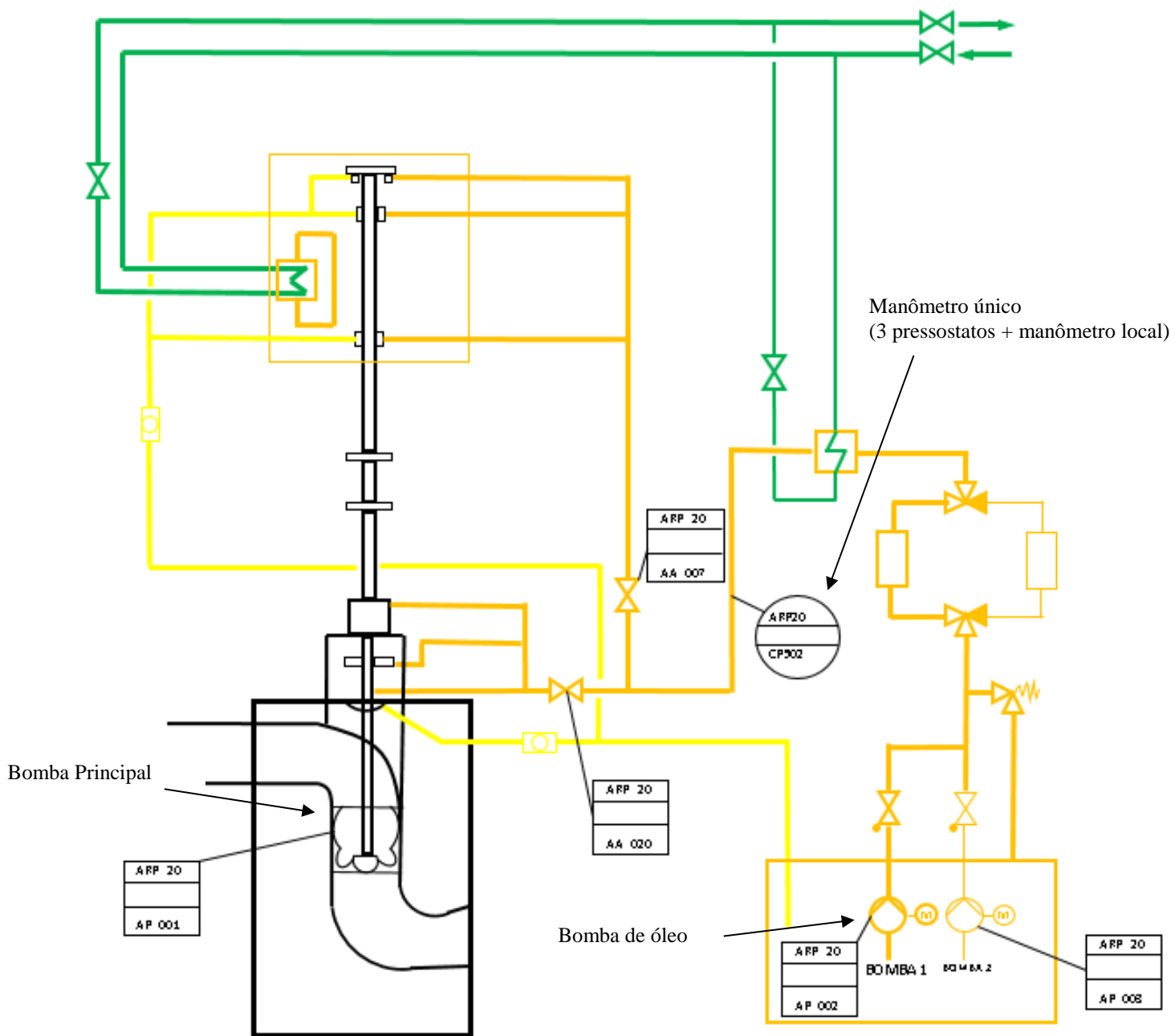
Será utilizado o desenho simplificado (FIGURA 14) para a elaboração de um fluxograma (FIGURA 15) e folha de lógica mais simples (FIGURA 16) que tenha apenas um componente que envie sinais e que permita a visualização de valores de pressão.



**Figura 14:** Representação no fluxograma com os principais componentes

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

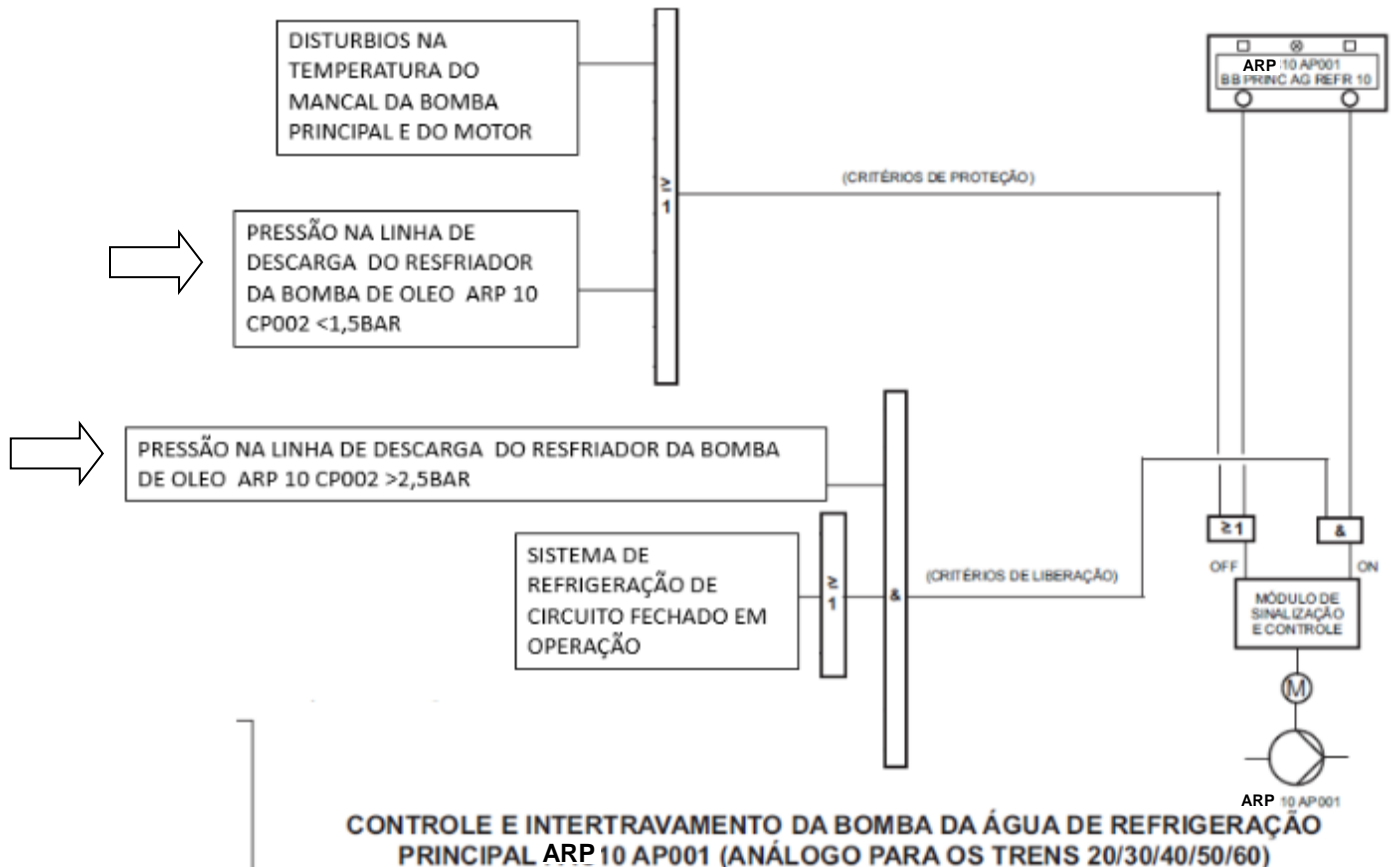
Conforme descrito acima os três pressostatos e o manômetro serão descritos apenas como um manômetro único, responsável por identificar as oscilações de pressão no sistema de óleo e ainda permitir a visualização pelo operador. Isto facilita na elaboração do desenvolvimento do programa e da lógica simplificada e não interfere no treinamento proposto (FIGURA 16).



**Figura 15:** Fluxograma simples com os principais componentes

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)



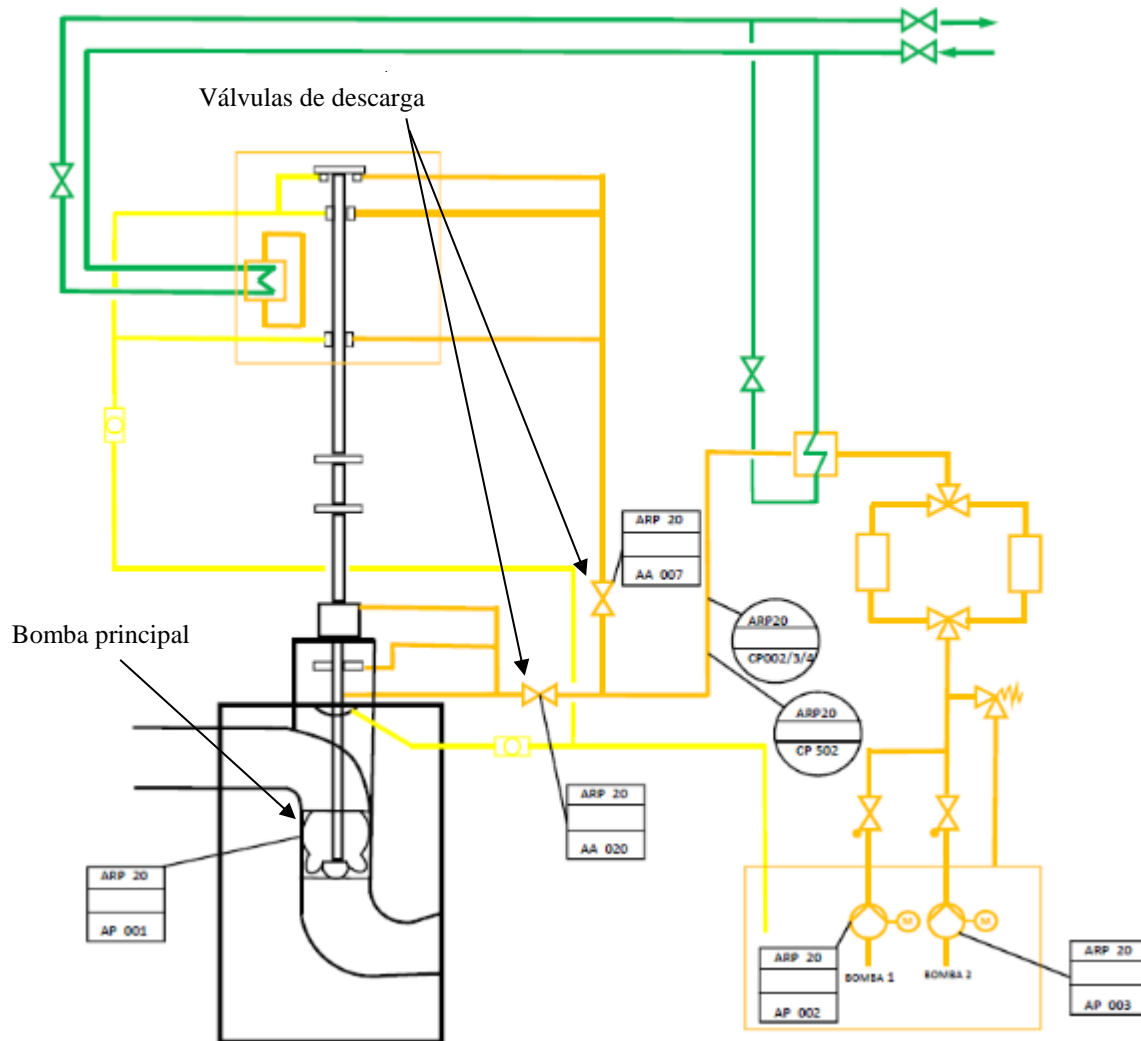


**Figura 16:** Lógica simplificada - Parcela do circuito de óleo lubrificante na lógica de proteção da bomba principal

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

Na folha de lógica (FIGURA 16), apenas a parte de interesse que trata das pressões das bombas de óleo e da bomba principal serão utilizadas na construção da lógica do ambiente virtual. Os distúrbios de temperatura do mancal e do motor de ambas as bombas, assim como o sistema de refrigeração de circuito fechado, não serão considerados, pois não interferem nas manobras propostas em ambiente virtual.

As válvulas de interesse são as que estão na tubulação de descarga de óleo lubrificante. As mesmas são facilmente visualizadas através do fluxograma simplificado (FIGURA 17). Elas são as responsáveis por permitir que o óleo lubrificante chegue nas partes que são previstas de todo o sistema. As mesmas devem estar sempre abertas quando o sistema de óleo for colocado em operação. Possuem um volante da haste de acionamento com diâmetro de cerca de 20cm. Não possui indicação no painel sobre a sua posição, por isso a mesma deve ser verificada localmente se está na posição correta. Porém a mesma também não será reproduzida no ambiente virtual.



**Figura 17:** Indicação das válvulas de descarga

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

As operações importantes são obtidas consultando a parte específica no manual de operação do sistema. Dessa forma é chamada atenção para a operação dos componentes do sistema de óleo, onde os quais influenciam diretamente na operabilidade da bomba principal e conseqüentemente de forma indireta na capacidade de geração, disponibilidade da usina e variação não programada de potência nuclear. Para permitir uma elaboração de um treinamento mais representativo, onde deve ser escolhido o ponto crucial que pode afetar diretamente na planta, é escolhido a parte que aborda especificamente os cuidados previstos nos diversos documentos já citados. A manobra que representa o ponto crucial é a comutação das bombas de óleo com a usina a plena carga. A parte de interesse a ser tratada compreende desde a operação do painel de comando local até a constatação do correto funcionamento da bomba de

óleo, permitindo que a bomba principal permaneça em operação. Este trecho engloba: as bombas de óleo, instrumentos, tanque, válvulas, tubulações e painel elétrico de comando. Para este fim foi utilizado o manual de operação específico do sistema e manual de alarmes associados ao sistema de óleo. Desta forma são três as operações importantes a seguir:

1-A partida do sistema de óleo é tida com sucesso se a pressão de descarga da bomba de óleo ficar em um valor entre 2,8 a 3,4 bar. Operacionalmente o valor fica em 3,2 bar.

2-A operação de parada do sistema de óleo deve ocorrer se, e somente se, a bomba principal estiver previamente desligada e ocorrer uma solicitação da sala de controle para que seja colocado o sistema de óleo fora de serviço. Para esta operação basta acionar o botão de desligar da bomba que estiver selecionada.

3-A terceira operação importante e mais complexa, diz respeito a comutação automática ou manual, entre as bombas de óleo, com a bomba principal em funcionamento e com a usina em potência, que é o objeto de estudo.

-Na comutação automática podem ocorrer duas situações:

- 1- A bomba em serviço desligar repentinamente ou;
- 2- A bomba em serviço apresentar baixa eficiência.

Na situação 1, a bomba em serviço desliga abruptamente (falha única) e quando a pressão do sistema atravessar o valor de 2,5 bar em direção a 0 bar, a bomba em prontidão parte automaticamente retornando a pressão para o valor 2,8 e 3,4 bar.

Um alarme correspondente a uma falha no sistema de óleo é anunciado na sala de controle. No painel local a sinalização de falha é acesa e assim como das correspondentes sinalizações de bomba desligada e ligada. O passo fundamental para a correta operação de comutação neste caso é o operador atuar manualmente no painel local e passar a CHAVE DE SELEÇÃO (CHAVE Q4) – BOMBA1/BOMBA2 – da bomba de óleo selecionada para a bomba de prontidão que se encontra em operação (mas não selecionada).

Na situação 2, a bomba em serviço apresenta baixa eficiência. Sua pressão de descarga decresce ao longo do tempo e ao atingir o valor de 2,5 bar, a bomba em prontidão parte automaticamente, retornando a pressão para um valor entre 2,8 e 5,8 bar. Um alarme correspondente a uma falha no sistema de óleo é anunciado na sala de controle. No painel local ficam acesas as sinalizações de falha e “2 BOMBAS OPERANDO”, assim como ambas as sinalizações de bombas ligadas. O passo fundamental para a correta operação de comutação neste caso é o operador atuar manualmente na CHAVE DE SELEÇÃO (CHAVE Q4) – “BOMBA1/BOMBA2” – da bomba de óleo previamente selecionada, para a bomba em

prontidão. As duas bombas permanecerão operando, após comutar a chave de BOMBA 1 para BOMBA 2. Atenção deve ser dada no momento da atuação do botão de RESET. Somente após 1 minuto pressionar o botão RESET do painel. Então, a bomba falhada será desligada e pressão deverá retornar a um valor entre 2,8 e 3,4 bar.

Nas duas situações de comutação automáticas, a potência do reator não precisou ser reduzida.

Na comutação manual é necessário que a pressão do sistema de óleo esteja entre 2,8 e 3,4 bar. Tal comutação só deve ocorrer com o pedido da sala de controle. Para a comutação manual é necessária a presença de dois operadores sendo: um operador atuando no painel local e contabilizando o tempo e outro operador verificando a variação da pressão através do manômetro. São necessários dois, devido o painel de acionamento e a verificação de pressão ficarem distantes um do outro e a prática das ferramentas de prevenção de erro fazem-se ainda mais importantes neste caso.

A comutação entre as bombas de óleo poderá ser feita com a CHAVE SELEÇÃO DE OPERAÇÃO (CHAVE Q3) posicionada tanto em “LOCAL” quanto em “REMOTO”, do painel de comando local. Entretanto não é esperado que a mesma esteja na posição “LOCAL” com a usina operando a potência.

O operador deve ficar atento para não colocar a CHAVE Q3 na posição “TESTE” ou “LOCAL” com a Bomba Principal ligada, pois devido a lógica de comando do painel, isto acarretará no desligamento da mesma, e conseqüente redução não programada de potência no reator e da turbina. O operador deve ficar atento pois esta chave fica ao lado da CHAVE Q4, e possui características físicas similares.

Para efetuar a comutação da BOMBA 1 para BOMBA 2, onde a BOMBA 1 é a que está ligada e BOMBA 2 a de prontidão (desligada), a chave de seleção (CHAVE Q4) estará posicionada para BOMBA 1. O operador deve atuar na chave de seleção (CHAVE Q4) e girar para a posição de BOMBA 2, dessa forma a mesma irá ligar e funcionar em paralelo com a BOMBA 1. A sinalização local de “2 BOMBAS OPERANDO” ficará acesa. A partir deste ponto é crucial, para que o reator continue a operar numa potência constante (plena carga), a correta interpretação do comportamento do sistema de óleo.

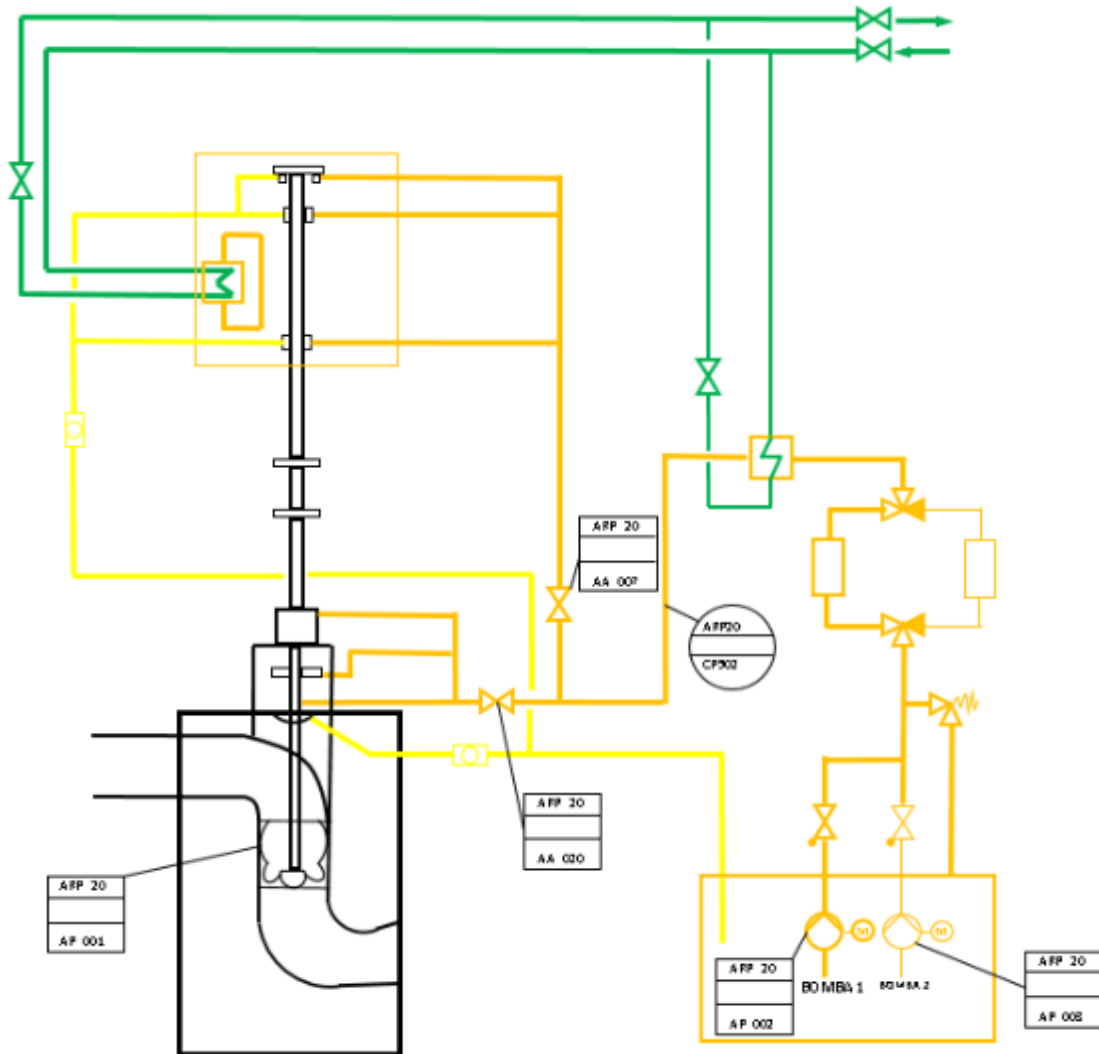
Assim que a segunda bomba de óleo é ligada a pressão do óleo, salta quase que instantaneamente da faixa de 2,8 a 3,4 bar para um valor maior que 5,8bar (conforme o MOU, operacionalmente esta pressão fica entre 7 a 8 bar) e o desligamento da BOMBA 1 deve ocorrer de forma automática em aproximadamente 20 segundos. Assim que a BOMBA 1 desligar, sua sinalização de ligada será apagada, a de desligado será acesa e a de “2 BOMBAS OPERANDO”

permanece acesa. A mesma será apagada assim que for acionado o botão RESET. Não é necessário aguardar 1 minuto para acionar este botão. Quando a BOMBA 1 desligar, a pressão irá diminuir rapidamente e se estabilizar no valor de 2,8 a 3,4 bar e a comutação da BOMBA 1 para BOMBA 2 será considerada com sucesso. A BOMBA 2 passa a ser a bomba selecionada (ligada) e a BOMBA 1 a bomba de prontidão (desligada). A potência do reator não foi alterada.

Entretanto, caso a pressão com as 2 bombas operando não fique maior que 5,8bar tão logo a segunda bomba em prontidão entre em operação, ações para o cancelamento da comutação devem ser tomadas de forma rápida e precisa. A ação consiste em retornar a chave de seleção (CHAVE Q4) das bombas, para a bomba que se encontrava em serviço, antes do tempo de 20 segundos, no caso a BOMBA 1 novamente. Caso esta ação não seja feita dentro deste tempo, a bomba principal corre o risco de desligar por baixa pressão de óleo, pois a bomba que acabou de ser comutada (BOMBA 2), pode não estar fornecendo a pressão mínima requerida pelo sistema (1,5bar).

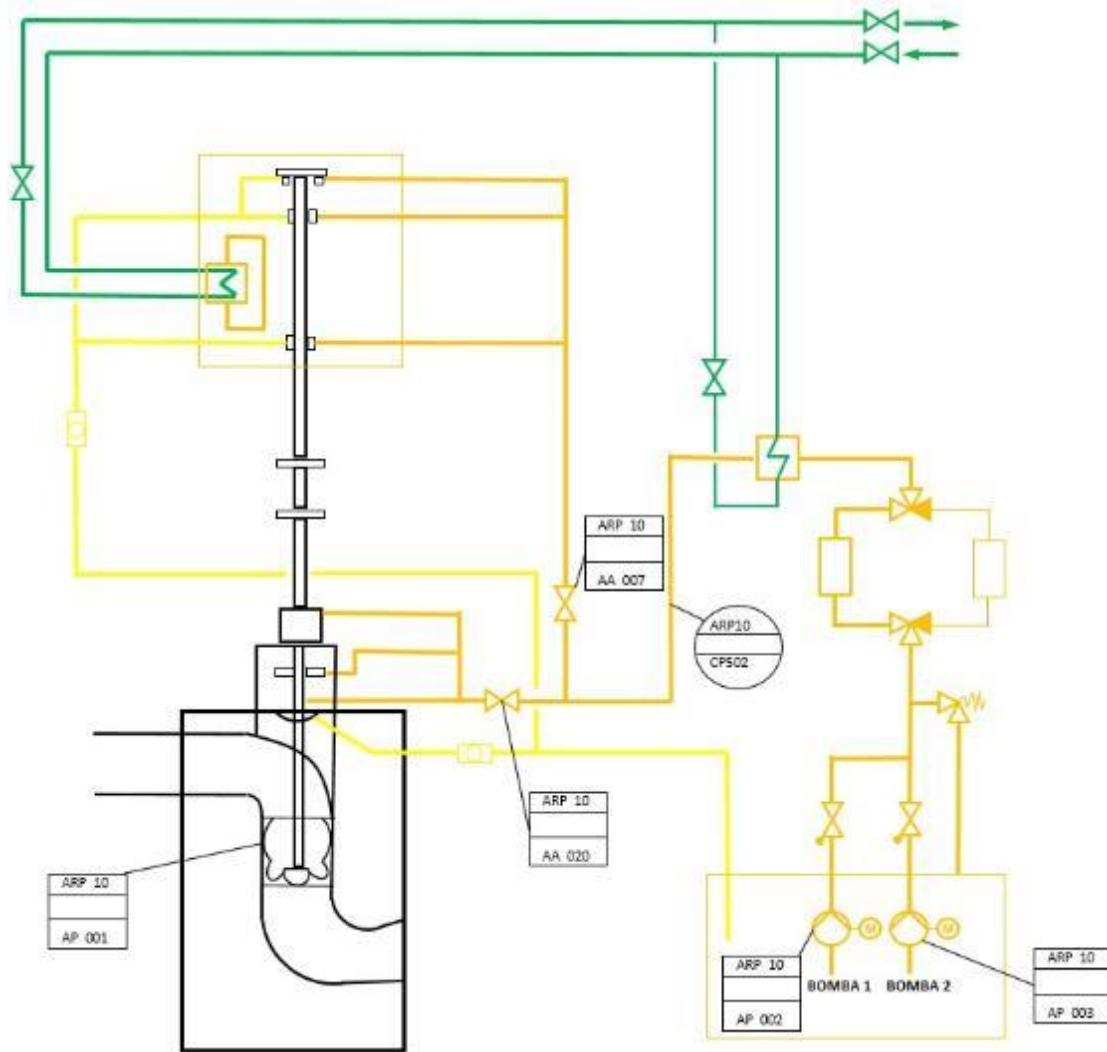
Então aguardar ao menos 1 minuto após o desligamento da BOMBA 2, e então acionar a botoeira “RESET” no painel local. A sinalização no painel de comando local de “2 BOMBAS OPERANDO”, será apagada e a BOMBA 1 que é a que foi selecionada permanecerá ligada. Dessa forma a comutação não ocorreu com sucesso, entretanto o reator permaneceu a plena carga.

Os alinhamentos possíveis são com uma bomba operando (FIGURA 18) ou com duas bombas operando (FIGURA 19) possibilitando assim a troca de bombas (FIGURA 20), conforme os fluxogramas abaixo:



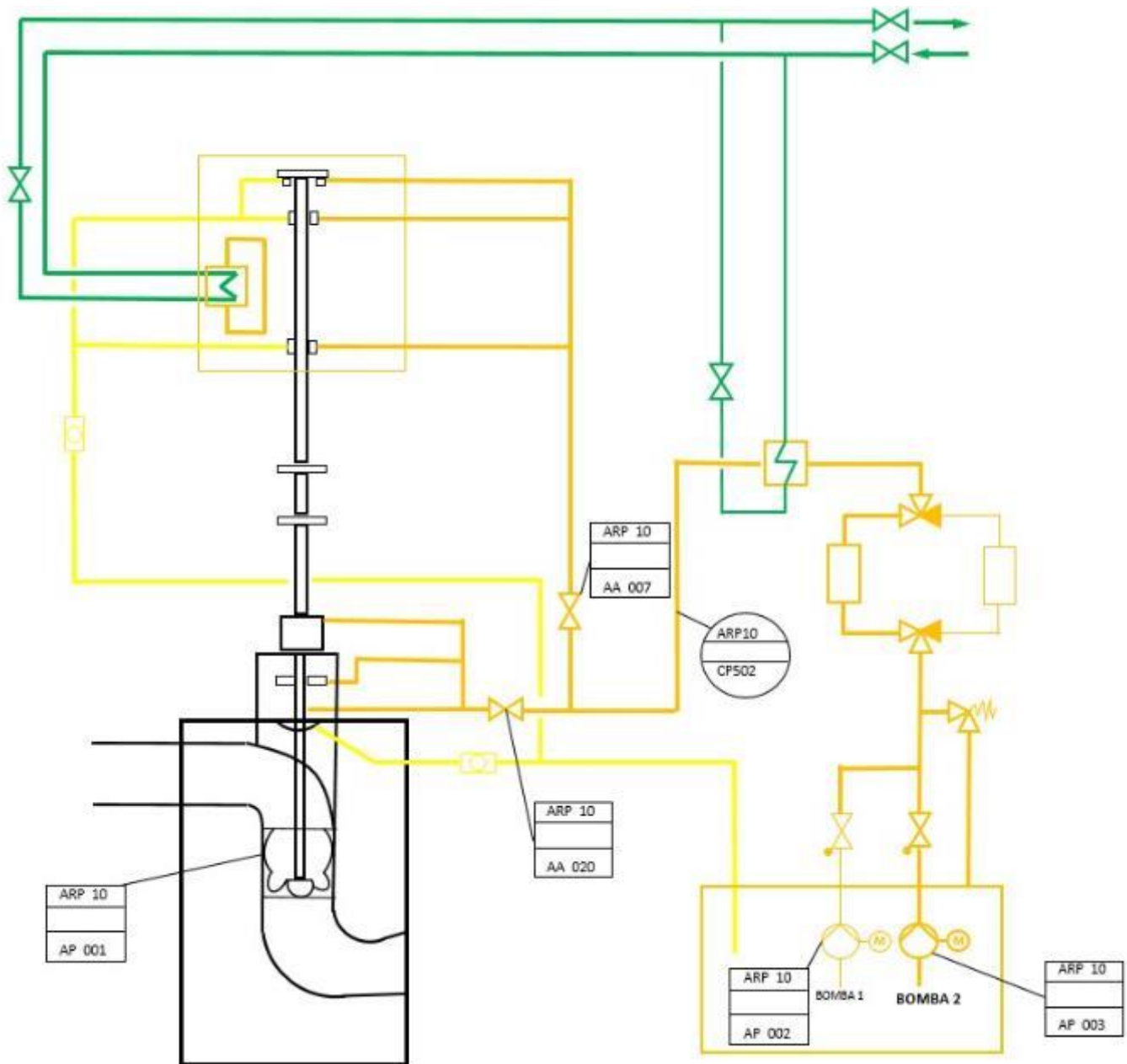
**Figura 18:** Alinhamento com uma bomba operando - bomba de óleo 1 operando e bomba 2 em prontidão

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)



**Figura 19:** Alinhamento com duas bombas operando - Comutação bomba 1 para bomba 2 em andamento - Duas bombas operando

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)



**Figura 20:** Alinhamento com uma bomba operando - Comutação bomba 1 para 2 concluída - Bomba 2 operando e bomba 1 em prontidão

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Sistemas básicos de usinas nucleares – Sistemas de galerias e bombas da água de refrigeração principal (2019)

#### 4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO VIRTUAL DO PAINEL DA BOMBA DE ÓLEO E DO AMBIENTE DA BOMBA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PRINCIPAL

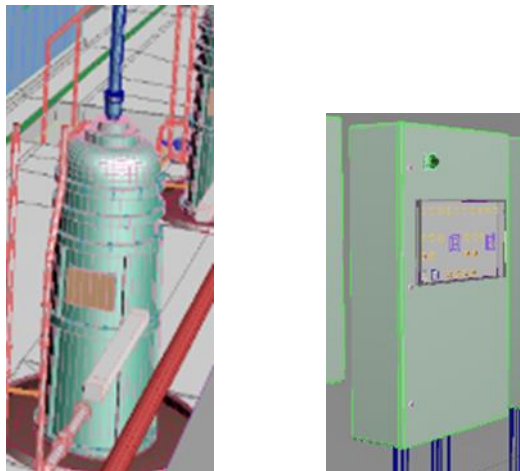
Para o desenvolvimento de um ambiente virtual para treinamento interativo, é necessário



o fornecimento de várias fotos dos principais componentes. As bombas, manômetros, pressostatos tubulações e, em especial do painel de comando local, com suas dimensões e detalhes de acionamentos dos botões e chaves. Este último deve conter uma riqueza de detalhes e informações. A elaboração de um vídeo com o funcionamento real do sistema envolvido poderá fornecer maior compreensão e colaborar para a correta simulação proposta em ambiente virtual. No trabalho desenvolvido foi de grande importância a colaboração de profissionais da usina nuclear também neste sentido.

Depois da obtenção das imagens e saber dos procedimentos corretos para execução das manobras, foi feita a construção do ambiente virtual, que consistiu de 3 etapas basicamente. São elas:

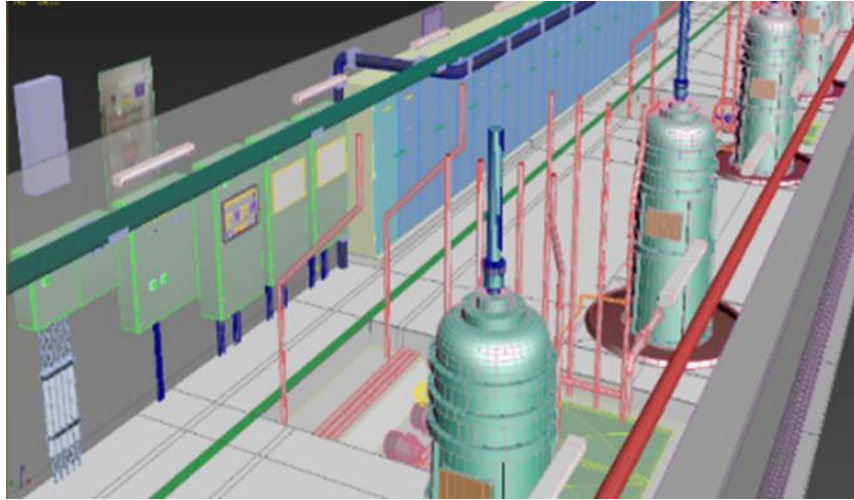
1 - Construção de objetos - Em termos de construção tem a parte da construção de modelos e objetos, onde se usa a ferramenta adobe ilustrador. Foram feitos modelos procurando chegar o mais próximo da realidade dos objetos, por exemplo as bombas, o manômetro, as botoeiras e o painel luminoso (FIGURA 21).



**Figura 21:** Construção do objeto bomba principal e objeto painel de comandos das bombas de óleo

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

2 - Construção do ambiente - Outra parte é a construção do ambiente incorporando os objetos (FIGURA 22 e 23). Depois de modelado o ambiente no espaço físico onde as bombas se encontram com os painéis, promovendo uma sensação do indivíduo de que ele está no ambiente, seguimos para a terceira etapa.



**Figura 22:** Construção do ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

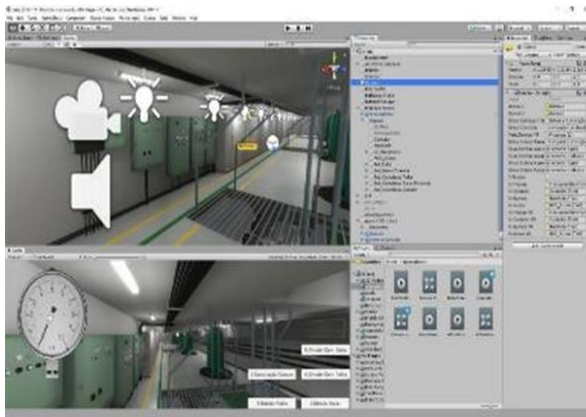


**Figura 23:** Construção do ambiente virtual – Renderizado

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

3 - Construção da funcionalidade – Neste terceiro momento foi implementado as funcionalidades. Que é a comutação em si. É a dinâmica do processo, ou seja, quando apertar o botão deve acontecer o que se espera quando o mesmo é atuado. Por exemplo: Se girar a chave para comutar a bomba, ela vai comutar, e sinalizar a indicação luminosa correspondente,

o manômetro será sensibilizado, o ruído será modificado. Ou seja, o painel está respondendo as ações. A indicação apresentada no manômetro é uma resposta do que realmente está acontecendo. A parte luminosa do painel é acionada de forma dinâmica, isso demonstra funcionalidade, existe uma programação e códigos por trás das respostas do painel (FIGURA 24). É importante ressaltar que não são apenas fotos estáticas do painel. O painel muda sua configuração de acordo com o acionamento. Essas funcionalidades promovem uma resposta a depender da ação tomada no painel. De maneira resumida, nesta etapa foram implementadas as funcionalidades. Que é o sistema responder a interatividade. A ação é computada no sistema, e a resposta é apresentada.



**Figura 24:** Construção da funcionalidade

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

Tanto a criação do objeto, criação do ambiente e a criação das funcionalidades tiveram programação e códigos desenvolvidos.

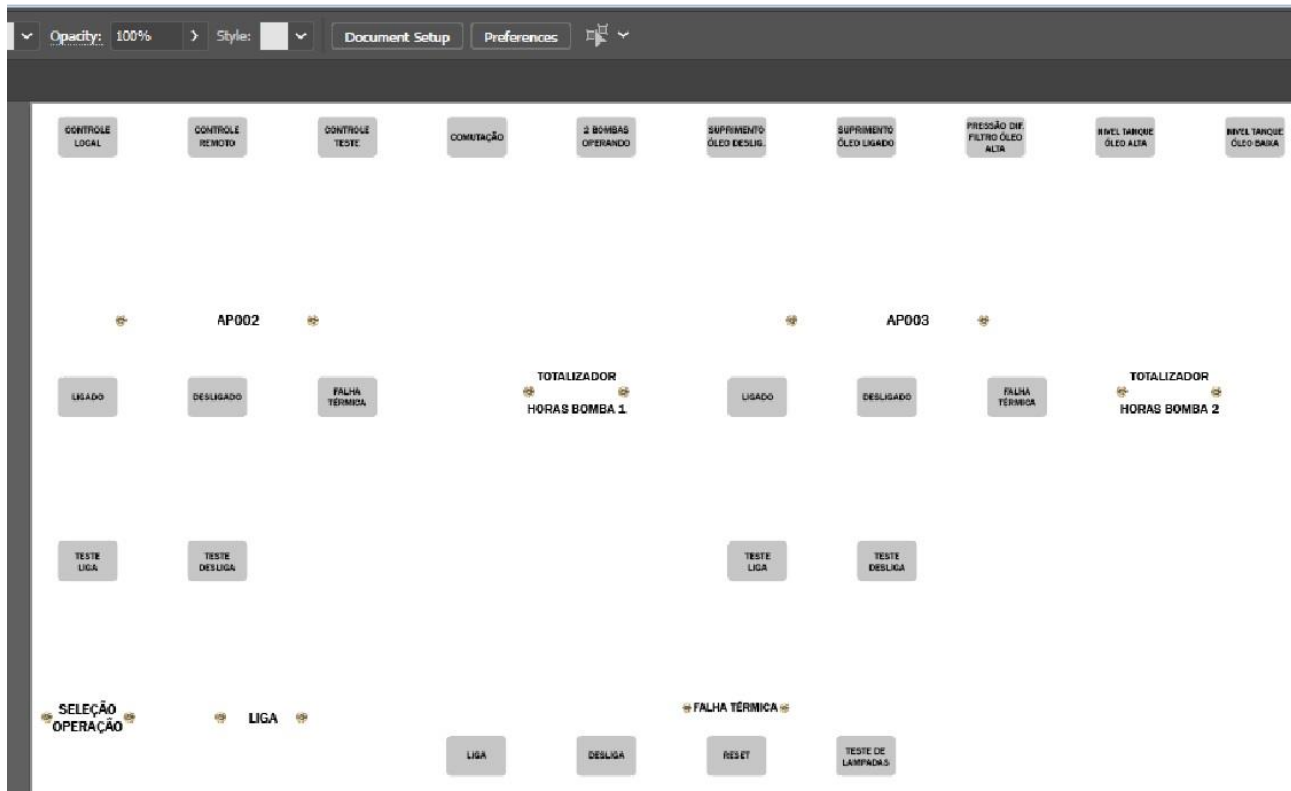
O método para a construção deste ambiente, foi utilizar o Unity associado a outras ferramentas de modelagem. E assim, foi modelado o ambiente em 3D, procurando representar o ambiente real e implementado as funcionalidades. Nesta etapa foi dada prioridade a fidelidade física e funcional do painel e do ambiente. A fidelidade física do painel diz respeito a localização e dimensão das botoeiras, lâmpadas e chaves no painel, assim como a localização do painel como um todo no ambiente criado (FIGURA 24). Não foram reproduzidas as etiquetas de código de barra para leitura (brancas), de advertência (amarela ou vermelha) e de prevenção de erros (azul) que constam no painel real. Apenas textos e etiquetas (TAG's) que tem relação direta com a manobra proposta foram reproduzidos. As funcionalidades criadas são

as mesmas do ambiente real, as lâmpadas correspondentes acendem conforme esperado no painel real. A fidelidade física do ambiente diz respeito à disposição espacial dos principais equipamentos no ambiente virtual e textos/ etiquetas (TAG's) relacionados a manobra.

Os itens listados a seguir fornecem todo tipo de detalhe necessário para a execução da melhor modelagem possível e esta etapa contou com a contribuição fundamental da equipe de desenvolvimento de Realidade Virtual (LabRV – localizado no IEN).

#### 4.4.1 Adobe Ilustrador e Microsoft Visual Studio

São programas que permitem a elaboração de programação com o desenvolvimento de códigos e lógicas de forma que representem de forma fidedigna o painel real. Permitem o desenvolvimento de softwares e possuem a capacidade de exportar seus desenhos, cenários e sons para serem usados em várias plataformas com várias linguagens de programação (FIGURAS 25, 26).



**Figura 25:** Ambiente do Adobe Ilustrador

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

```

119     }
120
121     }
122     public void SolicitarComutacao(string situacao)
123     {
124
125         if (recebeSimulacoes == true)
126         {
127             ResetarStatusBombas();
128             NetworkServerUIT.SendSimulationStatus(1);
129             recebeSimulacoes = false;
130
131
132             HudAvisos.MostrarAviso("Realize Uma Comutação de Bombas", Color.white);
133
134
135             if (situacao == "falha")
136             {
137
138                 if (bomba1.activeSelf)
139                     bomba2.GetComponent<Bomba>().hasStopped = true;
140
141                 else if (bomba2.activeSelf)
142                     bomba1.GetComponent<Bomba>().hasStopped = true;
143             }
144
145
146             else if (situacao == "baixa eficiencia")
147             {
148
149
150                 if (bomba1.activeSelf)
151                     bomba2.GetComponent<Bomba>().isFailing = true;
152
153                 else if (bomba2.activeSelf)
154                     bomba1.GetComponent<Bomba>().isFailing = true;
155             }
156
157         }
158     }
159 }

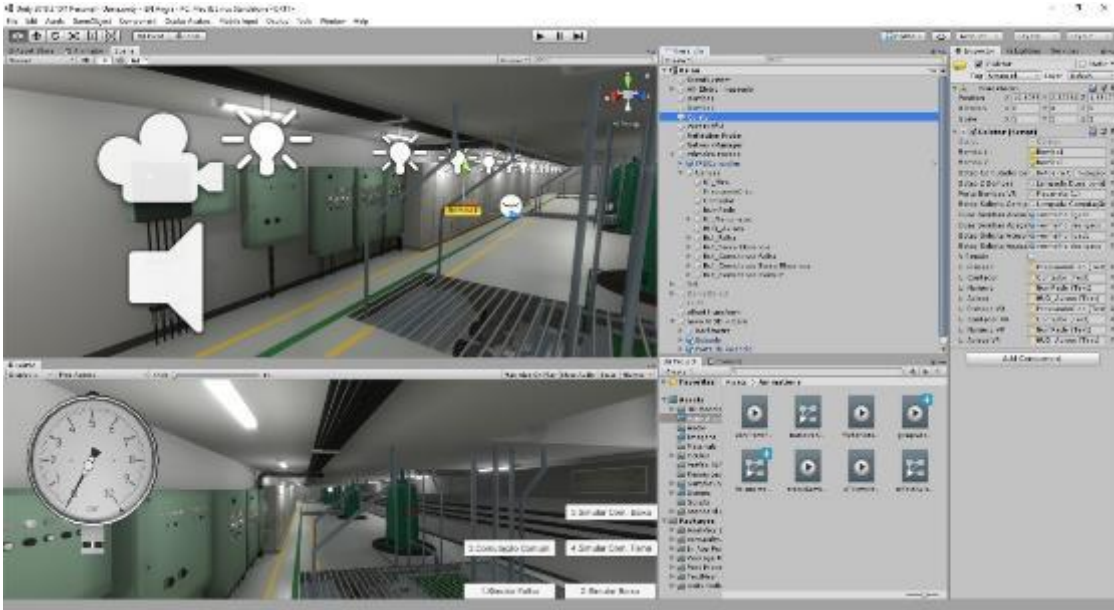
```

**Figura 26:** Ambiente de Desenvolvimento do Microsoft Visual Studio

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.2 UNITY 2018.3.10f1

Trata-se de uma ferramenta de modelagem de objeto capaz de reproduzir as principais operações e instrumentos citados anteriormente. Este programa utilizou a lógica simplificada de funcionamento que foi elaborada, possibilitando criar a atuação no painel local com as suas sinalizações (FIGURA 27).

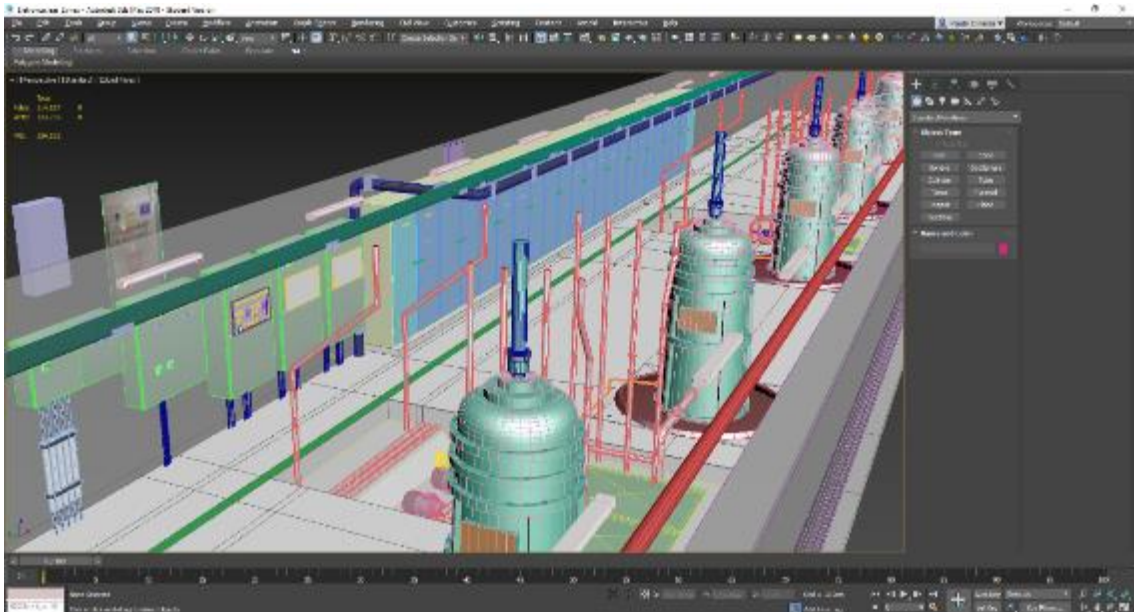


**Figura 27:** Ambiente de interface principal de Desenvolvimento do Unity 3D

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.3 3D Studio Max 2018

É um programa de modelagem tridimensional que permite renderização de imagens e animações. Usado em vídeo games, produção de filmes de animação, criação de personagens de jogos em 3D e criação de qualquer mundo virtual (FIGURA 28).



**Figura 28:** Ambiente de interface Gráfica do Programa de Modelagem Tridimensional 3Ds Max

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

É necessário um detalhamento sobre a utilização destas ferramentas gráficas. Sendo assim, a descrição dos algoritmos segue a mesma lógica básica de funcionamento da unidade de controle da usina, com a criação de classes para as bombas e manômetros. Os algoritmos foram criados exclusivamente para o projeto, utilizando apenas alguns componentes pré-existentes na ferramenta do Unity como os códigos utilizados para movimentação do usuário pela cena. A lógica de linguagem utilizada foi uma linguagem orientada a objetos, conceitos como classe, objeto, interface e herança foram utilizados na implementação. O tipo de modelagem utilizada foi a modelagem poligonal, usando formas básicas (cubos, cilindros, planos etc.) no 3DsMax é possível modificá-las e criar diversas formas, essa modelagem é composta por planos de no mínimo 3 lados e que se unem em pelo menos um dos lados para que seja construído as formas. O manômetro reproduzido no ambiente virtual responde de acordo com as situações das bombas e dos seus funcionamento. Ele é um objeto virtual tridimensional na cena do Unity, dessa forma os valores de tipo float atribuídos às bombas é transformado através de um cálculo específico em uma rotação para o ponteiro virtual, que se posiciona dinamicamente de acordo com o valor apresentado pelo sistema. A lógica de controle das bombas segue uma regra de pressões mínimas e máximas destacadas no modelo real de funcionamento, a soma dos valores de pressão das bombas é calculada e avaliada por essa lógica de forma a responder corretamente às situações como falha ou baixa eficiência virtualmente simuladas. A lógica foi desenvolvida para o modelo, utilizando o C# como forma de desenvolver os códigos. Nesse caso o Visual Studio atua apenas como uma IDE (Ambiente de desenvolvimento integrado).

Na subrotina ao painel, de forma geral o Unity é responsável pela parte gráfica, renderização 3D e posicionamento de objetos em cena, e o Visual Studio atua como ferramenta para desenvolver os comportamentos desses modelos em cena. A lógica de controle foi desenvolvida em códigos do Visual Studio e integrada ao Unity posteriormente. A comunicação do Adobe ao Unity, e do Unity a ferramenta 3D é apenas no fornecimento de arquivos. Os arquivos gerados no Adobe Photoshop ou no 3DSMax são importados para o Unity em formatos compatíveis como .PNG para imagens e .FBX para modelos 3D.

Toda a renderização é feita pela Unity Engine, e utiliza o Pipeline conhecido como URP (Universal Render Pipeline). A montagem para cada objeto foi primeiramente modelar a cena (local) onde os objetos serão acrescentados, em seguida cada objeto é modelado separadamente com a possibilidade de criar cópias dos mesmos, caso necessário pode ser modificado sem alteração da peça original.

#### 4.4.4 Óculos de Realidade Virtual

É o equipamento que proporciona a imersão do usuário no ambiente virtual, de forma a interagir com o equipamento proporcionando a experiência similar à do ambiente real. (FIGURA 29).



**Figura 29:** Óculos de Realidade Virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5 Aplicação da Metodologia

Após conclusão dos tópicos anteriores, análise de artigos, dissertações, normas sobre treinamentos e operação de usinas nucleares e a elaboração de ambiente virtual, apresentamos uma proposta de uso da RV desenvolvida para fins de treinamento. Este ambiente virtual desenvolvido irá reproduzir e provocar a mesma dificuldade e desafios do ambiente real. Por fim, devemos testar e avaliar o ambiente virtual (simulador).

O ambiente virtual desenvolvido, além da visualização dos componentes, permite ainda interação com os mesmos, de forma que o profissional acione botoeiras e chaves, como no ambiente real, e em função disso as indicações fornecidas mudam seus status. Para a realização destas manobras o profissional deve fazer uso do manual específico do sistema, priorizando sempre a segurança.



Em uma usina nuclear, um dos grandes desafios, é a interpretação correta do que pode estar ou está acontecendo. Sendo assim, no ambiente virtual é possível recriar a dificuldade de leitura de instrumentos, dificuldade de comunicação (devido ao ruído ambiente), resposta esperada, entre outros desafios, como a prática das ferramentas de prevenção de erro humano de forma eficiente.

A manobra de comutação de bombas de óleo através do painel de comando local reproduz em grande parte este desafio, visto que é um ambiente com alto ruído, dificuldade de visualização de instrumentos e é necessária uma interpretação correta sobre as indicações no painel de comando local, caso contrário pode haver uma redução não programada de potência ou até mesmo um desligamento da planta. Desta forma, o ambiente virtual elaborado para o painel de comando local das bombas de óleo é altamente recomendado, pois reproduz fielmente os desafios citados anteriormente, além de que causa impacto na potência do Reator. Nos próximos tópicos serão apresentadas imagens da criação em ambiente virtual da sala das bombas de água de refrigeração principal, assim como o painel de comando local.

#### 4.4.5.1 Sala das bombas de água de refrigeração principal

Esta sala fica na estrutura da tomada principal, contém dois acessos para o seu interior. Esta sala contém diversos sistemas e equipamentos, entre eles seis bombas de água de refrigeração principal, (duas para cada condensador), doze bombas de óleo de lubrificante (duas para cada bomba principal), seis painéis elétricos de comando para as bombas de óleo lubrificante, tubulações e instrumentação associada (FIGURA 30). O operador precisa entrar nesta sala para realizar a manobras no painel de comando local para as bombas de óleo e assim permitir a operação da bomba principal.



**Figura 30:** Reprodução da sala das bombas de água de refrigeração principal no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5.2 Bomba da Água de Refrigeração Principal

Esta bomba faz parte do Sistema de Água de Refrigeração Principal. Este sistema é usado para fornecer a fonte fria ao condensador, que é o responsável por realizar a condensação do vapor proveniente da turbina ou do Sistema de Desvio de Vapor. Toda a água de refrigeração principal é proveniente da água do mar, a qual é retirada através da Estrutura de Tomada d'água e retornada para o mar novamente. A bomba da água de refrigeração principal é a principal responsável por esta tarefa de retirar a água do mar, enviá-la através dos condensadores para retornar ao mar novamente. Neste trajeto a água do mar que percorreu internamente os milhares de tubos dos condensadores, promoveu a condensação do vapor.

Esta bomba é do tipo tubular, vertical, com caixa redutora de velocidade e motor de alta tensão (FIGURA 31).



**Figura 31:** Reprodução da Bomba da Água de Refrigeração Principal no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5.3 Bomba de Óleo

Cada bomba da água de refrigeração principal é equipada com um subsistema de óleo de lubrificação, que supre todos os mancais lubrificados a óleo e a caixa redutora de velocidade, necessários a operação segura da bomba principal. Este subsistema de óleo, fica sob o gradeado do piso. Cada subsistema de óleo de lubrificação consiste de duas bombas de óleo, estando uma em prontidão (ARP10-60 AP002/003), um tanque de óleo (ARP10-60 BB001), filtro de óleo (ARP10-60 BT001) e manômetro associado (FIGURA 32).



**Figura 32:** Reprodução das bombas de óleo sob o gradeado do piso no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5.4 Manômetro

É um instrumento localizado na linha comum de descarga das bombas de óleo de lubrificação. Este instrumento fica sob o gradeado do piso. Apesar de permitir a visualização ao operador da pressão imposta pela operação das bombas de óleo, esta visualização não é de fácil acesso. Cabe ao operador interpretar de acordo com o manual específico e conforme sua observação local de demais parâmetros se a pressão está de acordo com o esperado ou não (FIGURA 33). Afim de simplificar e adequar o modelo virtual de forma simples e viável, o manômetro em ambiente virtual substituiu as funções dos pressostatos do ambiente real, ou seja, este manômetro virtual além de informar a pressão do sistema de óleo, também envia comandos para o painel elétrico das bombas de óleo de acordo com as pressões atingidas.



**Figura 33:** Reprodução do Manômetro no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5.5 Painel de Comando Local para as Bombas de Óleo

É o equipamento cuja finalidade é realizar manobras no subsistema de óleo lubrificante, como por exemplo, uma das manobras mais delicadas, a comutação entre as bombas de óleo. (FIGURA 34 e 35).



**Figura 34:** Reprodução dos painéis de comando para as bombas de óleo lubrificante no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 35:** Reprodução dos painéis de comando para as bombas de óleo lubrificante no ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

#### 4.4.5.6 Menu de mau funcionamento

É necessário que o operador siga uma sequência importante de informações fornecidas para determinar qual é o problema que está sendo enfrentado ou ainda concluir que não existe problema a ser enfrentado. Para isso foi elaborado um menu de maus funcionamentos, onde a sequência fundamental é: primeiro observar a pressão atual, atuar na chave de seleção (CHAVE Q4), observar novamente a pressão, observar o painel, formar opinião e tomar uma ação. (FIGURA 33, 35 e 36). As descrições do menu dos maus funcionamentos são descritas logo abaixo.



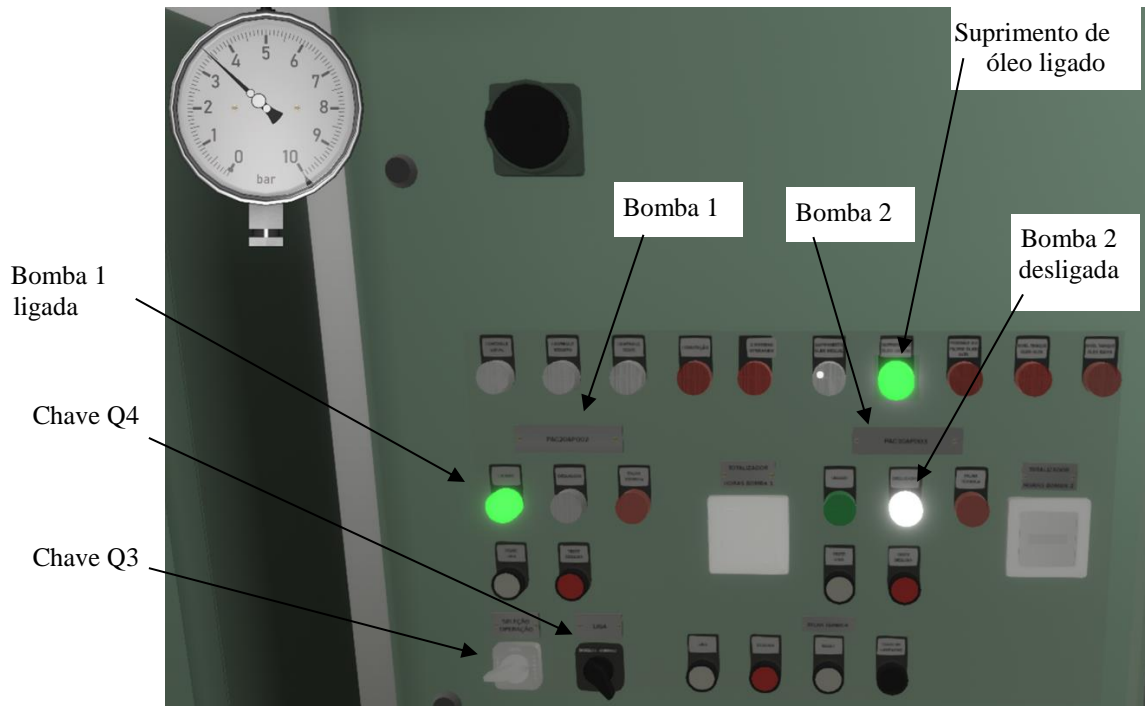
**Figura 36:** Menu de Maus Funcionamentos do ambiente virtual

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

### 1. Simular falha (falha elétrica)

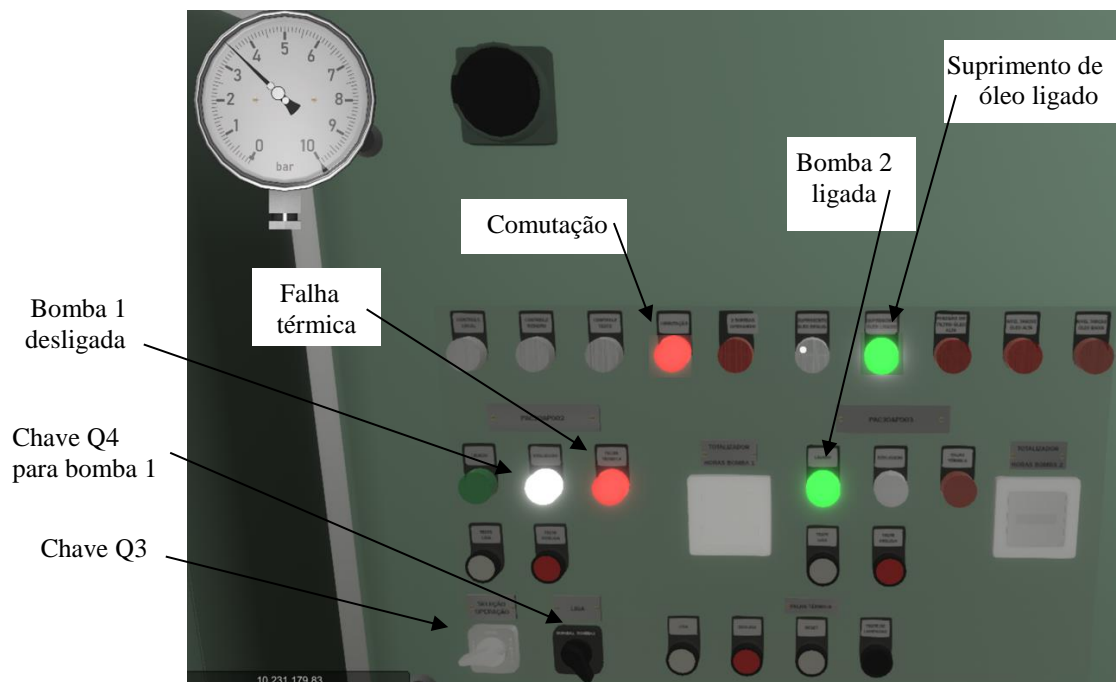
O objetivo desta simulação é reproduzir uma falha na bomba em operação e a partida da bomba reserva (FIGURAS 37 e 38). Foi simulado uma falha com atuação do relé térmico da bomba em operação ARP20AP002 (bomba 1). Com a pressão atingindo 2,5bar, a bomba ARP20AP003 (bomba2) entra em serviço automaticamente e neste caso ficarão acessas as lâmpadas “comutação” do painel; “falha térmica” e de “desligado” da bomba falhada, a lâmpada de “ligado” da bomba 2, ficará acesa. Ficam apagadas as lâmpadas de “ligado da bomba 1 e a de “desligado” da bomba 2 (FIGURA 38)

Quando o operador chegar no painel deverá confirmar que a bomba 2 está em serviço corretamente, verificar a pressão no instrumento ARP20CP502 sendo mantida em valor igual a pressão normal de trabalho e trocar a chave seletora Q4 para a bomba 2. Neste caso, não se faz necessário pressionar a botoeira de reset. Nas figuras abaixo é possível visualizar as indicações momentos antes da falha (FIGURA 37) e o momento logo depois (FIGURA 38). A chave seletora Q4 está na posição de bomba 1. Entretanto a pressão do sistema se manteve em 3,5bar



**Figura 37:** Bomba 1 momento antes da falha

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 38:** Falha na bomba 1, com sinalização de “falha térmica”, “comutação” e de “desligada” acesas, e de “ligada” apagada. Sinalização de “ligada” para a bomba 2 acesa, e chave seletora Q4 ainda na posição para a bomba 1

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

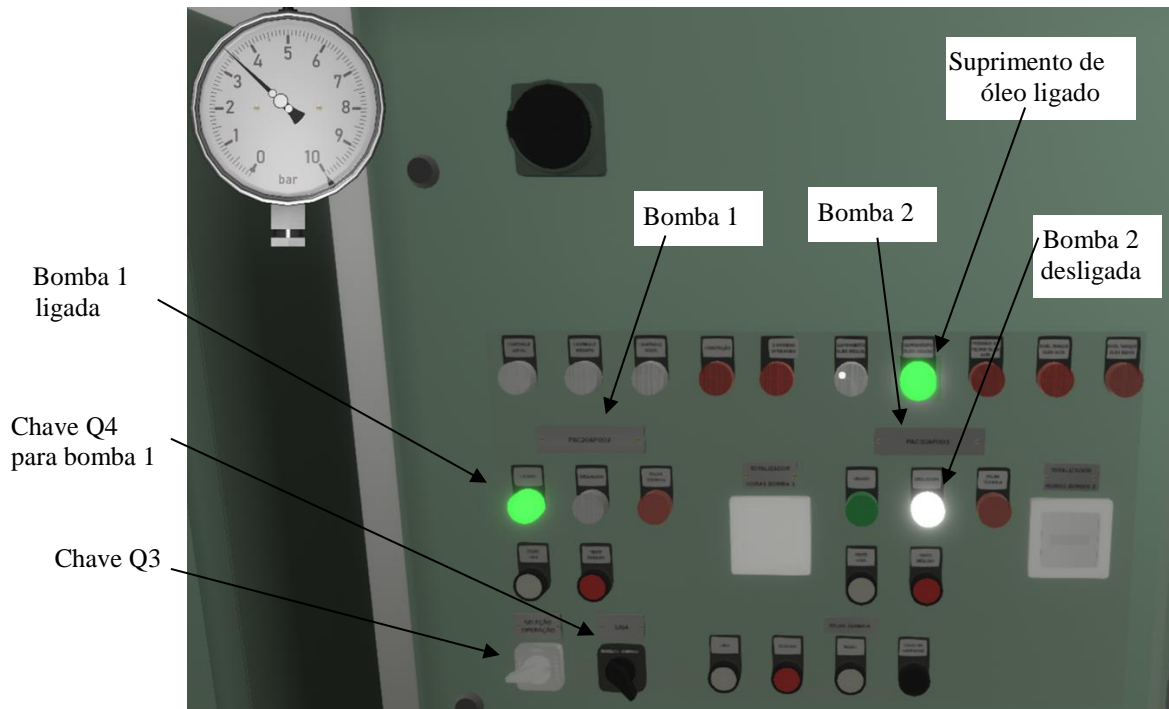


**2. Simular baixa (baixa eficiência ou qualquer outro motivo que a bomba em serviço não sustente a pressão na linha de suprimento de óleo).**

Bomba 1 operando- ARP20AP002 (baixa eficiência)

Bomba 2 prontidão – ARP20AP003

Esta simulação tem por objetivo reproduzir uma baixa eficiência da bomba em operação. Esta bomba apresenta baixa eficiência e em 2,5 bar a bomba reserva parte automaticamente (FIGURAS 39, 40 e 41). A pressão momentos antes da baixa eficiência da bomba 1, encontra-se em 3,5 bar (FIGURA 39). Ao inserir a simulação de baixa eficiência, ela é reduzida gradativamente (FIGURA 40). Com a pressão ficando menor que 2,5bar, a bomba 2 entra em serviço e fica acesa a lâmpada “2 bombas operando” e a pressão fica acima de 2,5 bar (FIGURA 41). O operador deverá confirmar a bomba 2 em serviço, verificar a pressão no instrumento ARP20CP502 sendo mantida em valor maior ou igual a pressão de trabalho e trocar a chave seletora Q4 para a bomba 2. Somente após 1 minuto pressionar a botoeira reset. Se o operador pressionar a botoeira de “RESET” antes de trocar a seleção da bomba, mantendo selecionada a bomba com baixa eficiência, a bomba “boa” será desligada enquanto a botoeira permanecer pressionada. Ao soltar o reset, a bomba “boa” será religada, mas talvez já seja o suficiente para desarmar a bomba principal por pressão menor que 1,5 bar. Se o operador pressionar a botoeira de “reset” após trocar a seleção da bomba, mas antes do 1 minuto, os alarmes serão apagados enquanto a botoeira permanecer pressionada. Ao soltar o reset, as lâmpadas de falha vão acender novamente.



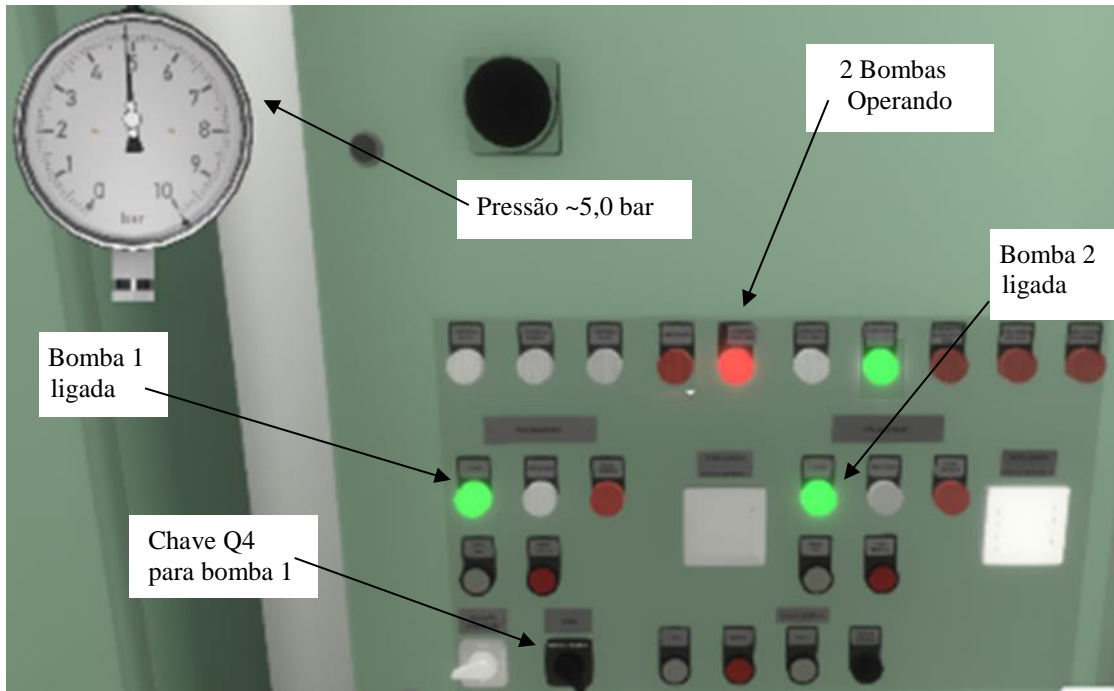
**Figura 39:** Bomba 1 ligada, momentos antes da baixa eficiência. Pressão no manômetro 3,5 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e bomba 2 desligada, chave seletora Q4 posição para bomba 1

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 40:** Bomba 1 ligada. Baixa eficiência em andamento. Pressão do manômetro reduzindo e chegando em aprox. 2,6 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e bomba 2 desligada, chave seletora Q4 posição para bomba 1

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 41:** Baixa eficiência na bomba 1. Partida automática da bomba 2 em prontidão – Sinalização de bomba 1 e 2 ligadas. Pressão do manômetro em aproximadamente 5,0 bar. Sinalização de duas bombas operando e chave seletora Q4 na posição para bomba 1

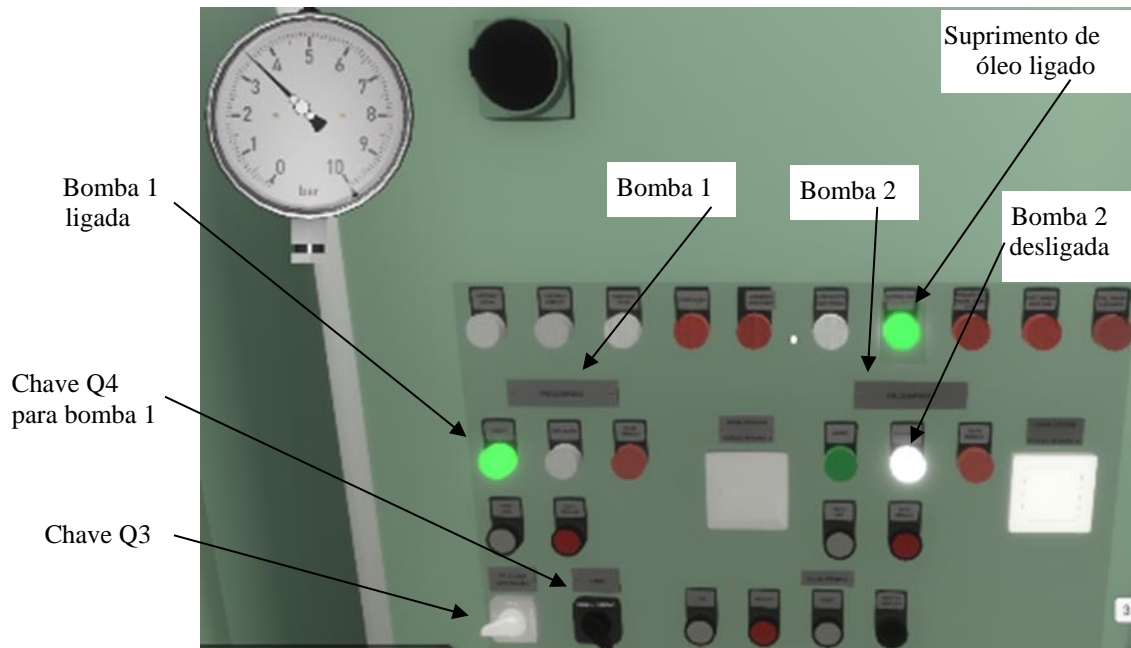
**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

### 3. Comutação comum (comutação manual com sucesso)

Esta simulação tem por objetivo proporcionar um reconhecimento de que está tudo dentro da normalidade esperada, em uma comutação manual da bomba ARP20AP002 (bomba 1) para a ARP20AP003 (bomba 2).

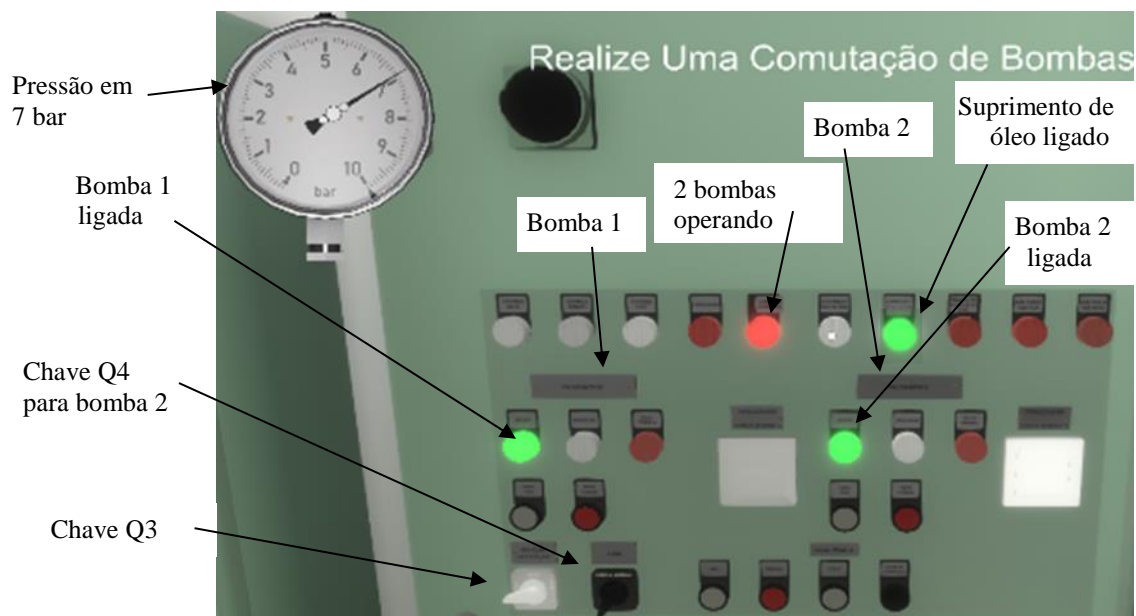
Momentos antes, a bomba 1 está em operação, a pressão indicada no manômetro em 3,5 bar e chave seletora na posição de bomba 1 (FIGURA 42). Então, para execução da comutação manual, basta virar a chave seletora Q4 para a posição de bomba 2.

Com as duas bombas ligadas, a pressão de descarga no instrumento ARP20CP502 atingirá um valor maior que 5,8 bar e será sinalizado que existem “2 bombas operando” no painel local (FIGURA 43). O operador deverá aguardar o desligamento automático da bomba 1 em até 20s. Após isto ocorrer a sinalização de 2 bombas operando permanece acesa, a sinalização da bomba 1 de ligada é apagada e a de desligada é acesa. Apenas a bomba 2 permanece em operação com sua sinalização de ligada acesa e a pressão indicada no manômetro retorna ao valor inicial de 3,5 bar (FIGURA 44). Então acionar o botão reset para que a indicação de 2 bombas operando seja apagada. Não é necessário aguardar 1 minuto.



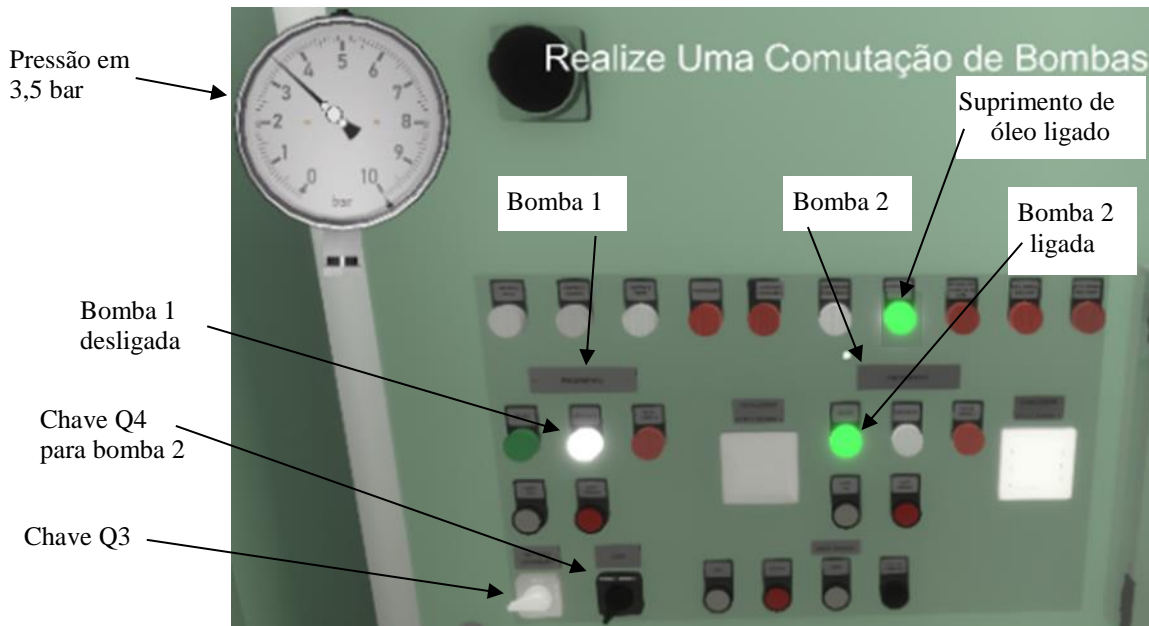
**Figura 42:** Bomba 1 ligada. Pressão do manômetro em 3,5 bar. Sinalização de bomba 1 ligada e chave seletora Q4 na posição para bomba 1

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 43:** Bomba 1 e 2 ligada. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 44:** Bomba 2 ligada. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2. Pressão do manômetro em 3,5bar. Sinalização da bomba 2 ligada e bomba 1 desligada. Comutação com Sucesso.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

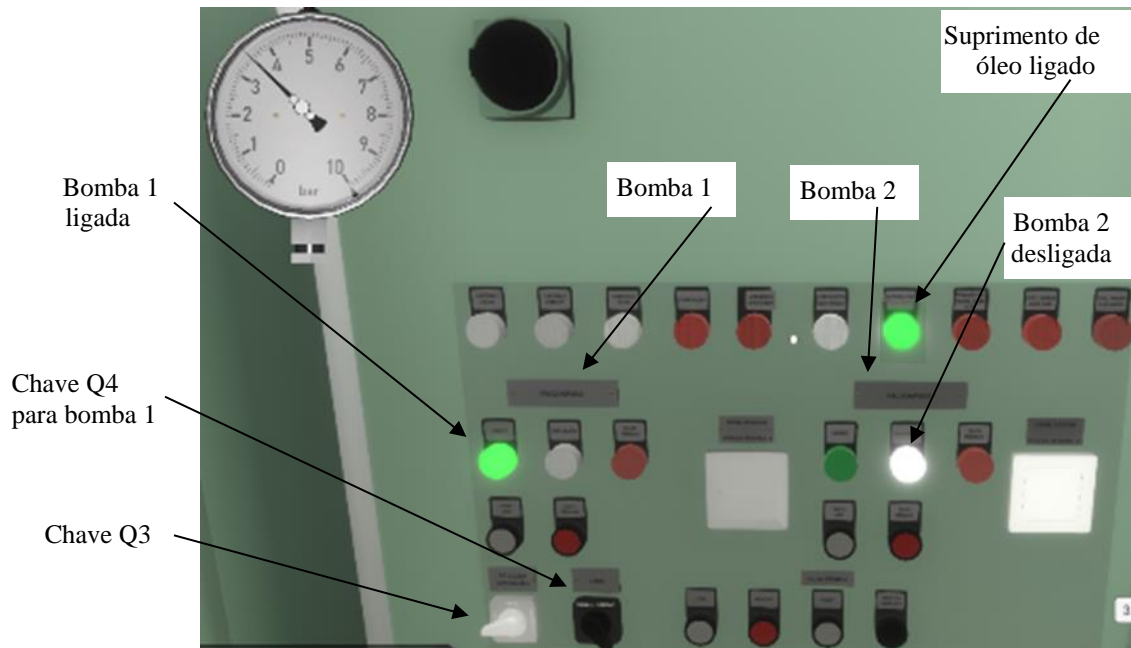
#### 4. Simular com. falha (comutação manual “sem sucesso”)

Esta simulação reproduz uma falha na partida da bomba de prontidão, em uma comutação operacional da bomba ARP20AP002 (bomba 1) para a ARP20AP003 (bomba 2)

Momento antes da comutação manual, a pressão do manômetro encontra-se em 3,5 bar e a chave seletora Q4 para a bomba 1. A sinalização de bomba 1 ligada e a de bomba 2 desligada estão acesas (FIGURA 45).

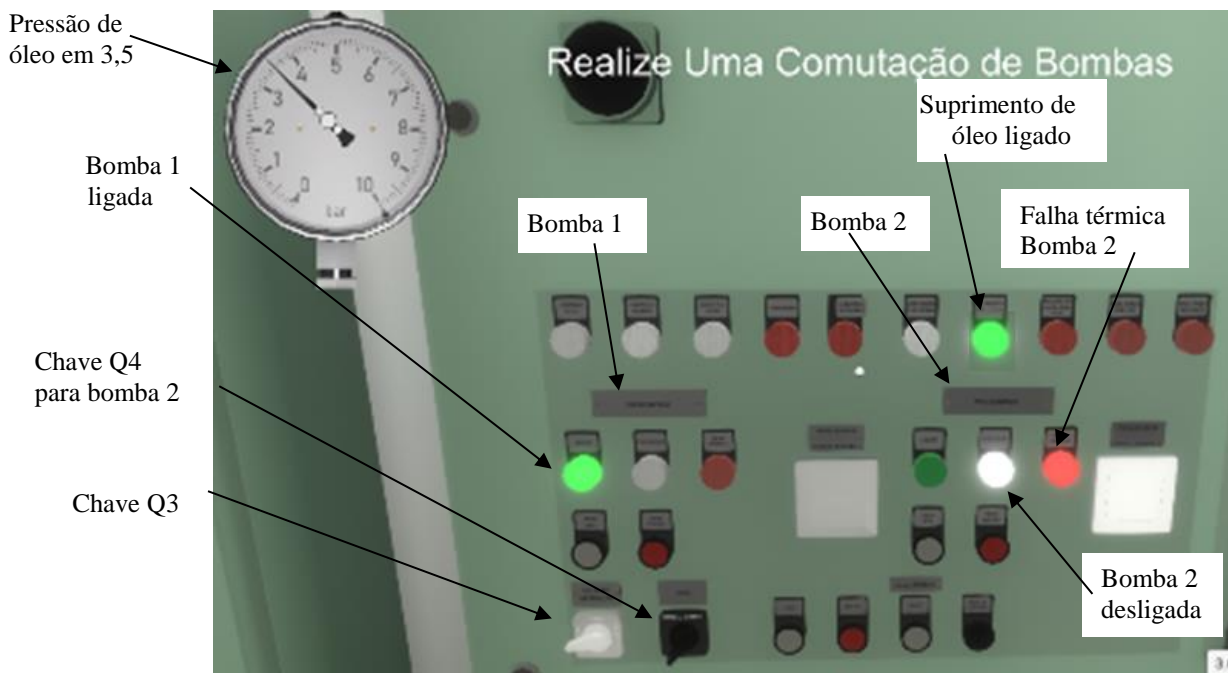
Para realizar a comutação manual, basta virar a chave seletora Q4 para a posição de bomba 2.

Com a falha na partida da bomba 2, sua lâmpada de falha térmica acenderá. A bomba 1 continua sinalizando que está ligada, a pressão de descarga no instrumento ARP20CP502 mantém-se em 3,5 bar, não atingindo o valor esperado de 7,0 a 8,0 bar (FIGURA 46). O operador deve aguardar um tempo, mas não mais que 20 segundos para confirmar esta informação. A comutação deve então ser cancelada retornando a chave de seleção para a “bomba 1” que estava em operação inicialmente. Somente após 1 minuto pressionar a botoeira reset. A bomba 2 será então desligada e os alarmes “reseteados”, permanecendo a bomba 1 em serviço.



**Figura 45:** Bomba 1 ligada. Momentos antes da comutação manual. Chave seletora Q4 na posição bomba 1. Pressão do manômetro em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 46:** Bomba 1 ligada. Chave seletora Q4 comutada para bomba 2. Pressão do manômetro mantida em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada. Sinalização de falha acesa para a bomba 2. Comutação manual sem sucesso.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

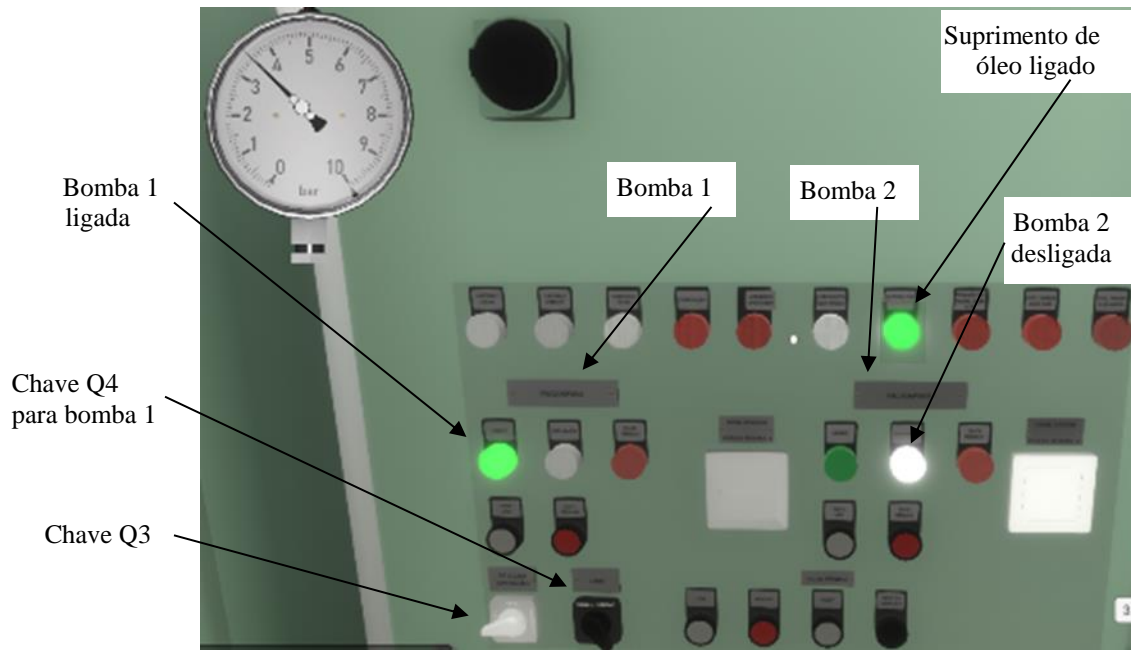
## **5. Simular com. Baixa (baixa eficiência)**

Bomba 1 operando – ARP20AP002

Bomba 2 prontidão – ARP20AP003 (baixa eficiência)

Esta simulação reproduz uma baixa eficiência da bomba que estava em prontidão, ou seja, ela parte, mas logo em seguida sua pressão tende a cair, evidenciando sua baixa eficiência.

Momentos antes da comutação manual a bomba 1 está ligada e a pressão indicada no manômetro está em 3,5 bar, e a chave seletora Q4 posicionada para a bomba 1 (FIGURA 47). Ao realizar a comutação manual é esperado que a pressão estabilize em torno de 7,0 a 8,0 bar em alguns segundos, que a lâmpada de “2 bombas operando” fique acesa e que a sinalização da bomba 2 “ligada” também fique acesa (FIGURA 48). O operador deverá confirmar que a bomba 2 entrou em serviço e perceber que a pressão no ARP20CP502 não está sendo mantida em valor correspondente a duas bombas operando, que é 7,0 a 8,0 bar (FIGURA 48). Na verdade, está diminuindo gradativamente a partir deste valor (FIGURA 49). O operador deve avaliar e interpretar que a bomba 2 que estava em prontidão está com baixa eficiência, observando a queda de pressão no manômetro (FIGURA 49) e retornar à seleção de botoeira para a bomba 1 novamente, antes de 20s. Somente após 1 minuto pressionar a botoeira “RESET”. Se o operador pressionar a botoeira de “RESET” antes de trocar a seleção da bomba, mantendo selecionada a bomba com baixa eficiência, a bomba “boa” será desligada enquanto a botoeira permanecer pressionada. Ao soltar o reset, a bomba “boa” será religada, mas talvez já seja o suficiente para desarmar a bomba principal por pressão menor que 1,5 bar. Se o operador pressionar a botoeira de “RESET” após trocar a seleção da bomba, mas antes do 1 minuto, os alarmes serão apagados enquanto a botoeira permanecer pressionada. Ao soltar o “RESET”, as lâmpadas de falha vão acender novamente.



**Figura 47:** Bomba 1 ligada. Momentos antes da comutação manual. Chave seletora Q4 na posição bomba 1. Pressão do manômetro mantida em 3,5bar. Sinalização da bomba 1 ligada e bomba 2 desligada.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)



**Figura 48:** Comutação manual em andamento. Chave seletora Q4 comutada para posição bomba 2. Sinalização acesa de bomba 1 e 2 ligadas. Sinalização acesa de 2 bombas operando. Sinalização de falha apagada. Pressão do manômetro em 6,5bar e reduzindo

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)





**Figura 49:** Comutação manual em andamento. Chave seletora Q4 continua comutada para posição bomba 2. Sinalização acesa de bomba 1 e 2 ligadas. Sinalização acesa de 2 bombas operando. Sinalização de falha apagada. Pressão do manômetro em 5,2bar e reduzindo.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

Em todas as cinco simulações, se o operador não interpretar corretamente o que está ocorrendo no painel e no manômetro, a bomba principal irá desligar, pelo critério de pressão menor que 1,5bar (FIGURA 50).



**Figura 50:** Mensagem de falha total do sistema de óleo da Bomba Principal.

**Fonte:** Captura de tela do autor (2021)

A modelagem desenvolvida não é apenas estática, não são apenas fotos, elas possuem um comportamento dinâmico que permitem um treinamento.

## 4.5 AVALIAÇÃO

Foi apresentado o ambiente virtual aos operadores e instrutores enfatizando que o mesmo foi criado para reproduzir o ambiente real tanto no aspecto visual e sonoro, quanto nos aspectos funcionais. Nos aspectos visuais a modelagem, e nos aspectos funcionais na programação das funcionalidades reais. O objetivo, neste primeiro momento para os operadores e os instrutores, foi realizarem uma avaliação dos objetos e do ambiente como um todo.

Depois, foi solicitado executar a operação de comutação prevista no MOU, as quais contemplavam cinco situações. Dessa forma eles puderam experimentar os problemas vividos, uma vez que foram construídos o ambiente real e as funcionalidades da operação da bomba no ambiente virtual. Estas 5 situações são:

1-Simular falha – Que é a bomba em operação falhar por algum motivo A bomba em operação simplesmente falha e a reserva parte. O operador deve reconhecer esta falha, e configurar de forma correta o painel para esta nova situação.

2-Simular Baixa Eficiência - A bomba em operação apresenta baixa eficiência e em 2,5 bar indicados no manômetro a bomba reserva parte automaticamente. O operador deve reconhecer esta falha, e configurar de forma correta o painel para esta nova situação.

3 – Comutação Comum- reconhecer que está tudo bem.

4- Simular com Falha - Ao realizar a comutação, a bomba em prontidão é que não parte, o que pode ser observado no manômetro. É uma falha na partida da bomba de prontidão. O operador deve reconhecer esta falha e tomar as ações necessárias para que não ocorra o desarme da bomba principal.

5- Simular comutação com baixa - A eficiência da bomba de prontidão é inadequada. A bomba em prontidão parte, mas sua eficiência é reduzida e pode ser percebida pela queda gradativa de pressão no manômetro. O operador deve reconhecer esta falha e tomar as ações necessárias para que não ocorra o desarme da bomba principal.

Desta forma os profissionais que participaram da avaliação executaram as manobras esperadas do ambiente real no ambiente virtual. Após esta experimentação, foi feita uma avaliação chamando esses profissionais. Estes profissionais na área nuclear foram separados em 3 grupos. Lembrando que para cada grupo foi apresentado o ambiente simulado. O indivíduo usou o ambiente virtual, experimentando cinco situações diferentes. Depois que todos fizeram a experimentação, foi passado um questionário de avaliação.

## CAPÍTULO 5

### 5 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO

Este capítulo apresenta o método de avaliação utilizando a escala Likert para validar o ambiente virtual criado.

#### 5.1 ESCALA LIKERT

É uma escala psicométrica usada por pesquisadores com o objetivo de avaliar a opinião e as atitudes de um grupo de indivíduos. Este método apura os resultados da aplicação de um questionário que leva o indivíduo que está respondendo a refletir sobre os diferentes aspectos do objeto analisado, esse utiliza uma escala para medir o grau de sua concordância para com as afirmações feitas a respeito do assunto em questão (ASSIS, 2020 e MARINS, 2018). O formato típico da escala possui cinco graus de opinião conforme abaixo:

- 1- Discordância integral,
- 2- Discordância parcial,
- 3- Indiferente
- 4- Concordância parcial
- 5- Concordância integral.

O estudo por meio desta escala comprova que o objeto analisado está de acordo com a realidade do produto colocado em avaliação de maneira que esteja de forma homogênea (ASSIS, 2020 e MARINS, 2018).

O uso da escala Likert possui como vantagem principal a facilidade de sua construção, e por ter grande probabilidade de produzir medidas confiáveis. A escala Likert com o decorrer dos anos, ganhou espaço na produção científica de informações confiáveis, pois possui também relativamente um peso importante para validação do objeto colocado em questão gerando críticas que podem colaborar nas melhorias deste mesmo objeto. A desvantagens é a tendência central, se os respondentes evitarem categorias de respostas extremas, dificuldade de

reprodutibilidade e sua validade pode ser de difícil demonstração (ASSIS, 2020 e MARINS, 2018).

## 5.2 ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO

Foi elaborado um questionário padrão cujo objetivo foi de avaliar de forma independente o uso desta ferramenta em sistemas de uma usina nuclear. Para isso foram convidados profissionais que atuam diariamente na operação segura de uma usina nuclear, a preencherem o questionário, e fornecerem as suas opiniões sobre a utilização desta ferramenta como auxílio para treinamento dos cursos existentes ou até futuros.

O Apêndice A contém o questionário com treze perguntas divididas em três categorias, são elas:

- A categoria 1 está relacionada às perguntas 1, 2 e 3, trata da reprodução física do ambiente e equipamentos, afim de reproduzir as manobras que devem ser efetuadas através do manual específico do sistema da bomba de água da refrigeração principal de uma usina nuclear.
- A categoria 2 está relacionada às perguntas 4, 5, 6 e 7, tem foco na funcionalidade da operação das bombas, reproduz os desafios que envolvem as manobras reais.
- A categoria 3 está relacionada às perguntas 8, 9, 10, 11, 12 e 13 aborda a viabilidade de um modelo virtual para simular treinamentos diversos dos avaliadores.

## 5.3 PÚBLICO ALVO

Afim de saber a efetividade da ferramenta proposta, foi realizada uma breve apresentação para diversos profissionais de uma usina nuclear. Todos possuem conhecimento sobre o sistema envolvido. Estes profissionais foram divididos em três grupos, sendo o primeiro grupo formado por operadores de campo. São profissionais que atuam diretamente nos painéis locais, realizando manobras quando demandados pela sala de controle. A opinião deste grupo é de grande relevância pois são eles que estão à frente das operações propostas em ambiente virtual, cujo objetivo é se aproximar ao máximo do ambiente real. O segundo grupo é composto pela equipe de sala de controle. Nesta equipe encontram-se profissionais que possuem a licença para operar a sala de controle. Todos os seus participantes possuem licença de operação ativa

seguindo os requisitos preconizados em norma CNEN 1.01 de 30 de abril de 2014. Esta equipe é composta principalmente por quatro postos de trabalho. Supervisor de Turno, Encarregado de Turno e dois Operadores de Painel Principal da Sala de Controle. A função de Supervisor de Turno é formada por Gerentes, Chefes de Departamento e Engenheiros. A função de Encarregado de Turno é formada por Engenheiros e Técnicos. A função de Operadores de Painel Principal da Sala de Controle é constituída de Técnicos. Esta equipe é a responsável direta por manter a usina operando de forma segura, atuando diretamente no controle do reator. Todos deste grupo são detentores de licença de operação de usina nuclear como OSR ou OR de acordo com a norma CNEN 1.01. Esta equipe de Sala de Controle fornece a demanda de manobras para o campo, atuando sempre de forma conjunta. Este grupo pode fornecer o ponto de vista da Sala de Controle sobre quais são os desafios impostos em cada tarefa de forma global, assim como, o que cada tarefa pode influenciar diretamente na operação segura da usina. Ao menor sinal de ameaça a segurança do reator, medidas são adotadas, para que o mesmo sempre permaneça seguro.

O terceiro grupo é formado por instrutores experientes de Simulador de Sala de Controle, cuja formação é a de no mínimo, nível superior. São detentores de licença ativa de sala de controle cumprindo os requisitos da norma CNEN 1.01. Os participantes deste grupo por vezes integram equipes de turno na sala de controle desempenhando todas as funções correlatas inerentes as funções de sala de controle. Este grupo é o responsável por aplicar treinamentos em simulador e no campo. Este grupo foi escolhido com o propósito de avaliar se é pertinente uma abordagem de simulação de outros ambientes que não o de sala de controle, que envolvam além do conhecimento técnico requerido, os aspectos da performance humana de cada indivíduo e desta forma realmente saber se as operações propostas no ambiente virtual, ajudam no discernimento e produzem um treinamento mais significativo.

Inicialmente foi feita uma reunião com cada grupo, lembrando experiências operacionais e dificuldades impostas ao treinamento prático no local.

Em seguida foi apresentado o objetivo da simulação em ambiente virtual e aberto o programa de realidade virtual, onde foi feito uma demonstração dos recursos que existem e foi explicado os comandos dos consoles, assim como, o menu de operações contempladas para simular a situação real. Logo após, foi pedido aos profissionais que usassem a ferramenta de forma individualizada para que experimentassem a imersão no ambiente criado. Então, após o uso da ferramenta em ambiente virtual, foi pedido que os profissionais respondessem o questionário de avaliação.

## CAPÍTULO 6

Este capítulo apresenta os resultados e análises do método likert utilizados na avaliação da ferramenta proposta.

### 6 RESULTADOS

Para que o sistema ARP cumpra a sua função esperada, diversas etapas precisam estar realizadas. Nesta dissertação foi destacado um trecho de suma importância para seu funcionamento. É o trecho que faz parte do sistema de óleo lubrificante da bomba principal. Onde as principais operações (conforme o Manual específico) são a partida, a parada do sistema de óleo e principalmente a comutação entre as bombas de óleo lubrificante com a bomba principal em funcionamento. O resultado deste trabalho foi a construção de um ambiente virtual para simular uma manobra de comutação no painel de comando das bombas de óleo da bomba da água de refrigeração principal, como uma ferramenta para auxiliar no treinamento. O treinamento pode ser feito tantas vezes quanto achar necessário, até que a interpretação dos instrumentos e habilidade mínima exigida ao profissional, seja adquirida para a realização correta das manobras mais importante.

#### 6.1 AVALIAÇÃO PELA ESCALA LIKERT

Foi feita análise de acordo com a escala Likert, dos 3 grupos:

Grupo 1 – Grupo de Operadores de Campo. Foram obtidas as respostas de 13 questionários cujos resultados são exibidos na tabela 2.

Grupo 2 – Grupo de Operadores de Sala de controle. Foram obtidas as respostas de 7 questionários cujos resultados são exibidos na tabela 3.

Grupo 3 – Grupo de Instrutores de Simulador. Foram obtidas as respostas de 6 questionários cujos resultados são exibidos na tabela 4.

Estas tabelas possuem a seguinte legenda para as respostas:

DI: Discordo integralmente;

DP: Discordo parcialmente;

NCND: Não concordo nem discordo;

CP: Concordo parcialmente;

CI: Concordo integralmente.

**Tabela 2 - Resultado do Questionário – Grupo 1 – Operadores de Campo**

Número da questão	DI	DP	NCND	CP	CI
1	0	0	0	4	9
2	0	0	0	2	11
3	0	0	1	1	11
4	0	1	1	1	10
5	0	0	0	7	6
6	0	0	0	3	10
7	0	0	4	2	7
8	0	0	0	6	7
9	0	0	0	2	11
10	0	0	6	5	2
11	0	0	0	5	8
12	0	0	5	3	5
13	0	0	0	0	13

**Tabela 3 - Resultado do Questionário – Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle**

Número da questão	DI	DP	NCND	CP	CI
1	0	0	0	0	7
2	0	0	0	0	7
3	0	0	1	1	5
4	0	0	1	2	4
5	0	0	0	3	4
6	0	0	0	0	7
7	0	0	0	1	6
8	0	0	0	2	5
9	0	0	0	1	6
10	0	0	0	3	4
11	0	0	0	3	4
12	0	0	0	3	4
13	0	0	0	1	6

**Tabela 4 - Resultado do Questionário – Grupo 3 – Instrutores de Simulador**

Número da questão	DI	DP	NCND	CP	CI
1	0	0	0	3	3
2	0	0	0	3	3
3	0	0	0	2	4
4	0	0	0	3	3
5	0	0	1	3	2
6	0	0	0	3	3
7	0	0	2	1	3
8	0	0	0	2	4
9	0	0	0	0	6
10	0	0	0	2	4
11	0	0	0	1	5
12	0	0	2	1	3
13	0	0	0	0	6

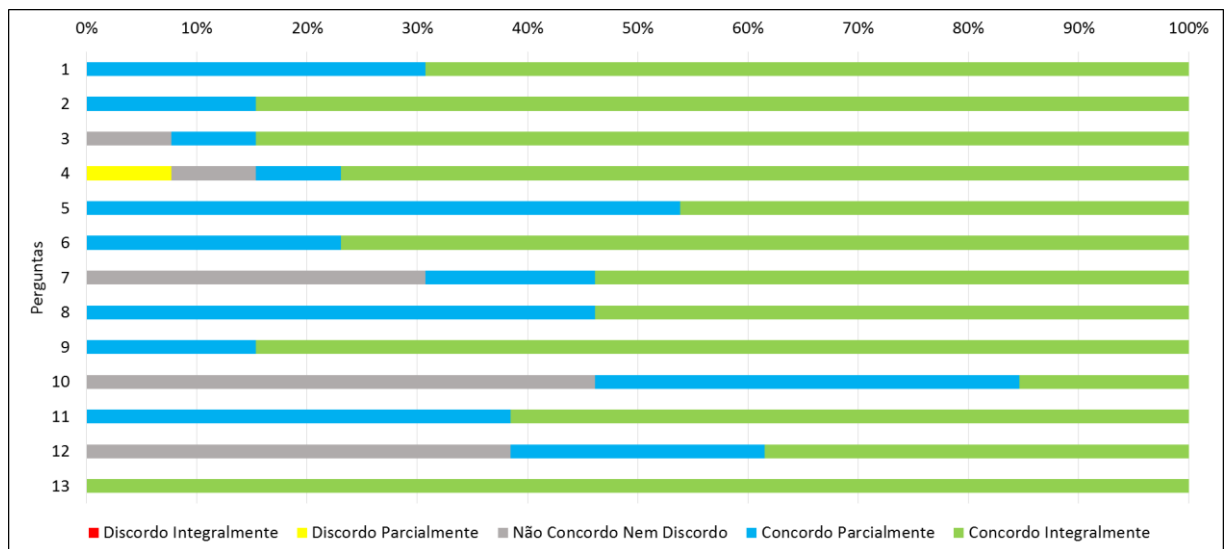
## 6.2 RESULTADO DA ESCALA LIKERT

Logo abaixo são apresentados os gráficos criados a partir da escala Likert para os três grupos avaliados, sendo:

Grupo 1 – Operadores de Campo de Usina Nuclear (FIGURA 51)

Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle de Usina Nuclear (FIGURA 52)

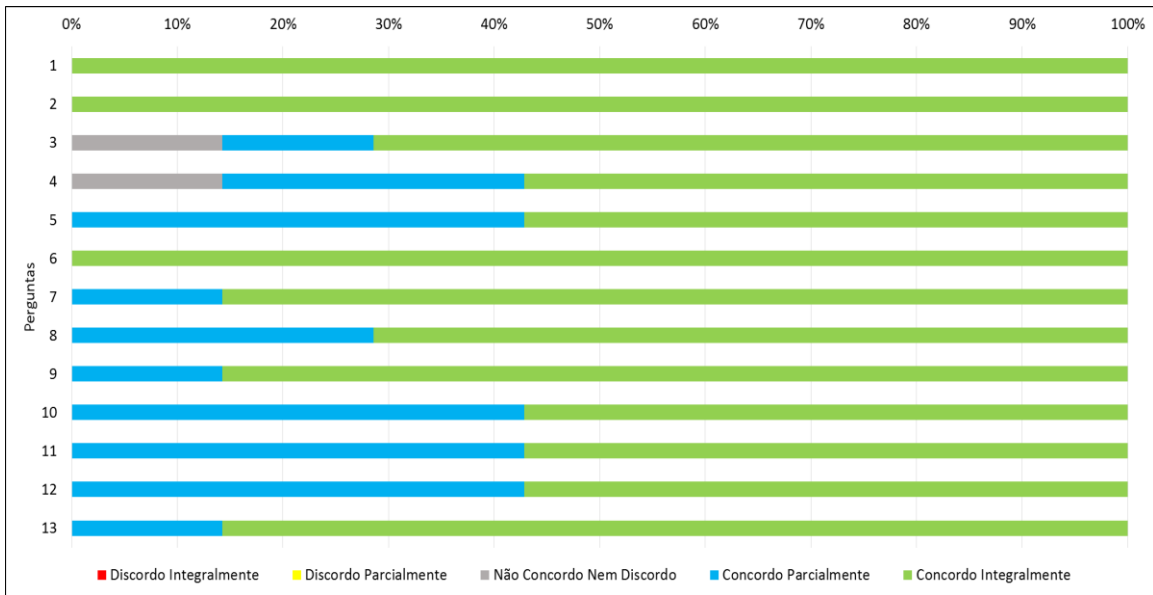
Grupo 3 – Instrutores de Simulador de Sala de controle de Usina Nuclear (FIGURA 53)



**Figura 51:** Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 1 – Operadores de Campo

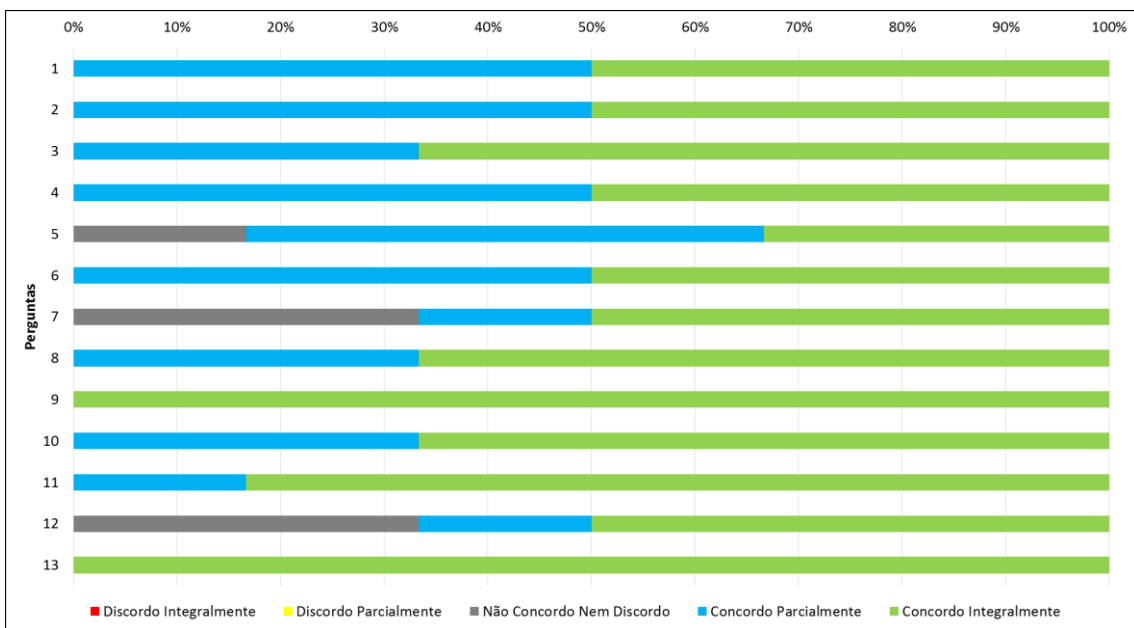
**Fonte:** O autor (2021)





**Figura 52:** Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle

**Fonte:** O autor (2021)



**Figura 53:** Gráfico do Resultado da Escala Likert – Grupo 3 Instrutores de Simulador de Usina Nuclear

**Fonte:** O autor (2021)

## CAPÍTULO 7

Este capítulo apresenta uma discussão sobre trabalhos relacionados e a avaliação dos resultados de cada grupo de acordo com a escolha das respostas dos questionários.

### 7 DISCUSSÕES

Foi feita a avaliação do resultado de cada grupo de acordo com a escolha das respostas, como citado anteriormente.

Através da Escala Likert, foi reforçado a percepção que o ambiente virtual é útil para simulação e treinamento de profissionais no que diz respeito ao painel de comandos das bombas de óleo lubrificante da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear. A avaliação de cada um dos grupos foi documentada, e os comentários e sugestões foram transcritos e estão apresentados no Apêndice B. A seguir será apresentado a avaliação dos gráficos gerados por cada grupo:

#### **- Avaliação do gráfico da Figura 51- Grupo 1 – Operadores de Campo.**

##### 1. Reprodução física do ambiente e equipamentos (perguntas 1,2 e 3):

Observando-se a preferência por respostas positivas nos gráficos, pode-se concluir que os participantes concordaram que a reprodução física do ambiente e equipamentos no ambiente virtual reproduz com fidelidade o ambiente real. É importante destacar que o grupo 1 concorda quase que na totalidade sobre a fidelidade do ambiente. Entretanto, este grupo também foi o que produziu mais variações nos critérios de avaliação.

Vale ressaltar que este grupo é o que diariamente faz leituras e rondas no local que foi reproduzido no ambiente virtual. Este grupo é o que detêm grande conhecimento detalhado de todas as manobras envolvidas neste painel assim como os detalhes dos equipamentos envolvidos. Sendo assim a opinião deste grupo é de grande relevância.

##### 2. Funcionalidade da operação das bombas e reprodução dos desafios que envolvem as manobras reais (perguntas 4, 5, 6 e 7):

Apesar da preferência por repostas positivas de todos os grupos que concordam com a metodologia proposta para o treinamento em ambiente virtual, o grupo 1 foi o que apresentou

uma pequena parcela de discordância. Ainda assim, eles demonstraram ser favoráveis, pois identificaram que o modelo virtual representa o ambiente real. Afirmaram ainda que as funcionalidades estão bem colocadas e que pode ser usada para treinamento, mesmo tendo essas variações.

### 3. Viabilidade de um modelo virtual para simular treinamentos diversos (perguntas 8, 9, 10, 11, 12 e 13):

Ao analisar o gráfico deste grupo pode-se concluir que os respondentes concordam com a viabilidade do modelo virtual, entretanto, tiveram menor preferência por respostas positivas em relação aos outros dois grupos. Neste grupo, mesmo com percentual aproximado de indiferença de 48% na pergunta 10, ainda assim, 100% recomenda que seja feita um treinamento no ambiente virtual antes do ambiente real. É necessário ressaltar que este grupo não possui o mesmo conhecimento e acesso a informações de custos envolvidos que os demais grupos, os quais possuem também como integrantes, gerentes e chefes de departamentos. O grupo 1 tem o foco na área operacional e se preocupam exclusivamente com a boa operação dos diversos equipamentos e sistemas de campo.

#### **- Avaliação do gráfico da Figura 52- Grupo 2 – Operadores de Sala de controle**

##### 1. Reprodução física do ambiente e equipamentos (perguntas 1,2 e 3):

A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes concordaram de forma positiva com a reprodução física do ambiente e equipamentos. Este grupo não promove verificações e rondas diárias do sistema proposto, mas sim a verificação diária de parâmetros associados na sala de controle. Por este motivo, alguns dos entrevistados responderam positivamente, pois o ambiente virtual ajudou a visualizar o ambiente real.

##### 2. Funcionalidade da operação das bombas e reprodução dos desafios que envolvem as manobras reais (perguntas 4, 5, 6 e 7):

A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes concordaram com a metodologia sugerida para treinamento em ambiente virtual, e tiveram maior preferência por respostas positivas do que os demais grupos. É importante ressaltar que todos deste grupo, participam de treinamentos em simulador e experimentam situações, desafios e repetições de manobras. A possibilidade de reproduzir algo similar para outros profissionais de campo é observada de forma única por este grupo, já que os participantes do grupo 2 já utilizam os benefícios de treinar em simulador.

3. Viabilidade de um modelo virtual para simular treinamentos diversos (perguntas 8, 9, 10, 11, 12 e 13):

A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes concordaram com a viabilidade do modelo virtual, e tiveram maior preferência por respostas positivas do que os outros grupos. É importante ressaltar que este grupo está familiarizado com atividades administrativas e treinamento em simulador, e pode ter uma ideia melhor sobre os custos e vantagens deste treinamento. Ressalta-se ainda que este grupo possui o foco principal na operação segurança do reator, porém também é um grupo que busca a excelência em todas as áreas da planta. Desta forma a opinião deste grupo na categoria 3 do questionário possui ainda mais relevância.

**- Avaliação do gráfico da Figura 53- Grupo 3 – Instrutores de Simulador:**

1. Reprodução física do ambiente e equipamentos (perguntas 1,2 e 3):

A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes concordaram de forma positiva com a reprodução física do ambiente e equipamentos.

2. Funcionalidade da operação das bombas e reprodução dos desafios que envolvem as manobras reais (perguntas 4, 5, 6 e 7):

A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes concordaram com a metodologia proposta para o treinamento em ambiente virtual. Ressalta-se que este grupo é o que está mais apto a responder esta categoria, visto que os mesmos são responsáveis pelos treinamentos e retreinamentos do pessoal da sala de controle. A afinidade deste grupo com esta categoria pode ser observada pela grande quantidade e riqueza das sugestões e comentários, que dizem respeito a treinamentos. Em vista disso a opinião deste grupo é de grande relevância e pode ser aproveitada em outros trabalhos, como o desta dissertação.

3. Viabilidade do modelo virtual para simulação e treinamento (perguntas 8, 9, 10, 11, 12 e 13):

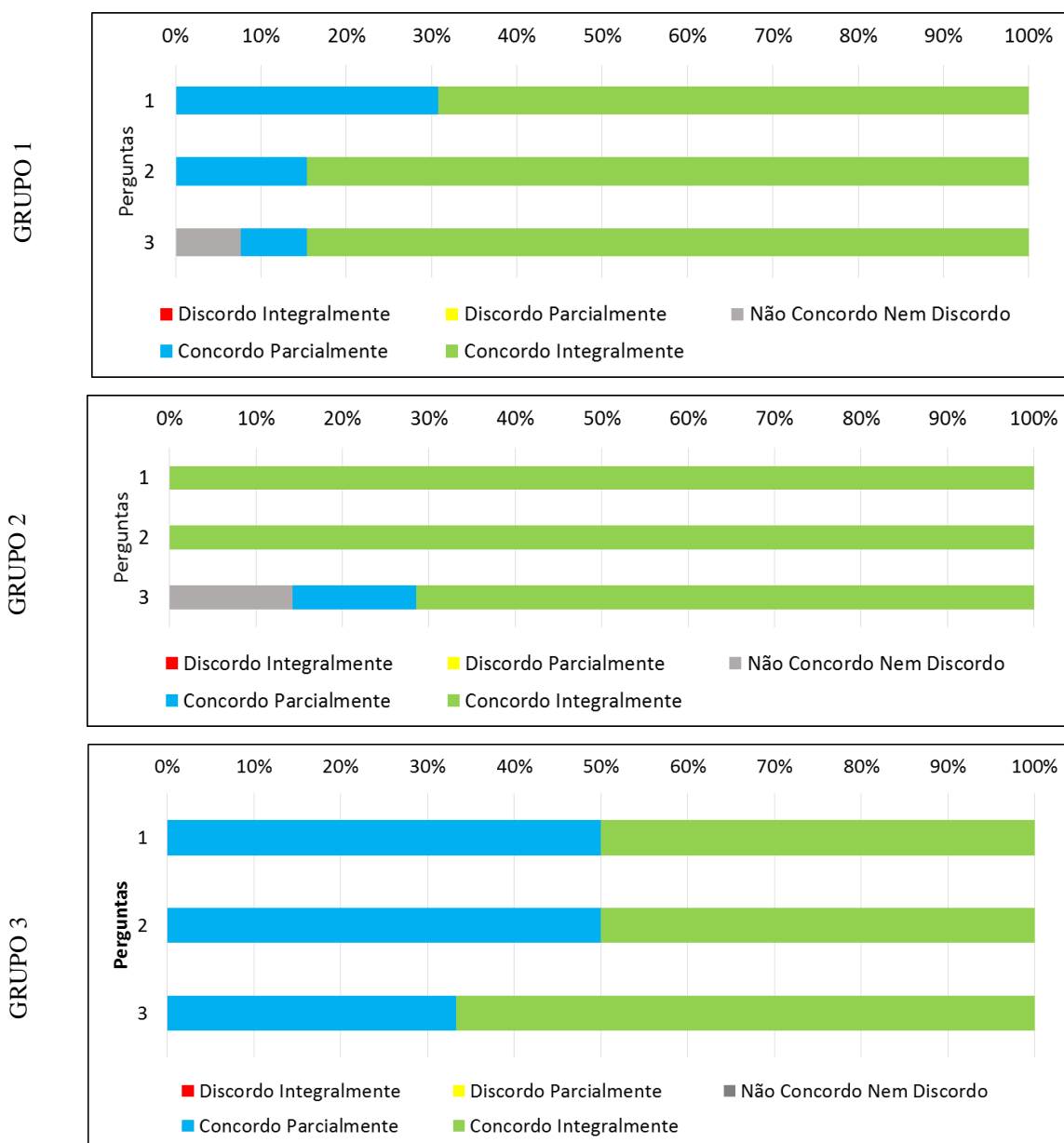
A partir do gráfico pode-se concluir que os respondentes na sua maioria concordaram com a viabilidade do modelo virtual.

## 7.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS BASEADO NA ESCALA LIKERT

### 7.1.1 Avaliação Comparativa do primeiro conjunto de questões – Categoria 1

- Reprodução física do ambiente e equipamentos

Como pode ser verificado no gráfico do grupo 1 – Operadores de Campo, os respondentes não concordaram totalmente com a reprodução física e equipamentos, apesar de que tiveram uma maior preferência por respostas positivas (FIGURA 54).



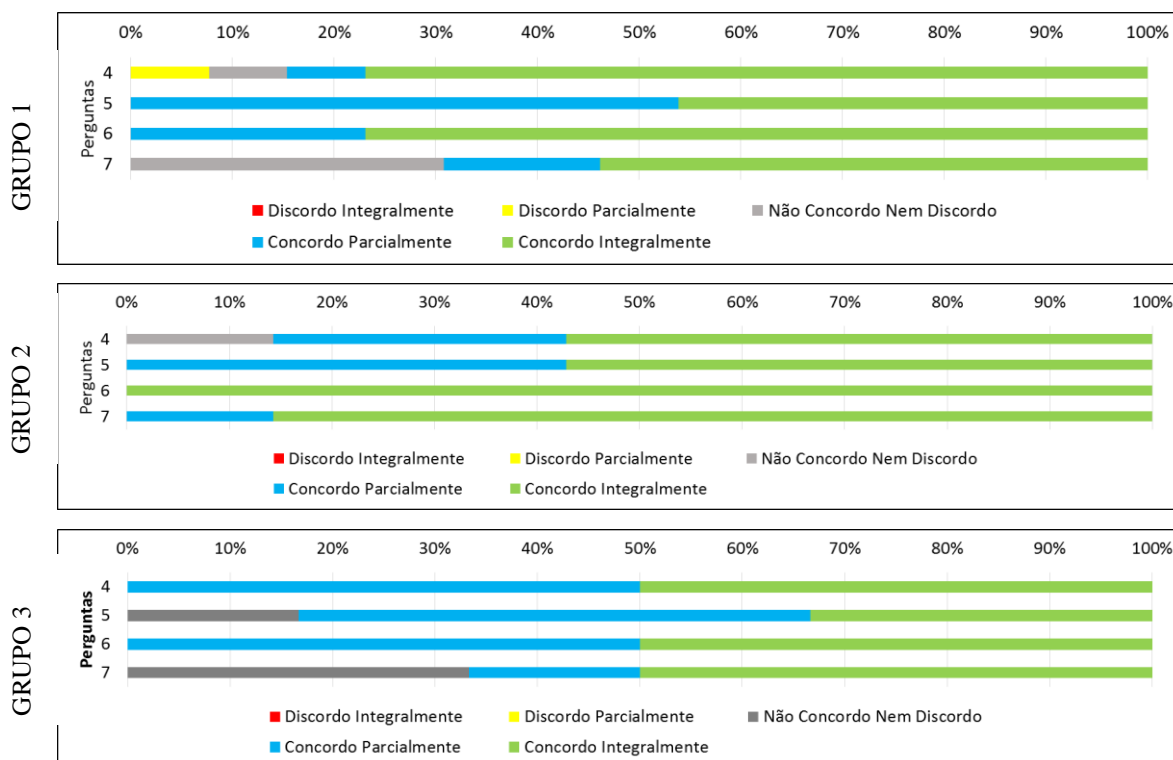
**Figura 54:** Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 1

**Fonte:** O autor (2021)

### 7.1.2 Avaliação Comparativa do segundo conjunto de questões – Categoria 2

-Funcionalidade da operação das bombas e reprodução dos desafios que envolvem as manobras reais.

Como pode ser verificado no gráfico do grupo 3 – Instrutores de Simulador, os respondentes divergiram quanto a concordância integral da metodologia proposta. Entretanto nenhum deles opinou com discordância, e dessa forma tiveram uma maior preferência por respostas positivas (FIGURA 55).



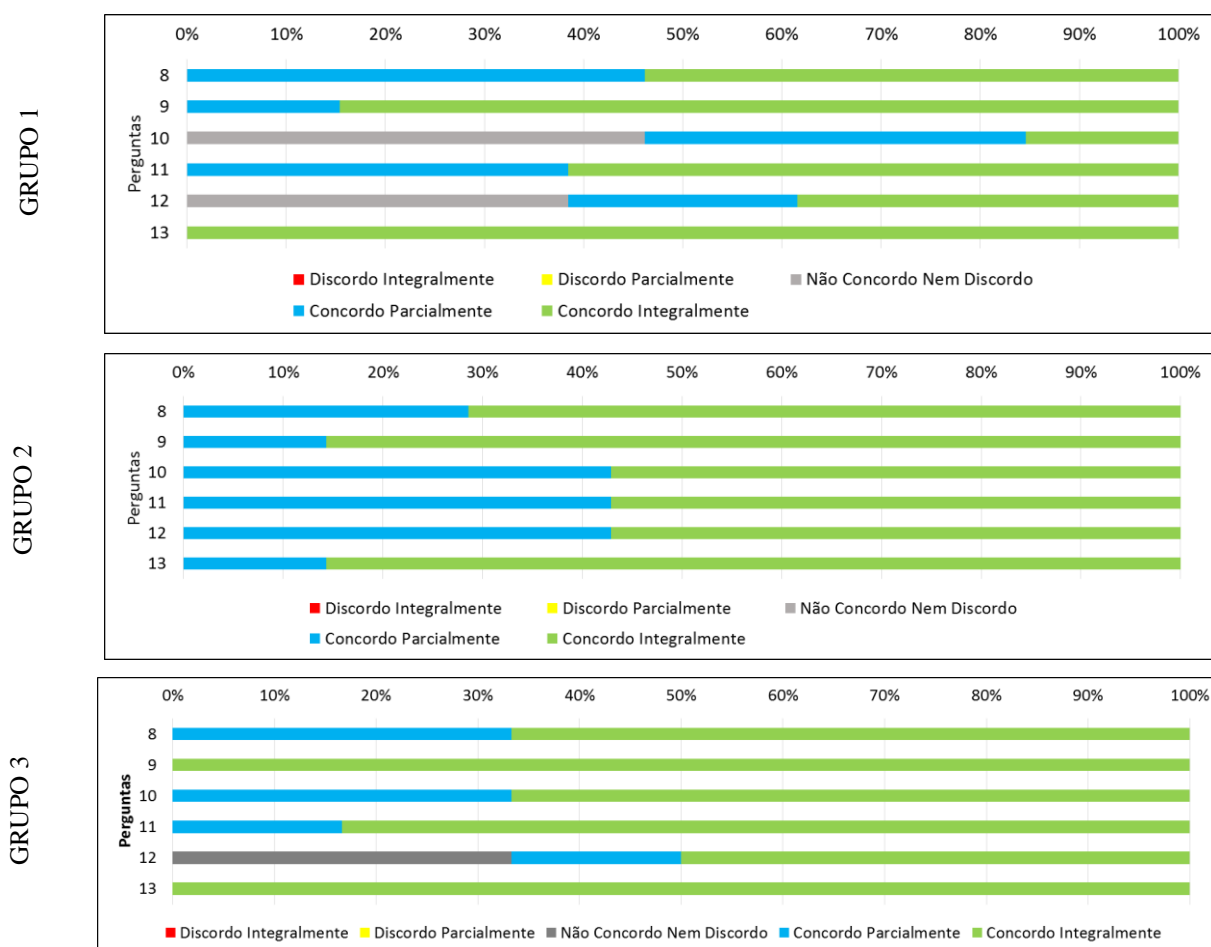
**Figura 55:** Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 2

**Fonte:** O autor (2021)

### 7.1.3 Avaliação Comparativa do terceiro conjunto de questões – Categoria 2

-Viabilidade do modelo virtual para simulação e treinamento

Como pode ser verificado no gráfico do grupo 2 – Operadores de Sala de Controle, os respondentes tiveram maior preferência por respostas positivas sobre a viabilidade do modelo virtual para simulação e treinamento (FIGURA 56).



**Figura 56:** Análise Comparativa do Resultado da Escala Likert – Categoria 3

**Fonte:** O autor (2021)

### 7.1.4 Trabalhos relacionados

Este trabalho reafirma a conclusão de trabalhos desenvolvidos na área e de certa forma complementa enriquecendo o amplo campo de aplicação da Realidade Virtual na área nuclear.

Na tese de MARINS (2018), “Realidade Virtual Aplicada à Proteção Física de Instalações Nucleares”, onde o mesmo ressalta a aplicabilidade da Realidade Virtual na proteção física, os trabalhos se complementam, pois, a proteção física também se aplica a usinas nucleares e aos seus diversos sistemas. É interessante destacar que seu trabalho, se for corretamente adaptado, também pode ser aplicado para aprimoramento de treinamentos. A interatividade com o ambiente virtual de sua dissertação, foi semelhante ao desta dissertação, dependendo da situação encontrada uma ação precisa ser feita.

Outro trabalho “O Uso da Realidade Virtual para Implantação de Um Centro de Radiofarmácia em Serviço de Medicina Nuclear”, ASSIS (2020) abordou exatamente a questão do uso de realidade virtual para treinamento onde seu uso visa aprimorar as técnicas e as grandes vantagens deste tipo de treinamento. Observa-se, portanto, que o uso tanto no ramo de radiofarmácia quanto na indústria nuclear, a realidade virtual pode contribuir de forma eficiente e viável para um bom treinamento. O processo de avaliação foi semelhante, e contou com o envolvimento de um número grande de especialistas. Este número foi aumentando ao longo do tempo, pois os três grupos que participaram, perceberam os benefícios e ficaram motivados com o ambiente criado. Ainda no processo de finalização desta dissertação, questionários continuavam chegando, assim como uma grande quantidade de pedidos para implementação de outras funcionalidades além das propostas nesta dissertação.

Em “Uso da Realidade Virtual no Planejamento de Repositório de Rejeitos Radioativos”, Chelles (2017) utilizou a realidade virtual de forma espacial para identificar o melhor local, melhores áreas de fuga e interferências. Esta dissertação se assemelha a que foi elaborada, pois foi reproduzido o ambiente real de forma fidedigna de acordo com a localização espacial dos principais equipamentos e componentes, procurando a fidelidade física da tarefa de interesse. Neste sentido, ocorreu-se maior facilidade pois o ambiente já existia. A dificuldade foi obter fotos e vídeos afim de processá-los no ambiente virtual.

O trabalho de NETTO (2014) “Avaliação do Desempenho de Operadores no Treinamento da Operação de Sistemas Elétricos em Ambientes Simulados” reproduz de forma funcional as manobras esperadas a serem feitas por operadores do sistema elétrico. Esta parte funcional foi semelhante à desta dissertação. A diferença é que a parte funcional foi incorporada ao painel virtual, como é no ambiente real. A parte funcional foi uma parte que demandou grande tempo, pois foi necessário obter apenas a parte de interesse, apenas uma certa manobra, e não todas as possíveis no painel, mais sim as mais delicadas. Ambos os trabalhos atingiram o objetivo de reproduzir a manobra real.

A identificação do potencial do treinamento em realidade virtual beneficiando a indústria nuclear integrando treinamento de operadores de campo e sala de controle, por Pakarinen (2021), “Virtual-Reality Based Nuclear Power Plant Field Operator Training”, demonstra de forma clara a importância das ações do operador de campo e seu papel para a sala de controle e na usina como um todo. Ressalta a importância de aprimorar e desenvolver treinamentos que envolvam essas duas equipes. Neste sentido, essa dissertação também possui este potencial para ser integrada ao treinamento existente da equipe de sala de controle.



O artigo de Khoudiakov et. al. (2006), “Full Scope Simulator Gets Virtual Refuelling Machine”, revela como o treinamento usando realidade virtual, pode ser aproveitado para tarefas complexas, como por exemplo o reabastecimento de um reator nuclear sem desligá-lo, ou seja, em potência (Isto é possível pela característica de projeto do reator RBMK, que é totalmente diferente do PWR). Este treinamento tem um papel importante no desenvolvimento de conhecimentos e habilidades básicas para o pessoal deste tipo de usina. Da mesma forma, o treinamento em realidade virtual pode ser desenvolvido para outros tipos de reatores, como por exemplo, os brasileiros que são PWR, que não possuem a capacidade de reabastecer com o reator ligado, porém possuem outros tipos de sistemas complexos.

## CAPÍTULO 8

Este último capítulo apresenta as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros. As conclusões buscam mostrar a contribuição e a validade desta dissertação, as perspectivas para o futuro foram obtidas através dos comentários e observações anotadas pelos respondentes nos questionários.

### 8 CONCLUSÃO

De acordo com a exposição dos vários argumentos apresentados, o estudo discutido demonstra que a Realidade Virtual pode ser uma grande aliada nos diversos treinamentos e que possui um grande potencial para os diversos profissionais que são necessários nas usinas nucleares (Operação, Manutenção, Engenharia, Proteção Radiológica, Proteção Física, Química, Física e etc.). Para avaliação do trabalho que foi desenvolvido, foi elaborado um questionário para vários profissionais, os quais foram separados em grupos de acordo com a sua atividade desempenhada na usina. Desta forma foi possível obter informações valiosas e precisas que poderão ser usadas em trabalhos futuros ou mesmo aperfeiçoamento do trabalho aqui proposto.

Após a análise dos questionários dos grupos compostos por profissionais experientes e qualificados em usinas nucleares, ficou claro que a metodologia sugerida é viável para a implementação de um treinamento em realidade virtual.

Os profissionais experientes da área nuclear demonstram interesse em outros treinamentos em realidade virtual, conforme comentários dos questionários.

Com os resultado e dados obtidos, pode-se concluir que o trabalho desenvolvido atingiu o seu objetivo através do uso da realidade virtual, como uma ferramenta poderosa para treinamento e aperfeiçoamento de profissional na área nuclear, promovendo assim a experimentação, interação com o mundo virtual causando emoções reais e aprendizado, de forma muito semelhante como as tarefas que fazem parte do mundo real promovem. Destaca-se que o ambiente virtual do sistema que foi criado procurou reproduzir fielmente o sistema real, tanto sonora e visualmente, como funcionalmente reproduzindo as dificuldades impostas

devido ao ambiente. É importante ressaltar ainda que as manobras e desafios propostos foram concebidos baseados no manual de operação da usina, e espera-se que o treinamento proposto seja um grande aliado na complementação do treinamento existente, promovendo a consolidação de conhecimento, agilizando o aprendizado e promovendo a habilidade específica esperada.

As ferramentas para modelar os objetos foram adequadas, porque representaram um grau de realismo em relação aos objetos. O objeto bomba, o objeto manômetro e o objeto painel, as ferramentas possibilitaram uma reprodução de forma fidedigna, dando um grau de realismo necessário. Da mesma forma, o Unity para criação do ambiente, também se mostrou adequado visto os resultados apresentados.

O Unity (visual studio) foi suficiente para a criação das funcionalidades, uma vez que estas foram muito bem implementadas, como a lógica da comutação das bombas do painel. As funcionalidades implementadas mostraram que o Unity foi capaz de simular todas as operações de manobras importantes. Caso a lógica existente seja alterada, modificando a funcionalidade real, o Unity é capaz de modificar também para atender a essa nova funcionalidade. O ambiente construído, como em todo simulador, mostrou-se uma ferramenta adequada para proporcionar treinamento de operadores de uma usina nuclear

O ambiente virtual criado demonstrou ser uma ferramenta poderosa para treinamento e aperfeiçoamento de profissional de uma usina nuclear.

A participação direta dos profissionais da área nuclear fornece informações valiosas para treinamentos futuros.

De forma geral, o ambiente virtual criado mostrou ser capaz de demonstrar o potencial a ser aplicado na realidade virtual em usinas nucleares assim como a sua viabilidade, pois colabora na qualificação do profissional, que diretamente está ligado a segurança nuclear e a disponibilidade da usina. Este trabalho pode servir como base e orientação para elaboração de treinamentos em realidade virtual em sistemas mais complexos de usinas nucleares, inclusive as brasileiras.

## 8.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Adicionar ferramenta de zoom para o painel ou aumentar a letra das plaquetas de identificação e habilitar mais funções no painel.
- Reproduzir no ambiente virtual sistemas mais complexos, de usinas nucleares.
- Desenvolver treinamentos voltados a parte de combate a incêndio, na área controlada e na área do gerador elétrico
- Desenvolver treinamentos voltados para operação/ manutenção de sistemas segurança e para cenários com acidentes postulados em projeto
- Aperfeiçoar a ferramenta proposta, incluindo no ambiente virtual a retroalimentação da informação para sala de controle
- Desenvolver treinamentos voltados para cenários com perda de suprimento elétrico normal
- Estudar a viabilidade de integração com simuladores de sala de controle.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, M. A. **O Uso da Realidade Virtual para Implantação de Um Centro de Radiofarmácia em Serviço de Medicina Nuclear.** Tese de Mestrado Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear, IEN, Rio de Janeiro, 2020.

AVELLAR, R. K. **Um estudo comparativo entre normas e Diretrizes de Projetos de Salas de Controle Digitais para Usinas Nucleares PWR.** Tese de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2008

CHELLES, D. R. **Uso da Realidade Virtual no Planejamento de Repositório de Rejeitos Radioativos.** Tese de Mestrado Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear, IEN, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IEN, 2017.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Relatório de Operação de Usinas Nucleoelétricas.** Norma CNEN NN 1.01. Resolução CNEN 170/14. Brasil: CNEN, 2014. Disponível em <http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm101.pdf> acessado em 23 de maio de 2021.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Relatório de Operação de Usinas Nucleoelétricas.** Norma CNEN NN 1.14. Resolução CNEN 16/01. Brasil: CNEN, 2002. Disponível em <http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm114.pdf> acessado em 23 de maio de 2021.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e Outras Instalações.** Norma CNEN NN 1.16. Portaria CNEN 17/00. Brasil: CNEN, 2000. Disponível em <http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm116.pdf> acessado em 23 de maio de 2021

ELETRONUCLEAR, Política de Segurança – 2021. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Seguranca/Paginas/Politica-de-Seguranca-Nuclear.aspx> acessado em 30 de abril de 2021.

FONSECA, J. M. **Reflexos da Manobrabilidade de Usinas Nucleares na Operação de Sistema Elétrico.** Tese de mestrado – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

FONTEBASSI, C. M. **Segurança Baseada em Comportamento (BBS): Definição da Cultura de Segurança e Implantação de um Programa de Comportamento Seguro.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Bacharel em Engenharia Civil, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras. Fundação Educacional de Ituverava, 2019.

FSAR – Final Safety Analysis Report. **Revisão 13, CAPÍTULO 18, Human Factor Engineering**, 2018.

GONÇALVES, F.; RUIZ, R.H. Energia Nuclear. In: **Cadernos FGV Energia**. Rio de Janeiro: FGV, 2016.

IAEA – International Atomic Energy Agency - **TECDOC SERIES, AEA-TECDOC-1887, Classification, Selection and Use of Nuclear Power Plant Simulators for Education and Training**. Vienna, IAEA, 2019.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Energy, Electricity and Nuclear Power estimates For the period up to 2050, 2019**. Vienna, IAEA, 2019.

IDPO-NOS – **Informativo Preliminar Diário da Operação do Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <https://ons.org.br> em 28 de março de 2020.

KEMENY, John G. **Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: The Need for Change: the Legacy of TMI**. The Commission, 1979

KHOUDIAKOV, M. at al. RBMK Full Scope Simulator Gets Virtual Refuelling Machine. **Leningrad Nuclear Power Plan, Kurchatov Institute e Institute for Energy Technology, OECD Halden Reactor Project**. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/38/007/38007637.pdf?r=1&r=1>. Acessado em 30 de maio de 2021.

MARINS, E. R. **Realidade Virtual Aplicada à Proteção Física de Instalações Nucleares**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2018.

NETTO, A. V. S. **Avaliação do Desempenho de Operadores no Treinamento da Operação de Sistemas Elétricos em Ambientes Simulados**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2014.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Impactos da Suspensão da Operação das UTNS Angra 1 e Angra 2 em 2019**. ONS NT-0105/2017, pp 5-7, outubro 2017

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Importância da UTN Angra 3 para o atendimento do SIN**. ONS NT-0020/2017, pp 6-11, fevereiro de 2017.

PAKARINEN, Satu et al. **Virtual-Reality Based Nuclear Power Plant Field Operator Training in Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finlandia, 2021**.

Disponível em: <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/141050/TTL-978-952-261-975-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em 30 de maio de 2021

PASTURA, V; MOL, A. C. A.; MARINS, E. R.; LEGEY, A. P.; SANTO A. C. E.; Reflexão sobre a realidade virtual como ferramenta de educação permanente nas Instituições Nucleares. **Revista Carioca de Ciência, Tecnologia e Educação**, RECITE v.2, n.1, 2017.

PETRONOTÍCIAS – Canal de notícias de Gás e Óleo. **Tribunal europeu de justiça concede a extensão da vida útil de duas usinas nucleares na Bélgica**. Petronotícias, 30 de julho de 2019. Disponível em <https://petronoticias.com.br/tribunal-europeu-de-justica-concede-a-extensao-da-vida-util-de-duas-usinas-nucleares-na-belgica>. Acesso em 30 de abril de 2021

PORTUGAL. F. A. **Metodologia Modificada para Aplicação em Eventos não Planejados de Desarmes Automáticos e Manuais em Usinas Nucleares**. Tese de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares, Instituto de Energia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear, IEN, Rio de Janeiro 2017.

ROCHA, J. G.; ALVIM, A. C. M.; MARTINEZ, A. S. Estudo da Otimização da Eficiência de Reatores PWR em Função das Extrações de Vapor da Turbina. In: **International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2002**, Rio de Janeiro, RJ, 2002. Disponível em: [https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENFIR/R02/R02\\_807.PDF](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENFIR/R02/R02_807.PDF) Acessado em 30 de abril de 2021.

SOUSA, M. P A.; JUNIOR, A. R. S. P.; FILHO, M. R.; REIS, F. V.; Maintenance and Assembly Training in a Hydroelectric Unit of Energy Using Virtual Reality Desktop. In: **IEEE Latin América Transactions**, vol. 6, nº5, 2008.

SBUN – Sistemas Básicos de Usinas Nucleares. **Sistema de Galerias e Bombas da Água de Refrigeração Principal**, Eletronuclear, 2019.

SCARPINELLA, C. A. **Análise Custo Benefício para Implantação da Indústria Nuclear do Brasil**. São Paulo, 1972.

WANO – World Association of Nuclear Operators – Procedure PCD 2014-4 Rev 1 Appendix D, **Good Practice Proposal Form**, Londres, 2018

TAHUATA, L.; SALATI, I., DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. **Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD**, 10<sup>a</sup> rev, abril, 2014.

TIRONE, J. Energia Nuclear deve usar clima para justificar custo. In: **Exame**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em <https://exame.com/ciencia/energia-nuclear-deve-usar-clima-para-justificar-custo-diz-mit/>. Acessado em 23 de maio de 2021.

TOMALSQUIM, M. T. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. **Rio de Janeiro: EPE**, 2016.



## APÊNDICE A

<b>QUESTIONÁRIO</b>	
Este questionário tem como finalidade avaliar a opinião de profissionais, que atuam na área nuclear, sobre a operação do sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear em um ambiente virtual como ferramenta auxiliar, no estabelecimento de estratégias para treinamento e capacitação profissional.	
<b>RESPONDA AVALIANDO CADA AFIRMAÇÃO SEGUNDO O SEGUINTE CRITÉRIO:</b>	
VALOR	CRITÉRIO
<b>5</b>	Concordo integralmente
<b>4</b>	Concordo parcialmente
<b>3</b>	Não concordo nem discordo
<b>2</b>	Discordo parcialmente
<b>1</b>	Discordo integralmente

- 1.** O ambiente virtual representa as condições adequadas de infraestrutura física, referente ao sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

( ) 5                      ( ) 4                      ( ) 3                      ( ) 2                      ( ) 1

- 2.** O ambiente virtual apresenta estar equipado com o mínimo, de equipamentos e materiais previstos no sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

( ) 5                      ( ) 4                      ( ) 3                      ( ) 2                      ( ) 1

- 3.** O treinamento modelado no ambiente virtual (simulador) apresenta os requisitos mínimos de operação previstos no MOU específico do sistema da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

( ) 5                      ( ) 4                      ( ) 3                      ( ) 2                      ( ) 1

- 4.** A apresentação das legendas no ambiente virtual, expressam corretamente a finalidade dos equipamentos e ambiente do sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear

( ) 5                      ( ) 4                      ( ) 3                      ( ) 2                      ( ) 1

- 5.** O fluxo estabelecido para a prática operacional no ambiente virtual reflete à prática cotidiana do sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

( ) 5                      ( ) 4                      ( ) 3                      ( ) 2                      ( ) 1

- 6.** O ambiente virtual como um todo, simula um ambiente real de um painel do sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

7. A apresentação dos slides em associação com o ambiente virtual do sistema de óleo permite que, o treinamento aplicado tenha uma melhor aprendizagem.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

8. O ambiente virtual auxilia de forma eficiente e dinâmica na compreensão dos elementos presentes no sistema de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

9. A criação do ambiente virtual (simulador), utilizando técnicas de realidade virtual, é uma boa ferramenta para preparação de profissionais que irão atuar na operação do painel do sistema da bomba de óleo da bomba da água de refrigeração principal de uma usina nuclear.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

10. A simulação em ambiente virtual permite diminuição de custos no processo de treinamento.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

11. Com a utilização da realidade virtual os riscos ao profissional se tornam menos eminentes.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

12. O ambiente virtual permite que o treinamento tenha menor custo se comparado com o ambiente real.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

13. É recomendado o treinamento com as simulações no ambiente virtual antes da prática em ambiente real.

<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

Comentários (aspectos **positivos** e aspectos **negativos**) ou sugestões:

---



---



---



---



---



---



---



---

## APÊNDICE B

### Transcrição de Comentários do Grupo 1 – Operadores de Campo

#### **Profissional 1 (10 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** No contexto Geral, todo o ambiente de Simulação que atinge um nível bem próximo do real deveria ser aplicado. Temos exemplos da utilização de simuladores nas áreas nuclear e aviação para a formação de profissionais. O ambiente virtual analisado representa parcialmente as condições adequadas da infraestrutura física, visto que no ambiente real, os pontos de verificação das variáveis necessárias para operação encontram-se em lugares diferentes. No caso, o ambiente real exige duas pessoas para a realização da manobra. O painel simula o sistema da bomba de óleo de uma maneira bem próxima a realidade. Porém precisa habilitar a funcionalidade da botoeira de posição “remoto/ teste”. O ambiente virtual em questão seria uma excelente ferramenta para melhorar e manter o nível de treinamento dos profissionais que operam o respectivo sistema com objetivo de contribuir para a tomada de decisão durante a operação trazendo segurança e aumentando a probabilidade de assertividade.

#### **Profissional 2 (20 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Simulação bem próxima do real. Facilita o aprendizado e fixa bem a forma operacional do equipamento. Excelente Ferramenta de Aprendizagem.

#### **Profissional 3 (10 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Excelente ambiente de aprendizagem! Muito próximo ao que encontramos no campo. Parabéns!!!

Seguem abaixo algumas observações:

- 1-É um pouco difícil ler o que está escrito nas indicações do painel
- 2-Na simulação 1 (Simular falha), na pratica, não é necessário Aguardar 1 minuto para fazer a comutação.
- 3-Em todas as simulações a lâmpada de 2 bombas ligadas apagou. Exceção é a simulação 4, quando acende, ela só apaga depois que é feito o reset.
- 4-Os tempos que estão sendo computados na simulação não é o que observamos no campo. O tempo de 1 minuto para reset está correto em relação ao que observamos.

---

**Profissional 4 (11 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Achei a simulação de manobras no ambiente virtual muito boa tanto para treinamento inicial nos sistemas correspondentes quanto no retreinamento e atualização. Permite a realização das manobras operacionais exatamente da forma como são feitas nos equipamentos. Seria interessante ter mais sistemas virtuais para treinamento, especialmente no treinamento inicial dos sistemas da área de atuação do operador, para que o mesmo possa vivenciar todas as possibilidades de operação normal e de falhas dos sistemas e com isso, estar mais bem preparado e familiarizado com cada situação que possa se apresentar no cotidiano do ambiente de trabalho.

---

**Profissional 5 (21 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Utilizei a plataforma mediante o auxílio do eng. Gustavo. Tenho uma experiência de campo como operador de 10 anos, entre 2000 e 2010. Todo o meu treinamento ocorreu baseado em um guia de estudo, leitura de relatório de eventos que ocorreram na área que estava treinando para assumir e acompanhamento de um operador com mais experiência. Às vezes, durante esse período de treinamento, poderia ou não ocorrer um mau funcionamento em um sistema e/ou equipamento que aumentaria o “know-how” do treinando, mas neste caso, teria que contar com o fator “sorte”.

Quando tive contato com esta simulação em ambiente virtual, pude perceber que, experiência adquirida com falha de equipamento, pode acontecer sem contar com o fator “sorte”, inserindo o treinando em uma situação de stress imposta por uma falha, preparando-o para uma situação real, tal como fazemos em um simulador. Quando se vive uma experiência, a marca que fica lhe afasta de cometer o mesmo erro.

Acredito também que o tempo para formação de um profissional seja bastante reduzido com a utilização desta ferramenta, se mostrando uma economia financeira relevante.

---

**Profissional 6 (11 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:**

Excelente interface do virtual para o real, proporciona uma melhor compreensão dos profissionais com pouca ou nenhuma, que não operam num equipamento tão importante para a planta

---

**Profissional 7 (15 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** O ideal é que outros sistemas da usina fossem treinados também em ambiente virtual. No geral, o treinamento foi muito bem.

---

**Profissional 8 (15 anos de experiência):**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Minha sugestão é que seja aplicado em outros sistemas também esse tipo de treinamento em ambiente virtual

---

**Profissional 9 (10 anos de experiência):**

Sem Comentários.

---

**Profissional 10 (11 anos de experiência):**

Sem Comentários.

---

**Profissional 11 (11 anos de experiência):**

Sem Comentários.

---

**Profissional 12 (11 anos de experiência):**

Sem Comentários.

---

**Profissional 13 (11 anos de experiência):**

Sem Comentários.

---

## Transcrição de Comentários do Grupo 2 – Operadores de Sala de Controle

### Profissional 1 (41 anos de experiência)

Sem comentários

---

### Profissional 2 (15 anos de experiência)

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Excelente forma de aprendizagem, de forma a melhorar o entendimento do treinando, antes que o mesmo tenha que passar por situação real. Esse tipo de simulação ajuda a se ter uma maior compreensão do comportamento do sistema. Sugestão de que se possa aumentar a possibilidade desse tipo de simulação em outros equipamentos e sistema, pois com certeza irá enriquecer muito nosso treinamento. Sugestão de melhoria para as plaquetas das botoeiras do painel, algumas estão pequenas e de difícil leitura. Trabalho muito bem feito e que deve ser levado adiante

---

### Profissional 3 (30 anos de experiência)

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Comutação entre as bombas de óleo a indicação luminosa de 2 bombas operando não sinalizou.

Ocorre a indicação de pressão correspondente a 2 bombas operando (~8bar), o desligamento de 1 bomba retornando a pressão para ~3 bar, porem a sinalização de 2 bombas operando devia permanecer acesa por 1 minuto até acionar o reset. Esta sinalização não acendeu.

---

### Profissional 4 (17 anos de experiência)

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Achei ótimo o trabalho realizado para formulação deste ambiente virtual. Acredito que a criação de mais ambientes desse tipo para outros sistemas importantes diminuiria muito a possibilidade de falhas na operação e facilitaria também o treinamento. Sugiro que este programa seja expandido.

---

### Profissional 5 (26 anos de experiência)

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** A interface carece de maior fonte nas placas de identificação dos componentes ou maior resolução permitindo uma aproximação do aluno as identificações, visto serem diversas as capacidades visuais de cada um mesmo com correção. A distância do painel corresponde a um braço, mas a nitidez das

plaquetas não. Melhorar a interação com os botões de função para totalmente gráfico seria um “plus”. O manômetro no canto da tela auxilia no treinamento de sensibilidade, no entanto ele se situa num poço com grades que vale a pena investir para simular, dando ao treinando uma percepção mais completa da dinâmica das falhas e da necessidade de interagir em dois lugares diferentes para uma manobra tão simples, porém importante.

Em geral a simulação é revolucionaria, sob a ótica do cliente do serviço de qualificação da mão de obra. Já houve vários eventos de perda não planejada de potência (redução forçada) e mesmo desligamentos automáticos pela inabilidade de novos funcionários mesmo transitando na área destas bombas, devido a treinamento com atraso ou não aplicado.

---

#### **Profissional 6 (30 anos de experiência)**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Vejo com muito entusiasmo um treinamento mais abrangente, em realidade virtual. Os aspectos positivos são: antever fragilidade no aspecto operacional, que podem por exemplo reduzir o impacto do recebimento de doses durante, por exemplo, em trabalho em área controlada das usinas de angra 1 e 2, que estão em operação.

---

#### **Profissional 7 (30 anos de experiência)**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** O ambiente virtual associado ao treinamento teórico é uma excelente ferramenta na formação de operadores no sistema de óleo. Como o treinamento manipulando o painel real não é possível, pois afeta a disponibilidade de geração da usina, o ambiente virtual compensa, com boa aproximação, as respostas esperadas dos sistemas. Também seria muito útil nos retreinamentos pois reproduz com fidelidade, grandeza e falhas previstas no manual de operação do sistema

---

## **Transcrição de Comentários do Grupo 3 – Instrutores de Simulador de Sala de Controle**

### **Profissional 1 (10 anos de experiência)**

Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões: O trabalho está muito bom, embora acredito que a dificuldade de leitura dos TAG's, possa ser diminuída com ferramenta de zoom ou pop-up. O efeito sonoro ficou bastante realístico. No exercício 02, embora a indicação do painel mostre o recurso da comutação, poderia aparecer a mensagem ao completar com sucesso. Se ao concluir o exercício 01 com sucesso, passarmos para o exercício 02 a mensagem do exercício 01 ainda presente durante a execução do exercício 02 “Simulação completada com sucesso”.

---

### **Profissional 2 (10 anos de experiência)**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Falta indicação dos manômetros nas posições correspondentes no campo. Textos das botoeiras são muito pequenos, dificultando as leituras. Falta o sistema PAL.

---

### **Profissional 3 (18 anos de experiência)**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** O trabalho apresentado, simulando a operação de um equipamento usando realidade virtual, foi muito bem elaborado. Tenho conhecimento da sala onde ficam estes equipamentos e posso dizer que a semelhança é incrível. Os motores das bombas, o gradeado sobre o tanque de óleo, os manômetros, o painel local e o dimensionamento da sala.

Ao testar a operação do componente pelo painel local, virtualmente, pode verificar diversos problemas e mau funcionamento, a operação correta sem defeitos, bem como este treinar situações diversas. Fiquei impressionado como este tipo de ferramenta pode auxiliar a indústria de uma maneira geral, ainda mais em uma planta nuclear, onde nos deparamos com riscos elétricos, espaço confinado, riscos radiológicos e outros. Desta forma, esta ferramenta pode desenvolver, treinar e capacitar operadores ou outro público alvo em manobras, operação e manutenção destes equipamentos, quando nem sempre temos fácil acesso local aos mesmos.

Esta ferramenta é extremamente útil para treinamentos e capacitação das mais variadas formas em diferentes tipos de indústrias, ajudando nos custos, na segurança e fácil disponibilização aos recursos de treinamento por pessoas trabalhando ou estando longe da planta, mas mesmo assim, podendo treinar, retreinar e manter os conhecimentos em dia na



operação de determinado equipamento/ componente. Gostei muito do que vi e pude constatar que o céu é o limite para o uso deste tipo de ferramenta. Parabéns aos envolvidos.

---

#### **Profissional 4 (21 anos de experiência)**

Sem comentários:

---

#### **Profissional 5 (18 anos de experiência)**

**Afirmação 1:** O painel está com as letras do texto muito pequenas e a aproximação da visão dificulta a leitura

**Afirmação 4:** Não houve falas. As legendas dos maus funcionamentos poderiam ser autoexplicativas.

**Afirmação 5:** Faltou a dinâmica de verificar o manômetro abaixo da grade e com distância do painel.

**Afirmação 6:** Alguns momentos faltaram acender a lâmpada de falha.

**Afirmação 8:** Pode melhorar no que já foi comentado acima

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** De uma maneira geral é uma excelente ferramenta para treinamento de operadores e familiarização com os sistemas. Corrigindo os pequenos erros e ajustando alguns itens, torna-se útil para treinamento imediato. Excelente iniciativa. Sugestões: Incluir possibilidade de comunicar a sala de controle, podendo haver textos prontos, para selecionar, e dependendo da seleção, as respostas serem imediatas. Incluir manômetro em local idêntico a usina. E mais um painel com a simulação, que permitirá interação mais próxima a realidade.

---

#### **Profissional 6 (10 anos de experiência)**

**Comentários (aspectos positivos e aspectos negativos) ou sugestões:** Quanto a aparência está muito próxima ao real. Senti falta da ferramenta de zoom para ler as legendas do painel. Como sugestão de melhoria seria bom inserir som das bombas com falha mecânica por exemplo. Quanto ao treinamento será de ótimo aproveitamento pois neste equipamento só é possível a pratica com a unidade principal desligada. Destaco a iniciativa do grupo que será fundamental para a ampliação do treinamento.