

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

VINICIUS CARDOSO BRUM

**AUTOMATIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS E DE
IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM PLANTAS NUCLEARES: APLICAÇÃO NO
SIMULADOR DE PLANTA NUCLEAR PWR DO LABORATÓRIO DE INTERFACES
HUMANO-SISTEMA (LABIHS) DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

Rio de Janeiro

OUTUBRO 2024

VINICIUS CARDOSO BRUM

**AUTOMATIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS E DE
IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM PLANTAS NUCLEARES: APLICAÇÃO NO
SIMULADOR DE PLANTA NUCLEAR PWR DO LABORATÓRIO DE INTERFACES
HUMANO-SISTEMA (LABIHS) DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

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.

Orientadores: Prof. Dr. Cláudio Henrique dos Santos Grecco
Prof. Dr. Cláudio Márcio Nascimento Abreu Pereira

Rio de Janeiro
OUTUBRO 2024

Cardoso Brum, Vinicius

Automatização de procedimentos operacionais e de identificação de acidentes em plantas nucleares: Aplicação no simulador de planta nuclear PWR do laboratório de interfaces humano-sistema (LABIHS), do Instituto de Engenharia Nuclear / Vinicius Cardoso Brum. Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2024.

100fl.; il. 17, 31 cm.

Orientadores: Cláudio Henrique dos Santos Grecco
Cláudio Márcio Nascimento Abreu Pereira

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2024.

1. Labview. 2. Condições Iniciais de Operação 3. Acidentes Nucleares. 4. Nuclear.

AUTOMATIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS E DE
IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM PLANTAS NUCLEARES: APLICAÇÃO NO
SIMULADOR DE PLANTA NUCLEAR PWR DO LABORATÓRIO DE INTERFACES
HUMANO-SISTEMA (LABIHS) DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Vinicius Cardoso Brum

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:

Documento assinado digitalmente
 **CLAUDIO HENRIQUE DOS SANTOS GRECCO**
Data: 30/10/2024 14:00:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **CLAUDIO MARCIO DO NASCIMENTO ABREU PER**
Data: 06/11/2024 12:09:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Cláudio Márcio Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Documento assinado digitalmente
 **PAULO VICTOR RODRIGUES DE CARVALHO**
Data: 30/10/2024 14:46:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS SANTANA FARIAS**
Data: 30/10/2024 14:10:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Santana Farias, D. Sc.

Documento assinado digitalmente
 **JORGE EDUARDO MANSUR SERZEDELLO**
Data: 30/10/2024 14:52:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Jorge Eduardo Mansur Serzedello, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ BRASIL

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas que me conduziram à conclusão deste trabalho.

A minha esposa, Alessandra, que me motivou em todas as fases do curso, apesar das adversidades.

Aos meus orientadores, professores e amigos Cláudio Grecco e Claudio Márcio, que de forma paciente, motivadora e amistosa me proporcionaram a realização de um sonho. Sem eles, este feito não teria sido possível.

Aos meus anjos da guarda: Silas, Marcos Santana, Nelson, Hélio e Leila, pelos ensinamentos enriquecedores, pelo incentivo, auxílio na elaboração do trabalho e apoio durante a realização da minha pesquisa.

Minha gratidão eterna a essas pessoas.

RESUMO

A operação de usinas nucleares exige rigorosos procedimentos operacionais para partida, parada, operação normal e em situações de transientes ou acidentes. Visando reduzir a sobrecarga dos operadores, especialmente em situações críticas, a automatização de procedimentos tem sido progressivamente adotada. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema utilizando *LabVIEW* para automatizar procedimentos operacionais em um simulador de planta nuclear PWR no LABIHS-IEN, abrangendo a partida do reator e a identificação de três tipos críticos de acidentes: *LOCA* (Perda de Refrigerante), Perda de Alimentação AC e *ATWS* (Transiente Antecipado sem *Scram*).

As interfaces desenvolvidas utilizam variáveis do simulador, adquiridas por meio de um programa em C++ previamente desenvolvido por pesquisadores do laboratório. A interação entre a estação de trabalho e o programa implementado ocorreu via protocolo TCP/IP, e a validação dos estados desejados dessas variáveis foi realizada em conformidade com o manual de operações do simulador, datado de 2002.

A eficácia do sistema foi avaliada por meio de uma pesquisa aplicada aos operadores do laboratório, seguida de uma validação prática. Os resultados indicam melhorias nos processos operacionais, destacando a capacidade do sistema em facilitar a operação e antecipar a identificação de acidentes, contribuindo para uma resposta mais rápida em situações críticas.

Palavras-chave: Automatização de procedimentos operacionais, *LabVIEW*, simulador de usina nuclear, acidentes nucleares, nuclear.

ABSTRACT

The operation of nuclear power plants requires rigorous operational procedures for startup, shutdown, normal operation, and in transient or accident situations. To reduce the burden on operators, especially in critical situations, procedural automatization has been increasingly adopted. This work presents the development of a system using *LabVIEW* to automatize operational procedures in a PWR nuclear plant simulator at LABIHS-IEN, including reactor startup and the identification of three critical types of accidents: *LOCA* (Loss of Coolant Accident), Loss of AC Power, and *ATWS*(Anticipated Transient Without Scram).

The developed interfaces utilize simulator variables acquired through a C++ program previously created by laboratory researchers. Interaction between the workstation and the implemented program occurred via the TCP/IP protocol, and validation of the desired state of these variables was conducted in accordance with the simulator's operations manual dated 2002.

The system's effectiveness was assessed through a survey with laboratory operators, followed by practical validation. Results indicate improvements in operational processes, highlighting the system's ability to facilitate operations and anticipate accident identification, contributing to a faster response in critical situations.

Keywords: Automatization of operational procedures, *LabVIEW*, nuclear plant simulator, nuclear accidents, nuclear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Planta nuclear	19
Figura 2: Sala de controle	53
Figura 3: Diagrama Funcional do LABIHS	53
Figura 4: Laboratório de Interfaces Humano-Sistemas (LABIHS) do Instituto de Engenharia Nuclear	54
Figura 5: Tela geral de alarmes do LABIHS	55
Figura 6: Tela do simulador – Reactor Coolant System	59
Figura 7: Tela do simulador – Feed Water System.....	61
Figura 8: Tela do simulador – Chemical and Volume Control System.....	62
Figura 9: Tela do simulador – Reactivity Control System	63
Figura 10: Tela do simulador – Residual Heat Removal System.....	64
Figura 11: Tela criada em LabView para apoio aos operadores do simulador de uma planta nuclear	66
Figura 12: Point ID das condições iniciais	67
Figura 13: Tela do simulador – Eletrical System.....	69
Figura 14: Tela do simulador – Reactor Coolant System	70
Figura 15: Point ID das condições iniciais	71
Figura 16: Diagrama de blocos em Labview – ferramenta de apoio aos operadores.....	73
Figura 17: Ferramenta de apoio aos operadores do laboratório.....	73

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

ATWS - *Anticipated Transient Without Scram* (Transiente Antecipado sem Scram)

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

FCS - Fatores Críticos de Sucesso

IAEA - *International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica)

IEN - Instituto de Engenharia Nuclear

LABIHS - Laboratório de Interfaces Humano-Sistemas

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

NEA - *Nuclear Energy Agency* (Agência de Energia Nuclear)

PWR - *Pressurized Water Reactor* (Reator de Água Pressurizada)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Apresentação do Tema	12
1.2	Questão e Objetivo da Pesquisa	15
1.2.1	<i>Questão da pesquisa</i>	15
1.2.2	<i>Objetivos da pesquisa</i>	16
1.3	Metodologia	16
1.3.1	<i>Estrutura do trabalho</i>	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Usinas Nucleares	18
2.2	Salas de Controle das Usinas Nucleares	21
2.2.1	<i>Simuladores de plantas nucleares</i>	22
2.3	Sistemas De Monitoração E Supervisão Em Plantas Industriais.....	23
2.3.1	<i>Automatização em salas de controle</i>	25
2.3.2	<i>Tomada de decisão através de automatização</i>	29
2.3.3	<i>Vantagens da automatização</i>	32
2.4	Ferramenta de Automatização em Labview	36
2.5	Benefícios Da Utilização Do Labview	44
2.6	Acidentes Em Usinas Nucleares	44
3	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO	50
3.1	O Instituto De Engenharia Nuclear.....	50
3.2	O Laboratório De Interfaces Humano-Sistemas (LABIHS)	51
4	O SISTEMA DESENVOLVIDO	57
4.1	O Módulo De Aquisição De Dados.....	57
4.2	Automatização Do Procedimento De Partida Da Planta	57
4.2.1	<i>Procedimento de partida da planta</i>	58
4.2.2	<i>Módulo de automatização do procedimento de partida da planta</i>	65

4.3	Automatização Do Procedimento De Identificação Dos Acidentes Atws, Perda De Energia Ac E Loca (Loss Of Coolant Accident -Acidente De Perda De Refrigerante)	68
4.3.1	<i>Procedimentos de identificação de acidentes</i>	68
4.3.2	<i>Módulo de automatização da identificação de acidentes</i>	71
4.4	Avaliação Dos Operadores Sobre A Ferramenta	75
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
5.1	Conclusões.....	76
5.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE	93

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, será introduzido o tema central da dissertação, a questão de pesquisa e seus objetivos. Além disso, também serão discutidas a metodologia empregada na pesquisa, a estrutura da dissertação e as contribuições.

1.1 Apresentação do tema

A identificação e classificação dos transientes têm sido objeto de estudo devido ao potencial de causarem acidentes em usinas nucleares, trazendo consequências prejudiciais tanto para a própria usina quanto para o meio ambiente, incluindo a população, especialmente em casos de liberação de material radioativo (AMBROS, 2005). A sociedade moderna depende fortemente da eletricidade em atividades diárias, como o transporte por metrô, o uso de eletrodomésticos e a comunicação por celulares. A eletricidade é vital para o crescimento econômico e o bem-estar humano, e pode ser gerada a partir de várias fontes (TRIGOSO, 2004). No Brasil, as usinas hidrelétricas respondem pela maior parte da produção de energia, enquanto as nucleares contribuem com cerca de 3% da matriz energética nacional, gerando 1.900 MW de energia elétrica (RICARDO, 2010).

A energia nuclear é considerada uma fonte limpa de energia por não emitir carbono, ao contrário das fontes não renováveis. Assim, ela contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação das mudanças climáticas. Atualmente, há mais de 400 usinas nucleares em operação e cerca de 50 em construção, suprimindo aproximadamente 11% da demanda global por eletricidade (CARVALHO, 2016).

No Brasil, há atualmente duas usinas nucleares em operação e uma terceira em construção em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. A usina nuclear é um sistema complexo que reúne dezenas de milhares de componentes e subsistemas, necessitando de monitoramento e controle constantes. Os operadores da sala de controle enfrentam desafios na tomada de decisões sempre que há uma alteração no estado da planta (REIS, 2015). Em eventos anômalos, a responsabilidade das decisões cabe em grande parte aos operadores, o que pode aumentar a probabilidade de erro humano.

Esses profissionais são encarregados de monitorar e diagnosticar as leituras dos instrumentos na sala de controle, tomando decisões críticas para evitar incidentes. Para minimizar a possibilidade de erros, foram desenvolvidos sistemas de apoio à operação, que ajudam a prever possíveis falhas, especialmente em cenários críticos nos quais muitos alarmes podem ser disparados, como no caso de um acidente. Esses sistemas auxiliam os operadores a lidar com grandes quantidades de dados durante eventos anômalos, reduzindo a possibilidade de diagnósticos equivocados e melhorando o desempenho operacional (CARVALHO; ASSUMPÇÃO, 2022).

A detecção de ocorrências anômalas é essencial para manter a operação segura de uma usina nuclear. Identificar esses incidentes de forma rápida permite que os operadores priorizem e transmitam informações relevantes para evitar complicações (DE FREITAS, 2019). Em caso de acidente, o desempenho dos operadores e as condições subsequentes da planta dependem fortemente de sua capacidade de diagnosticar e responder à situação com precisão. Isso envolve fatores como treinamento, design da sala de controle e procedimentos de emergência. Transientes mal identificados podem deteriorar as condições de segurança e potencialmente transformar problemas operacionais menores em acidentes graves (ARAUJO, 2010).

Após o incidente de *Three Mile Island*, em março de 1979, os projetos de usinas nucleares foram submetidos a uma revisão profunda, com foco na interface homem-sistema. Em resposta, a Comissão de Regulação Nuclear (NRC) emitiu uma série de documentos normativos, visando aprimorar a capacidade de resposta a acidentes (NASCIMENTO, 2015). Em 1983, Joyce e Lapinsky mencionaram esses documentos, que incluíam o uso de sistemas computadorizados, coletivamente conhecidos como *Parameter Display System* (SPDS).

Nos últimos anos, a incorporação de fatores humanos no design, construção e operação de usinas nucleares tornou-se cada vez mais importante. Em 1994, o NRC lançou o NUREG 711, delineando critérios para implementar programas de Engenharia de Fatores Humanos em salas de controle. Este programa avalia o impacto das interfaces operador-sistema (AVELLAR, 2018). Em 1996, o NRC emitiu o NUREG 800, estabelecendo o conteúdo e formato do capítulo 18 a ser incluído nos relatórios finais de análise, com o objetivo de garantir que as salas de controle sejam projetadas e avaliadas conforme as diretrizes do NUREG 711 (MOL, 2002).

Os procedimentos operacionais em usinas nucleares desempenham um papel fundamental na segurança e eficiência das operações. Esses documentos detalham diretrizes para que os operadores realizem tarefas essenciais, desde a inicialização até a parada do reator, abordando operações normais, transientes e situações de emergência. A elaboração desses procedimentos leva em consideração a complexidade das instalações, a segurança dos trabalhadores, a integridade do reator e a proteção ambiental (LEWERENZ, 2000).

A automatização desses procedimentos visa aprimorar a agilidade nas operações de usinas nucleares, sendo uma área de pesquisa significativa que busca melhorar a eficiência, reduzir o tempo de resposta a eventos e otimizar a tomada de decisões dos operadores. A introdução de tecnologias avançadas e interfaces mais intuitivas pode facilitar a execução precisa e rápida dos procedimentos. O Laboratório de Interfaces Homem-Sistemas (LABIHS), do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), é o ambiente experimental ideal para conduzir este estudo. O LABIHS possui um simulador de planta PWR (Reator de Água Pressurizada), sendo uma plataforma avançada e especializada para essas análises.

Neste contexto, a pesquisa concentra-se na automatização das condições iniciais de uma planta nuclear e na criação de uma tela de apoio aos operadores dos sistemas primário e secundário, visando o aprimoramento na identificação de determinados acidentes e transientes. A implementação dessas inovações busca reduzir a carga cognitiva dos operadores durante o treinamento, diminuir a probabilidade de erros na consulta aos manuais, reduzir o tempo necessário para iniciar a operação do simulador do reator (condições iniciais) e aumentar a agilidade na identificação dos três tipos de acidentes simulados. Essa abordagem não só se mostra mais eficiente e precisa, como também contribui para a segurança e eficácia na gestão de situações críticas.

A escolha do LABIHS para este estudo assegura um ambiente que simula com precisão as complexidades operacionais de uma planta PWR, permitindo a aplicação prática das soluções propostas. Dessa forma, o LABIHS se destaca como um centro estratégico para avaliar e validar as inovações implementadas, contribuindo para o avanço da pesquisa e para o aperfeiçoamento contínuo das operações em plantas nucleares.

1.2 Questão e objetivos da pesquisa

1.2.1 Questão da pesquisa

Durante uma análise aprofundada da literatura e das práticas de laboratório, identificou-se que as metodologias atuais carecem de uma estrutura adequada para lidar com a natureza subjetiva e interdependente das avaliações humanas no processo de detecção de acidentes e na automatização de procedimentos operacionais. Essa limitação é especialmente notável na identificação de diferentes tipos de acidentes e transientes, assim como na partida e parada de uma planta nuclear. Com base nisso, a questão central desta pesquisa é: *"Como realizar a automatização dos procedimentos operacionais e identificar acidentes em plantas nucleares, de forma a facilitar o diagnóstico e a resposta dos operadores diante de situações adversas?"*

1.2.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver uma ferramenta de automatização para os procedimentos operacionais e a identificação de três tipos de acidentes específicos — LOCA (Perda de Refrigerante), Perda de Energia CA, e ATWS (Transitório Antecipado sem Scram) — no simulador do Laboratório de Interfaces Homem-Sistema (LABIHS), situado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). Espera-se que essa ferramenta reduza o tempo necessário para que os operadores avaliem as variáveis que validam as condições iniciais de operação do simulador e, de forma assertiva, auxilie na identificação de possíveis acidentes postulados, otimizando os procedimentos de emergência no simulador.

1.3 Metodologia

Este projeto visou desenvolver uma ferramenta de automatização das condições iniciais de uma planta nuclear e realizar a análise de três acidentes potenciais, utilizando a interface do programa LabVIEW, que permite a comunicação com um simulador de usina nuclear PWR (*Pressurized Water Reactor*) no laboratório LABIHS, do Instituto de Engenharia Nuclear.

A dissertação contou com o apoio do Laboratório de Interfaces Homem-Sistema (LABIHS) do IEN. As variáveis necessárias para identificar os acidentes e verificar o status das condições iniciais foram definidas de acordo com os procedimentos descritos no manual de operação do simulador e nos procedimentos de emergência desenvolvidos em setembro de 2002 pelo Instituto de Pesquisa de Energia Atômica da Coreia (*Korea Atomic Energy Research Institute - KAERI*).

1.3.1 Estrutura do trabalho

Esta dissertação apresenta a criação de uma ferramenta para apoiar a tomada de decisão dos operadores em uma planta nuclear, utilizando a interface do programa LabVIEW, que se comunica via rede com a estação de trabalho do simulador do LABIHS. A ferramenta monitora o status das variáveis da planta e realiza procedimentos operacionais de forma sistemática. A interface do sistema com o operador ocorre por meio de duas telas: a primeira *exibe* o status das condições iniciais de operação do simulador e fornece indicadores de três tipos possíveis de acidentes — Perda de Energia AC, ATWS (*Anticipated Transient Without Scram*), e LOCA (*Loss of Coolant Accident*) do tipo "Ruptura no Gerador de Vapor - *Steam Generator Rupture*".

Após as etapas de reconhecimento e identificação das principais variáveis, foi adotada uma modelagem que atende a critérios de estabilidade e processamento computacional em tempo real. Finalmente, foram realizadas simulações dos processos e sistemas para uma avaliação qualitativa dos impactos das melhorias propostas.

A estrutura desta dissertação é organizada da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresenta a motivação do trabalho, as principais metodologias utilizadas em simulação de reatores e uma introdução ao desenvolvimento e organização do trabalho.

Capítulo 2: Fornece uma descrição simplificada das plantas nucleares, salas de controle, simuladores de plantas nucleares, interfaces do laboratório LABIHS, ferramentas de apoio à operação, tipos de sistemas em salas de controle,

tomada de decisão assistida, suas vantagens e desvantagens, além de uma introdução ao uso do LabVIEW.

Capítulo 3: Explora detalhadamente as ferramentas de apoio à operação.

Capítulo 4: Realiza uma análise dos transientes de acidentes industriais (usinas).

Capítulo 5: Descreve a caracterização do local de aplicação do método de avaliação e apresenta o Instituto de Engenharia Nuclear e o Laboratório de Interfaces Homem-Sistema (LABIHS).

Capítulo 6: Apresenta os resultados das simulações realizadas com o simulador.

Capítulo 7: Conclui o trabalho com considerações finais e sugestões para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para compreender as abordagens que sustentam esta dissertação.

2.1 Usinas nucleares

Uma usina nuclear é uma instalação industrial projetada para gerar eletricidade utilizando materiais radioativos. Essa fonte de energia representa uma alternativa viável aos métodos convencionais, que dependem de recursos naturais, como a energia hidrelétrica ou combustíveis fósseis (carvão, gás e petróleo). A energia nuclear possui uma eficiência superior à de fontes alternativas, como a energia eólica, e oferece um custo de produção relativamente baixo (SANTOS, 2020). Segundo a Associação Nuclear Mundial, 30 países utilizam energia nuclear, com mais de 400 reatores operando globalmente e respondendo por aproximadamente 11% da demanda mundial de eletricidade. Os Estados Unidos lideram como o maior produtor de energia nuclear (SILVA, 2022).

De acordo com Neto (2012), a técnica mais comum para a geração de energia nuclear é a fissão, em que o núcleo de um átomo é dividido. A energia liberada pela fissão pode ser convertida em luz quando liberada rapidamente, enquanto uma liberação controlada gera calor, utilizado em usinas nucleares. Atualmente, o urânio é o elemento mais empregado para essa finalidade, e o Brasil possui uma das maiores reservas de urânio do mundo.

O funcionamento das usinas nucleares depende de um vaso de pressão, que contém água para resfriar o núcleo do reator onde está o combustível nuclear. O reator aquece a água do circuito primário, que passa por um gerador de vapor. A alta pressão do fluido movimenta as turbinas, gerando energia elétrica. Após movimentar as turbinas, o vapor é resfriado em um condensador, voltando ao estado líquido para ser reutilizado no processo (ROCHA, 2021). A Figura 1 apresenta a estrutura de uma usina nuclear do tipo PWR.

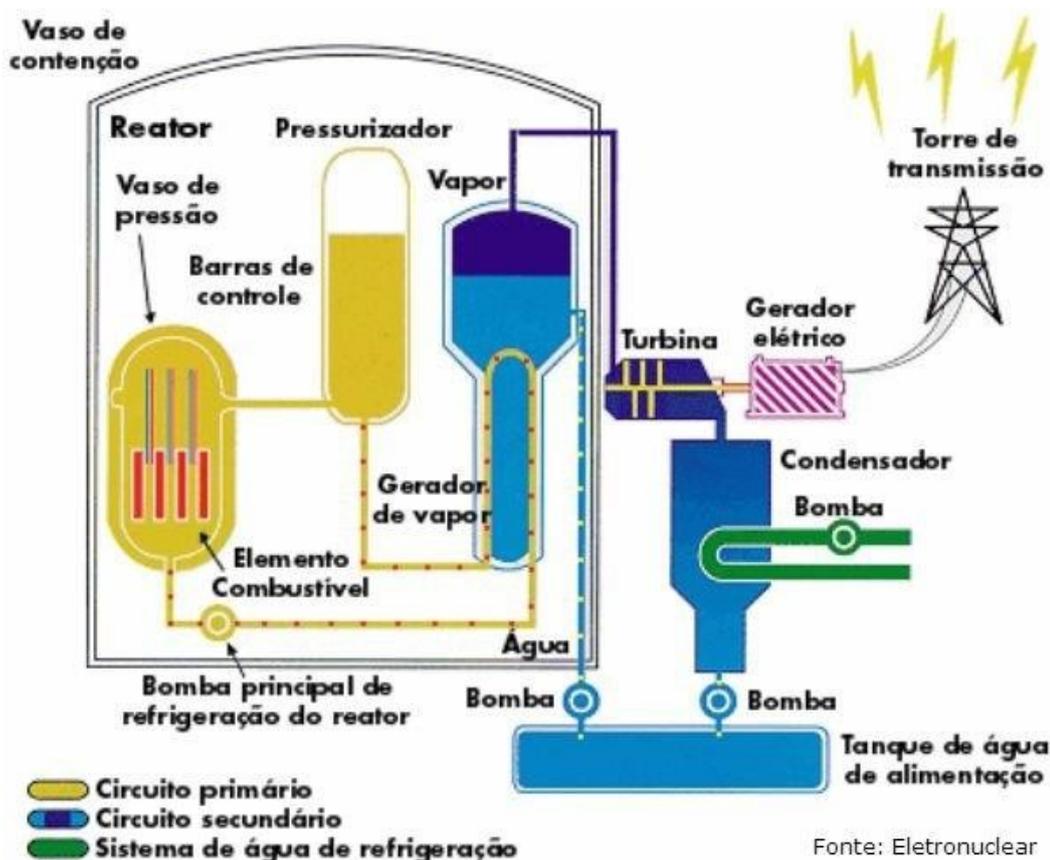


Figura 1: Planta nuclear

Fonte: Eletronuclear (2021).

Certos elementos químicos podem converter massa em energia por meio de reações nucleares, conforme ilustrado por Albert Einstein. Alguns elementos sofrem transformações espontâneas, enquanto outros requerem técnicas específicas para iniciar o processo. A eletricidade pode ser gerada de duas formas a partir da energia nuclear: pela fissão nuclear, que divide os núcleos atômicos em partículas menores, ou pela fusão nuclear, que funde múltiplos núcleos para formar um novo elemento (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018).

Conforme a Associação Nuclear Mundial (WNA), a energia nuclear é responsável por cerca de 14% da produção global de eletricidade, com previsão de crescimento devido à construção de novas usinas nucleares em países como China e Índia. Os Estados Unidos, com o maior parque nuclear do mundo, continuam expandindo sua capacidade e estendendo a vida útil de várias usinas. França e Japão, com 58 e 50 reatores, respectivamente, são grandes produtores de energia nuclear, seguidos por Rússia e Coreia do Sul (VEIGA, 2018).

A energia nuclear tem a vantagem de exigir pouca dependência de combustíveis fósseis, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes. As usinas nucleares ocupam menos espaço e podem ser instaladas próximas a centros urbanos, além de não dependerem de condições climáticas, como vento ou chuva, para operar (SEGANTINE, 2020).

A utilização de urânio como fonte de combustível em usinas nucleares é economicamente viável, dadas as vastas e acessíveis reservas que provavelmente não se esgotarão em breve. Essa visão é corroborada por pesquisas de opinião realizadas na Europa, nos Estados Unidos e na Ásia, que indicam a aceitação pública da construção de novas usinas e da substituição das antigas. Ambientalistas respeitados, como James Lovelock, conhecido por sua “Teoria de Gaia”, e o fundador do Greenpeace, Patrick Moore, acreditam que a energia nuclear é indispensável para mitigar os riscos do aquecimento global e seus desafios associados (GAVRONSKI, 2007).

No reator, a fissão do átomo de urânio gera calor, elevando a temperatura da água a 320 graus Celsius. Para evitar a ebulição — que normalmente ocorre a 100 graus Celsius — a água é mantida sob uma pressão 157 vezes maior que a pressão atmosférica (BANDEIRA, 2005).

O gerador de vapor é um componente crucial da usina nuclear, facilitando a troca de calor entre dois circuitos independentes: os circuitos primário e secundário. O circuito secundário é responsável por acionar a turbina, que então gira o gerador elétrico a uma velocidade constante. Após passar pela turbina, o vapor segue para o condensador, onde é resfriado por um terceiro circuito que traz água do mar. Esse sistema de três circuitos assegura que a água do reator nunca entre em contato com as demais, garantindo um alto grau de proteção contra a radiação (LAZZARI, 2020).

O projeto da usina nuclear incorpora sistemas de segurança redundantes e independentes, proporcionando proteção adicional contra circunstâncias imprevistas. O sistema de segurança baseia-se na criação de barreiras físicas sucessivas que garantem o controle total dos níveis de radiação. A estrutura molecular dos grânulos de dióxido de urânio preserva efetivamente a maioria dos produtos gerados durante a fissão (COSTA, 2019). As hastes metálicas responsáveis por suportar as barras de controle são confeccionadas a partir de uma liga exclusiva, sendo seladas para

garantir proteção adicional. O vaso do reator desempenha um papel crucial como limite de fim de curso, enquanto a blindagem radiológica é essencial para possibilitar o acesso seguro dos trabalhadores próximos ao reator. Projetada para resistir a impactos catastróficos, o invólucro de aço especializado possui uma espessura de 3 centímetros. Além disso, a barreira número seis, construída em concreto com uma robusta espessura de 70 centímetros, atua como a última linha de defesa em caso de comprometimento de qualquer outra barreira (QUEIROZ, 2020).

2.2 Salas de controle das usinas nucleares

As salas de controle são componentes cruciais de qualquer planta industrial, sendo responsáveis por regular e manter condições seguras de operação, tanto em situações normais quanto em emergências. Nas usinas nucleares, essas salas assumem uma complexidade adicional, pois supervisionam os processos nucleares e termodinâmicos envolvidos na produção de energia elétrica (SANTOS, 2021). Operadores qualificados gerenciam esses sistemas, utilizando uma variedade de interfaces e estações de monitoramento para garantir operações seguras e eficientes. As interfaces são projetadas para oferecer suporte aos operadores em atividades rotineiras e em cenários de emergência (GUIMARÃES, 2017).

Na sala de controle, os operadores realizam uma série de procedimentos, incluindo o início e a parada do reator nuclear, a gestão de alarmes e a realização de diagnósticos de falhas, sempre priorizando os sistemas de segurança e comunicação. Os sistemas informatizados são projetados com redundância e interconectividade, assegurando um alto nível de confiabilidade (PINHO, 2018).

A engenharia de fatores humanos estuda as características e limitações dos operadores para desenvolver sistemas adequados aos usuários. Historicamente, os designers confiavam no bom senso e em métodos de tentativa e erro para construir máquinas e ferramentas. Contudo, a Revolução Industrial do século XVIII trouxe avanços tecnológicos significativos, culminando na invenção de máquinas que revolucionaram a produtividade. A Segunda Guerra Mundial e a Era Espacial intensificaram a necessidade de máquinas complexas que dependiam fortemente de operadores humanos, levando ao desenvolvimento de salas de controle com interfaces de sistema de operador (WAZLAWICK, 2019).

As melhorias tecnológicas nas salas de controle estão intrinsecamente ligadas aos avanços nos sistemas de regulação, permitindo a centralização das informações e o controle remoto dos processos. A engenharia de sistemas envolve um processo interativo que visa compreender as necessidades do usuário e desenvolver requisitos operacionais com base no ciclo de vida do sistema. O ciclo de vida das salas de controle de reatores nucleares abrange a identificação das necessidades operacionais, o desenvolvimento de projetos conceituais, o projeto detalhado e a construção, incluindo testes e avaliações integradas da sala de controle (FALLER, 2007).

2.2.1 Simuladores de plantas nucleares

A geração de energia por meio de reações nucleares exige um alto nível de segurança e um rigoroso treinamento dos operadores, devido ao imenso potencial energético envolvido. Essa segurança é garantida por mecanismos e rotinas desenvolvidos para prever e prevenir eventuais acidentes ou avarias nos equipamentos (SANTOS, 2018).

Para evitar consequências catastróficas, o treinamento de operadores não pode ser realizado no reator real durante a operação normal. Em vez disso, utilizam-se simulações computacionais para minimizar a exposição a riscos. No início do século XXI, simuladores foram desenvolvidos para reproduzir total ou parcialmente a operação dos equipamentos, facilitando testes e o treinamento dos operadores.

No contexto nuclear, os simuladores são classificados de acordo com sua função. Os simuladores parciais, por exemplo, replicam com precisão apenas uma parte específica da planta, contribuindo significativamente para o treinamento em áreas focais (VICENTINI, 2018). Já os simuladores de escopo completo permitem uma simulação integral da operação da planta. Ao replicar a sala de controle, esses simuladores proporcionam um treinamento imersivo, emulando o ambiente operacional real.

O Simulador de Princípios Básicos é uma ferramenta que destaca conceitos fundamentais, demonstrando os processos físicos primários de uma usina. Ele oferece uma visão abrangente do comportamento da usina, ajudando os operadores

a compreender os processos físicos subjacentes e os procedimentos operacionais padrão de uma usina nuclear. Sua importância reside em fornecer uma compreensão clara desses princípios básicos (SANTOS, 2003).

O acidente de *Three Mile Island* (TMI) representou um divisor de águas na aplicação de simuladores para o treinamento de operadores de usinas nucleares. O evento evidenciou que alguns acidentes eram imprevisíveis e não contemplados nos programas de treinamento existentes. Isso trouxe à tona a importância dos fatores humanos relacionados ao uso da energia nuclear, resultando na adoção de simuladores nos programas de formação – uma tendência que já vinha se consolidando (FONSECA, 2004).

2.3 Sistemas de monitoração e supervisão em plantas industriais

Os sistemas de monitoração e supervisão abrangem uma variedade de tecnologias inovadoras, incluindo sistemas de controle e software, que permitem que máquinas e processos operem de forma independente, reduzindo a necessidade de intervenção humana. Essa abordagem diminui a possibilidade de erro humano, resultando em economia de custos e tempo, ao mesmo tempo em que proporciona um desempenho superior (RIBEIRO, 2017). A implementação eficaz desses sistemas requer uma gama de ferramentas que abrange diferentes dispositivos e sistemas, impactando múltiplos estágios do processo de fabricação (VASSÃO, 2021).

A tecnologia de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) desempenha um papel crucial no controle e supervisão dos processos industriais. Este sistema interage com dispositivos como sensores, capturando dados em tempo real e registrando eventos em logs. O SCADA facilita a análise de dados, fornecendo insights críticos para a tomada de decisões informadas e para a otimização dos processos industriais (THOMAS; KUMAR; CHANDNA, 2004).

Nos sistemas de manufatura e produção, a Interface Humano-Sistema (IHM) serve como uma interface digital que permite aos usuários se comunicarem e controlarem eficientemente o processo de produção. Ao simplificar dados complexos e apresentá-los de maneira acessível, a IHM torna-se uma ferramenta fundamental, aprimorando a eficiência do processo e fortalecendo a capacidade dos operadores de tomar decisões rápidas e informadas, contribuindo para um ambiente de trabalho

mais ágil e produtivo (VASSÃO, 2021).

Além disso, uma rede de monitoramento central, conhecida como Sistema de Controle Distribuído (DCS), proporciona interconectividade entre os dispositivos que controlam os diversos componentes do sistema, demonstrando-se benéfica para diversos setores (MAGALHÃES; RODRIGUES, 2004).

2.3.1 *Sistemas de Controle em Salas de Controle*

A geração de energia elétrica é um processo intrincado que envolve uma interação complexa entre agentes humanos e uma variedade de equipamentos, componentes e sistemas. As fontes de energia podem incluir energia nuclear, combustíveis fósseis e hidrelétricas. No lado da máquina, esse sistema é composto por equipamentos sofisticados que combinam hardware e software, projetados para controlar processos termodinâmicos e garantir a produção eficiente de energia elétrica (REIS; SANTOS, 2006).

O aspecto humano dessa organização sociotécnica inclui diversas divisões, como gerenciamento, engenharia, manutenção, operação e treinamento. A equipe operacional assume a importante responsabilidade de harmonizar as duas partes do sistema, assegurando que padrões de segurança e eficiência sejam respeitados. Isso é feito através do manuseio de inúmeros painéis, visores e comandos presentes nas salas de controle (NUNES, 2004).

Os operadores seguem procedimentos pré-estabelecidos e utilizam várias interfaces, como sistemas de informação computadorizados e sistemas de suporte ao operador, para guiar suas ações. Os protocolos de segurança são sustentados por recursos de engenharia, como intertravamentos, barreiras de proteção e análise do modo de falha, que visam mitigar potenciais falhas (GRECCO, 2018).

Entretanto, acidentes catastróficos, como os de *Three Mile Island* (TMI) e *Chernobyl*, demonstraram que, apesar dos esforços de engenharia, fatores humanos e de design contribuíram para falhas na segurança. A análise desses eventos revelou que a quebra de segurança e eficiência ocorreu devido a procedimentos inadequados, falta de uma cultura de segurança, design de interface insatisfatório e

múltiplas falhas de equipamentos. Esses fatores culminaram em situações em que as plantas operavam nos limites da segurança e da eficiência, resultando em falhas de comunicação entre os operadores e os sistemas, levando à perda de controle sobre as instalações (PARREIRA; NETO; CORRÊA, 2021).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) adotou uma abordagem proativa para aumentar a segurança em suas usinas nucleares. Como órgão regulador, lançou um programa de pesquisa em ergonomia e fatores humanos, focando na interação e comunicação entre seres humanos e sistemas computadorizados. O objetivo desse programa é modernizar as salas de controle dos reatores nucleares, incluindo os de pesquisa ANGRA I, II e III. O LABIHS, laboratório situado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), é central para esse programa, realizando estudos sobre as funções do operador e apoiando análises nesse ambiente complexo (MARTINS, 2008).

As salas de controle têm um papel fundamental na vida cotidiana, regulando serviços essenciais como fornecimento de eletricidade, gás, gerenciamento de transporte público e controle de tráfego aéreo (JUNQUEIRA; DOMINGUES; BONON NETTO, 2000). À medida que as economias avançam, surgem inovações tecnológicas que levam a revisões frequentes nas metodologias de trabalho e exigem maior especialização dos trabalhadores. Com os avanços nas tecnologias de comunicação e computação, a centralização de atividades em centros de controle se tornou viável, permitindo uma gestão mais eficaz dos processos.

Tradicionalmente, os sistemas de controle eram vistos através de uma lente tecnocêntrica, onde a tecnologia era considerada isoladamente e os humanos eram vistos como meros apêndices das máquinas. Em contraste, uma perspectiva mais centrada no ser humano busca capacitar os indivíduos, considerando a tecnologia como uma ferramenta para aprimorar suas capacidades (MARQUES, 2005).

Os desafios enfrentados pelos engenheiros de sistemas industriais são ampliados pelo uso crescente de computadores para controle de produção, especialmente em indústrias de processo contínuo. O primeiro desafio é desenvolver um sistema confiável que minimize as falhas humanas. O segundo envolve a gestão da interferência humana, identificando e minimizando riscos. O terceiro refere-se à

apresentação eficaz das informações geradas por computador. O resultado dessa evolução tecnológica levou à criação de salas de controle que permitem a centralização e a gestão remota de comandos e informações (ZAMBERLAN, 1999).

À medida que o controle se torna mais centralizado, as demandas cognitivas dos trabalhadores aumentam. Esses profissionais precisam de uma acuidade mental elevada para interpretar e executar suas funções de maneira eficaz. As tarefas de tomada de decisão e resolução de problemas exigem uma adaptação contínua às novas tecnologias (ADERALDO, 2023).

Historicamente, as salas de controle utilizavam mesas sinópticas que ocupavam considerável espaço. Com o advento dos microprocessadores, essa abordagem tornou-se mais centralizada, levando a transformações significativas nas comunicações e nos métodos de controle. Os monitores passaram a substituir as tabelas sinópticas, alterando a organização do trabalho nesses ambientes (CORDOVIL, 2019).

A transição de tecnologia analógica para digital exigiu que os projetistas adaptassem a apresentação das informações, dividindo-as através de consoles em vez de painéis sinópticos. Embora isso tenha possibilitado uma maior flexibilidade na visualização dos dados, também pode resultar em uma visão fragmentada do processo, dificultando a compreensão geral das operações (QUINTANS, 2019).

Mudanças nos métodos de recuperação de dados impactaram a forma como as informações são apresentadas aos operadores. Antes, as tabelas sinópticas forneciam uma visão abrangente dos parâmetros, mas atualmente, os dados retransmitidos podem não refletir fielmente o estado do sistema. No entanto, a capacidade dos computadores de resolver equações complexas permite uma variedade maior de opções de visualização, facilitando a adaptação dos operadores às suas necessidades (SANTOS & ZAMBERLAN, 1992).

O uso de telas para explorar informações cria uma experiência semelhante a observar o mundo através de uma fechadura, forçando os operadores a alternar entre diferentes interfaces para encontrar dados essenciais. Essa abordagem pode aumentar a carga de trabalho cognitiva, embora a eficiência das telas permita um

processamento de variáveis de entrada muito mais rápido do que seria possível manualmente. Essa rapidez é crucial para a segurança operacional, pois permite a identificação imediata de quaisquer inconsistências nos parâmetros do sistema (SILVA, 2023).

Estudos recentes indicam que, quando humanos e máquinas colaboram, sua eficiência conjunta frequentemente supera o desempenho individual. Portanto, a modernização das salas de controle deve ser acompanhada por adaptações que garantam a produtividade, saúde e segurança dos trabalhadores. A ergonomia desempenha um papel vital nesse contexto, promovendo a interação harmoniosa entre operadores e sistemas, contribuindo assim para um ambiente de trabalho seguro e eficiente (ASSIS, 2021).

2.3.2 Tomada de decisão através de automatização

A principal responsabilidade dos operadores em uma sala de controle de usinas para geração de energia é manter vigilância constante para evitar problemas que possam se transformar em crises. Eles estão principalmente ocupados em filtrar e analisar informações de diversas fontes. Esses dados são processados continuamente pelos operadores para identificar e resolver problemas em tempo real (MORAIS, 2019).

Segundo Davey e Feher (1997, citado em PONS, 2004), a tarefa de interpretar, intervir, diagnosticar e restaurar elementos-chave de um processo é realizada por humanos em tempo real. Os autores postulam que os indivíduos possuem três atributos que lhes permitem realizar essas tarefas de forma eficaz: a detecção excepcional de sinais em meio ao ruído, a capacidade de raciocinar em situações incertas e abstratas, e a habilidade de organizar informações conceitualmente.

A automatização está transformando a tomada de decisão em ambientes industriais ao ajudar os operadores a lidar com a complexidade e a velocidade dos processos. Isso reduz a carga cognitiva dos operadores, permitindo que se concentrem em decisões mais estratégicas e críticas. Em particular, a automatização permite uma resposta mais rápida e precisa a situações emergenciais, o que é vital em operações onde o tempo é um fator crucial (SMITH, 2019).

Apesar da crescente automatização, os operadores possuem atributos que os tornam indispensáveis. Eles oferecem uma flexibilidade que vai além do que a automatização pode alcançar. Mesmo no atual estágio tecnológico, a presença de operadores humanos é necessária para examinar automatismos e executar tarefas manuais. Wickens et al. (1998) destacam quatro características do processo que influenciam as atividades do operador: periculosidade, complexidade, continuidade e coletividade.

A periculosidade do trabalho é justificada pelo envolvimento em um produto vital que atende a todos os setores da sociedade: a eletricidade. Isso cria um clima de vigilância e tensão para evitar quedas de energia. Além disso, a complexidade dos processos contínuos é determinada pelo ambiente em que o indivíduo opera, que é um sistema dinâmico com inúmeras variáveis interativas, objetivos muitas vezes conflitantes e, às vezes, riscos elevados. Keyser (1988, apud JARUFE, 1999) descreve esse ambiente como desafiador.

Os estados das variáveis nos procedimentos de laboratório são comparados com os da tela gerada a partir das condições iniciais. Se essas condições não estiverem de acordo com o procedimento padrão, os operadores não poderão iniciar seu trabalho. O processo de controle envolve operar terminais de vídeo, monitorar alarmes, trocar dados com operadores de outros setores por meios de comunicação e referenciar normas e procedimentos para a realização de tarefas (CORRÊA, 2018).

Embora exista uma rotina a ser seguida para as manobras programadas, a ocorrência de eventos aleatórios e imprevisíveis exige vigilância constante do operador. Esse fluxo ininterrupto de atividades confere continuidade ao processo (BALTAZAR, 2020).

A noção de coletividade depende do entendimento de que um operador não é uma entidade isolada, mas interage com outros operadores de vários domínios. Santos e Zamberlan (1992) afirmam que os operadores externos possuem métodos adicionais para monitorar o processo, como discernir os ruídos emitidos pelos equipamentos. Esses operadores são frequentemente chamados pela sala de operações para verificar e complementar os dados fornecidos pelo sistema automático. Maia (2002) corrobora essa afirmação ao destacar que, mesmo em

sistemas automatizados, as trocas verbais entre os operadores continuam a ser uma importante fonte de informação.

Para aprofundar a discussão anterior, Santos e Zamberlan (1992) destacam a alta demanda de controle de processo, especificamente o papel do operador no monitoramento e processamento de informações. Os operadores devem processar informações continuamente para identificar e prevenir anomalias, enquanto diagnosticam e resolvem problemas prontamente. Isso requer atenção frequente, recuperação da memória, raciocínio e tomada de decisões, além do monitoramento de informações visuais e instrumentos na sala de controle. Além disso, os operadores devem estar atentos aos riscos potenciais, incertezas e à ansiedade, dada sua responsabilidade de supervisionar o tráfego, as estações e a energia. Os autores sugerem que a capacidade dos operadores de processar informações pode ser prejudicada por vários fatores, incluindo fadiga, condições ambientais como ruído, iluminação e temperatura, e a qualidade da apresentação das informações. Além disso, fatores como postura, suporte de informações e duração da atividade podem ser críticos para manter a confiabilidade e a qualidade da resposta do operador em situações normais e de crise. O estudo enfatiza a importância do ambiente físico nas salas de controle e como isso pode afetar o comportamento e o desempenho dos indivíduos. Espaços projetados de forma inadequada podem impactar negativamente a qualidade de vida e o trabalho dos operadores.

Embora a automatização traga muitos benefícios, também apresenta desafios e limitações. A dependência excessiva de sistemas automatizados pode levar a uma diminuição da vigilância humana e à possível perda de habilidades operacionais críticas. Portanto, é crucial encontrar um equilíbrio entre a automatização e o envolvimento humano para garantir a eficácia e a segurança dos processos (SILVA; ENGELMANN, 2020).

2.3.3 Vantagens da automatização

Com o avanço da tecnologia, surgiram ferramentas para otimizar processos empresariais, incluindo planilhas e arquivos de texto. Contudo, essas soluções, inicialmente, apenas relocaram o problema: documentos eram salvos de forma aleatória, o que reduzia a produtividade e aumentava o tempo necessário para encontrar informações (DAVI, 2021).

Atualmente, a situação evoluiu significativamente com a chegada da Indústria 4.0 e seus diversos avanços, como a Internet das Coisas, que possibilitam elevar a produtividade e a eficiência das operações industriais por meio da otimização de tarefas, maior agilidade e integração de processos (SANTOS; LEME, 2018).

No cenário nacional e internacional, empresas que lideram o mercado automatizaram seus processos com o uso de máquinas e robôs. Além disso, utilizam impressão 3D para produzir moldes e peças em grande escala, e adotaram softwares avançados que integram todas as atividades e áreas. Tais tecnologias simplificaram a produção, reduzindo lacunas de controle e minimizando desperdícios a níveis praticamente insignificantes (BASTIAN, 2021).

A indústria automotiva, por exemplo, tem se destacado na adoção de processos automatizados. Algumas fábricas do setor utilizam tecnologia de ponta, como óculos de realidade virtual para visualização e modificação de projetos de veículos. Outras, empregam linhas de montagem automatizadas, operadas por robôs, para acelerar o processo de produção, exemplificando a interação entre o digital e o físico na era da transformação digital (SCHWAB, 2019).

Enquanto grandes empresas adaptam-se facilmente às tecnologias da Quarta Revolução Industrial, empresas menores enfrentam desafios na transição. Uma solução eficaz para esse público tem sido a adoção de softwares de gestão, que simplificam o controle dos processos e integram a produção (WAGNER; HOLLENBECK, 2018).

A utilização de sistemas de gestão permite que as empresas acessem informações rapidamente, monitorem dados em tempo real através de dispositivos móveis, gerem relatórios detalhados de todas as atividades, padronizem operações e até agendem tarefas para execução automática. Essas ferramentas otimizam processos e contribuem para uma gestão mais segura e eficiente, beneficiando também a qualidade de vida dos colaboradores (LAUDON, 2022).

Os principais benefícios da automatização industrial incluem otimização do tempo, monitoramento de resultados em tempo real, aumento da produtividade pela identificação de ineficiências e redução de desperdícios, melhoria na comunicação

entre departamentos, eliminação de tarefas repetitivas, integração total entre áreas, controle de prazos e rastreabilidade dos processos. Essas vantagens destacam a importância de adotar tecnologias para aumentar a competitividade (TEXEIRA, 2019).

Embora a automatização possa impulsionar a produtividade, ela também gera preocupações entre os colaboradores, que temem perder empregos para as máquinas. É crucial, portanto, buscar um equilíbrio entre tecnologia e trabalho humano, de modo a otimizar os processos de forma inclusiva (SILVA; ENGELMANN, 2020).

Para implementar tecnologia de ponta, as empresas precisam avaliar a sua compatibilidade com os objetivos estratégicos de longo prazo e determinar o melhor plano de implantação. Uma análise aprofundada e controle rigoroso podem permitir a automação inteligente, antecipando padrões de dados para a tomada de decisões informadas e promovendo a melhoria contínua. Com a qualidade padronizada e a eficiência produtiva elevadas, as empresas conseguem alcançar excelência operacional e se destacam no mercado (BOAVENTURA, 2022).

A automatização das condições iniciais em uma usina é essencial para assegurar o funcionamento adequado de todos os equipamentos e a execução eficiente dos processos. Esse controle inclui a instalação de sensores e outros dispositivos especializados que monitoram e regulam a temperatura, pressão, umidade e o fluxo de líquidos e gases da usina (JESUS; SANTOS, 2019).

Uma das principais vantagens da automatização em usinas é a redução de custos. Com sensores e tecnologias de análise em tempo real, é possível diminuir o consumo de energia e de água, além de otimizar o uso da mão de obra em algumas etapas. A automatização permite identificar falhas precocemente, evitando perdas e aumentando a eficiência. Outro benefício importante é a melhoria da qualidade dos produtos, tornando-os mais uniformes e competitivos no mercado (PERINI, 2018).

2.4 Ferramenta de automatização em Labview

A ferramenta computacional utilizada para a automatização dos procedimentos no LABIHS foi o LabVIEW (National Instruments, 2022). O LabVIEW é um software desenvolvido para simular projetos de engenharia, oferecendo aos usuários a capacidade de realizar testes, medições e controle. Essa ferramenta simplifica a interação entre projetos e diversos hardwares, servindo como um simulador que aproxima a concepção teórica da aplicação prática (NORONHA, 2018).

O programa utilizado para criar as interfaces de monitoramento e controle insere-se no contexto da Indústria 4.0, que introduziu a automatização em diversos setores. O LabVIEW emergiu como um software amplamente adotado, especialmente em ambientes que demandam coleta de dados em tempo real. Esse processo exige sensores conectados a computadores com o LabVIEW instalado, que funciona como uma interface gráfica e instrumental entre os sensores e o sistema de controle. Desenvolvido pela National Instruments, LabVIEW é um acrônimo para Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, uma das ferramentas mais empregadas na automatização industrial (COTENTE, 2022).

Na versão mais recente, LabVIEW 2020, a interação com hardware virtual foi aprimorada, permitindo uma análise de dados e processamento de sinais ainda mais eficientes. Os controles de sistema foram otimizados, proporcionando aos usuários uma experiência mais fluida, apoiada por testes rigorosos e medições precisas (COTENTE, 2022).

Os computadores, e em particular ferramentas como o LabVIEW, destinam-se a simplificar e agilizar tarefas, especialmente nas áreas de pesquisa, controle industrial e análise de dados. Embora a tecnologia baseada em soluções computacionais ofereça muitos benefícios, é essencial que engenheiros e cientistas ponderem suas vantagens e limitações ao decidir sobre seu uso. Velocidade e eficiência são fatores cruciais para a tomada de decisões no desenvolvimento de sistemas complexos (COTENTE, 2022).

A linguagem de programação utilizada nesta plataforma, chamada G, é especializada em programação gráfica. Com mais de 3.000 ferramentas e funções disponíveis, os usuários podem criar diagramas de blocos facilmente. O aspecto visual do G torna a programação mais intuitiva, facilitando a montagem de sistemas complexos. No setor industrial, *LabVIEW* é utilizado para monitorar a geração de energia, visando otimizar a produtividade dos equipamentos e agilizar a execução das atividades, reduzindo o tempo necessário para operações (COTENTE, 2022).

O *LabVIEW* materializa o conceito de Instrumento Virtual (VI), permitindo ao computador replicar controles e visualizações de instrumentos reais com flexibilidade e personalização, características que o software proporciona. Em vez de adquirir diversos equipamentos físicos, como analisadores de espectro, osciloscópios e gravadores, é possível simular esses instrumentos virtualmente por meio de um conversor analógico-digital de alto desempenho conectado ao *LabVIEW*. Essa funcionalidade é central ao software, de modo que os próprios programas em *LabVIEW* são chamados de VIs. Para criar aplicações mais complexas, VIs simples podem ser combinados, funcionando como subprogramas (ALVES, 2018).

Quando comparamos sistemas de instrumentação virtual como o *LabVIEW* a instrumentos físicos, notamos que, embora o desempenho virtual ofereça alta flexibilidade e custo-benefício, os instrumentos dedicados tendem a ser mais caros devido ao desempenho específico que oferecem (TANI, 2006).

A evolução na tecnologia de placas plug-in trouxe processadores próprios para muitas dessas placas, como os *Digital Signal Processors* (DSPs). Placas de aquisição de dados hoje incluem recursos avançados, como *Direct Memory Access* (DMA), temporização e acionamento, possibilitando a sincronização e o acoplamento de múltiplas placas para maximizar o processamento paralelo em PCs. Esse avanço melhora a eficiência em aplicações de instrumentação e aquisição de dados, mas requer maior conhecimento técnico para operar em comparação com instrumentos dedicados (JORGE, 2022; SANTOS, 2019).

A instrumentação virtual possui vantagens distintas sobre os instrumentos físicos, especialmente em termos de custo, desempenho, flexibilidade e personalização. Com o investimento em apenas um sistema baseado em PC, é possível criar instrumentos virtuais ajustados para atender necessidades específicas,

o que permite uma operação mais simplificada e focada (CÔRTEZ, 2017; VELLOSO, 2014).

Introduzido em 1986, o conceito de instrumentação virtual e diagrama de blocos no *LabVIEW* permanece na vanguarda da tecnologia de instrumentação e computação. À medida que os dispositivos se tornam mais complexos, o custo de desenvolvimento de software de teste acompanha essa evolução, mas o *LabVIEW* prioriza modularidade, manutenção e reutilização, favorecendo o trabalho dos desenvolvedores com compartilhamento de rotinas pré-escritas que aumentam a confiabilidade e economizam tempo (KODOSKY, 2020; MATOS; OLENIK, 2018).

O *LabVIEW* facilita simulações que envolvem circuitos elétricos, funções matemáticas e análise de dados estatísticos, além de processamento de sinais em tempo real e integração de hardware físico em um ambiente virtual. A versão mais recente, *LabVIEW 2020*, adapta-se a projetos de máquinas inteligentes e equipamentos industriais, sendo amplamente utilizada no ensino de engenharia e permitindo integração com microcontroladores, como os utilizados em projetos similares ao Arduino (GUERMANDI, 2022; BURATTO, 2020).

Aplicações de monitoramento e controle ambiental que requerem operações de baixa velocidade e longo prazo, ou tarefas de resposta rápida a picos de energia e grandes volumes de dados, são exemplos de operações onde a automatização pelo *LabVIEW* agrega benefícios. Além disso, a precisão consistente e a eliminação de erros humanos nos procedimentos de coleta e interpretação de dados melhoram o controle de qualidade, especialmente em cenários de alto risco ou localizados remotamente (COSTA, 2019; DAMILANO, 2022).

Mesmo com essas vantagens, a automatização apresenta desafios, como a sobrecarga de hardware ou software, que pode acarretar falhas se não for corretamente dimensionada. Avaliar a relação custo-benefício é essencial, pois sensores, software e computadores demandam investimento, mas os benefícios de simplificação do processo e aumento da qualidade dos dados são consideráveis, justificando o uso do *LabVIEW* em aplicações específicas (FENANDES, 2019; RODRIGUES, 2021).

As ferramentas desenvolvidas para auxiliar os operadores baseiam-se em variáveis compartilhadas na rede local, criadas por pesquisadores do SEESC, que dispõem mais de mil variáveis do processo. Essas variáveis são acessíveis como *shared variables*, no endereço IP do simulador (211.105.212.11:6340), e possibilitam que diferentes *threads* compartilhem dados. Tal abordagem é fundamental para programação simultânea e para o uso de sincronização para evitar corridas de dados e inconsistências (LABIHS, 2024).

O *LabVIEW* permite comunicação via TCP/IP, um protocolo essencial para interconectar dispositivos em rede, possibilitando enviar e receber dados por uma série de VIs específicos para essa comunicação. Cada um desses VIs, como *TCP Open Connection*, *TCP Write*, *TCP Read*, e *TCP Close Connection*, permite um controle rigoroso da comunicação de dados, favorecendo o uso em sistemas com várias variáveis compartilhadas e operações em tempo real.

2.5 Benefícios da utilização do Labview

O tópico da interface da ferramenta operador-sistema criada em *LabVIEW* indica que o foco do operador deve estar no monitoramento, na tomada de decisões e nas tarefas de controle da planta. Para otimizar o desempenho, recomenda-se a implementação de sistemas objetivos que auxiliem os operadores a compreender rapidamente o estado da planta e reduzam o tempo gasto em atividades secundárias, como análise de dados e navegação entre telas. Com essa abordagem, os operadores conseguem gerenciar a planta de forma mais eficiente, concentrando-se nas ações principais e minimizando distrações.

A ferramenta desenvolvida oferece inúmeros benefícios aos operadores, incluindo uma interface simples que exibe três tipos de acidentes para facilitar sua identificação. Ela permite a rápida detecção de acidentes de difícil diagnóstico, como o ATWS (Anticipated Transient Without Scram - Transiente Antecipado sem Scram), além de agilizar o processo de verificação em casos de perda de energia CA. A tela de condições iniciais é uma funcionalidade essencial, pois possibilita que operadores dos sistemas primário e secundário iniciem a operação do simulador com maior rapidez, minimizando a necessidade de consulta ao manual de operações. Os operadores podem assegurar que as condições iniciais estão corretas de acordo com o manual por meio do indicador "YES" na tela de condições iniciais.

2.6 Escolha do Labview como ferramenta para criação das telas

Embora existam diversas ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de interfaces de monitoramento e controle, a escolha do *LabVIEW* foi fundamentada em suas características únicas que atendem às necessidades específicas do simulador em desenvolvimento. O *LabVIEW* destaca-se por sua programação gráfica intuitiva, suporte extenso a instrumentação virtual e integração facilitada com diferentes dispositivos de hardware, permitindo que a interface operador-sistema seja configurada de maneira eficiente e robusta.

Adicionalmente, o *LabVIEW* possibilita a criação de diagramas de blocos visualmente claros, o que reduz o tempo necessário para o desenvolvimento e a manutenção do sistema, além de oferecer uma curva de aprendizado acessível aos operadores. Essas características tornam o *LabVIEW* a escolha ideal para aplicações que demandam precisão, facilidade de operação e monitoramento contínuo, como as de ambientes simulados de usinas nucleares.

2.7 Acidentes em usinas nucleares

Os acidentes em usinas nucleares variam em forma e gravidade, dependendo das falhas técnicas e das circunstâncias operacionais que os causam. Entre os eventos mais críticos estão aqueles que comprometem diretamente a segurança do reator, resultando em consequências significativas para a planta e seu entorno. Este capítulo aborda três tipos específicos de acidentes: a Perda de Energia AC, que pode comprometer os sistemas de resfriamento; o *ATWS (Anticipated Transient Without Scram – Transiente Antecipado sem Scram)*, quando o reator falha em desligar automaticamente durante um transiente; e o *LOCA (Loss of Coolant Accident – Acidente de Perda de Refrigerante)*, com foco na ruptura do gerador de vapor (*Steam Generator Rupture*), que pode provocar vazamento de refrigerante e exposição à radiação. A análise dessas situações permite uma compreensão mais profunda dos riscos envolvidos e das estratégias de mitigação necessárias em usinas nucleares (CAVALCANTI, 2021).

O *Loss of Coolant Accident (LOCA)* ocorre quando há rupturas em diferentes

partes do sistema de refrigeração, causando redução progressiva no fluxo de refrigerante. Isso pode resultar na incapacidade de resfriar o núcleo do reator, levando ao superaquecimento dos componentes do núcleo e possivelmente ao derretimento. Os tipos de *LOCA* são classificados pelo tamanho da ruptura e pelo evento inicial, podendo ocorrer em seis categorias: grandes rupturas de tubos (3-6 pés de diâmetro) (*LBLOCA*), rupturas intermediárias de tubos (2-6 polegadas) (*MBLOCA*), pequenas rupturas de tubos (0,5-2 polegadas) (*SBLOCA*), rupturas no vaso do reator, no gerador de vapor e nas tubulações ligadas ao sistema de resfriamento do reator (PIZZINGA, 2020).

Em casos de despressurização gradual do sistema de refrigeração, sensores reagem a baixa pressão, enquanto o núcleo permanece sob alta pressão, evitando o acionamento imediato de sistemas de segurança. Uma ruptura de tamanho médio (*MBLOCA*), entre 2 e 6 polegadas de diâmetro, eleva a pressão primária, acionando as bombas de refrigeração de emergência. Já uma ruptura grande (*LBLOCA*), com diâmetros acima de 6 polegadas, causa rápida despressurização do vaso, acionando os sistemas de injeção de refrigerante. Caso os sistemas de resfriamento de emergência não sejam ativados para restaurar o fluxo de refrigerante, o núcleo pode sofrer danos graves (SEVALHO, 2018).

O *Steam Generator Tube Rupture* (SGTR), ou ruptura do tubo do gerador de vapor, é uma ocorrência crítica em que uma das linhas de vapor se rompe, gerando vazamento de refrigerante radioativo para o gerador. Este evento afeta tanto os circuitos primários quanto os secundários, causando queda de temperatura no circuito primário e aumento da reatividade no núcleo, o que pode provocar superaquecimento dos componentes. No circuito secundário, ocorre um aumento de pressão e vazamento de produtos de fissão pela área danificada. Em reatores de água pressurizada (PWR), uma sequência típica de um SGTR envolve a ativação dos alarmes de baixa pressão e dos aquecedores para manter a pressão no circuito primário (MOREIRA, 2019; DOMINGUES, 2019).

Em um apagão (*blackout*), ocorre a perda total de energia elétrica, afetando equipamentos auxiliares e bombas de resfriamento do reator, o que pode levar ao superaquecimento do núcleo. Este tipo de falha é responsável por cerca de 51,4% dos riscos de danos ao núcleo. Em situações de *blackout*, a planta depende dos

geradores a diesel para fornecer energia para sistemas críticos, incluindo válvulas de alívio, que liberam vapor para a atmosfera até a restauração da energia principal (LAZZARI, 2020).

Em março de 1979, a unidade TMI-2 da usina de Three Mile Island, nos EUA, sofreu o maior acidente nuclear comercial do país. Um defeito mecânico interrompeu o fornecimento de água ao gerador, causando o aumento da pressão no sistema primário do reator e a abertura de uma válvula de alívio. A válvula permaneceu aberta devido a uma falha na instrumentação, o que não foi percebido pelos operadores, e resultou em vazamento de água de resfriamento (OLIVEIRA; BARROSO, 2019).

O desastre de Chernobyl, ocorrido em abril de 1986, exemplifica as consequências catastróficas de falhas operacionais e de projeto. Durante um teste de segurança, o reator de Chernobyl, com fração de vazio positiva, teve seu sistema de proteção desligado, levando a um aumento exponencial de potência e uma explosão catastrófica (MARTINS, 2019; VEIGA, 2018).

Estes casos demonstram a importância de sistemas de segurança robustos e o papel fundamental dos operadores no monitoramento e na tomada de decisões informadas, fatores essenciais para prevenir acidentes e proteger a integridade dos reatores e a segurança pública.

3 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO

3.1 O Instituto de Engenharia Nuclear (IEN)

Criado em 1962, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) é uma autarquia federal vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), unidade associada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O IEN teve origem em uma parceria entre a Universidade do Brasil (atualmente UFRJ) e a CNEN. A instituição foi fundada para abrigar o Reator Argonauta, projetado e construído por técnicos e engenheiros da CNEN em colaboração com as empresas CBV Mecânica e Microlab, sendo um marco pioneiro na engenharia nuclear brasileira (AGUIAR, 2019).

Desde sua fundação, o Instituto tem se destacado na inovação e no desenvolvimento científico. Sua função inicial era a produção de radioisótopos para pesquisas médicas, agrícolas, industriais e biológicas, contribuindo significativamente para o avanço tecnológico na região do Rio de Janeiro e para a criação de novos centros de pesquisa. Atualmente, o IEN dispõe de uma área construída de quase 19.000 m², e suas atividades incluem a transferência de conhecimento e tecnologia para o setor público e privado, beneficiando diretamente a sociedade (SOUZA, 2021).

O IEN conduz 109 projetos de P&D listados no Relatório de Progresso 2015-2017. Suas iniciativas incluem a produção de radiofármacos, técnicas de ensaios não destrutivos, aplicação de traçadores radioativos, proteção radiológica, divulgação científica, recebimento e armazenamento de rejeitos radioativos, além de treinamentos especializados no setor nuclear. A instituição também oferece um Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nuclear e coopera com cursos de graduação e pós-graduação externos, como IME, UFRJ e COPPE (KLAUCK, 2022).

Com o compromisso de fortalecer a segurança das usinas nucleares brasileiras, a CNEN lançou um programa de pesquisa focado em ergonomia e fatores humanos, coordenado pela Divisão de Instrumentação e Confiabilidade Humana do IEN. Essa iniciativa visa adaptar as salas de controle dos reatores às novas tecnologias, sobretudo com a introdução de plantas com controle totalmente informatizado, como a usina de ANGRA III (COELHO, CAMELO e MENEZES, 2020).

3.2 O Laboratório de Interfaces Humano-Sistemas (LABIHS)

O Laboratório de Interfaces Humano-Sistema (LABIHS) é parte da infraestrutura de Engenharia de Sistemas Complexos e foi estabelecido com apoio técnico e financeiro da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), por meio do projeto de cooperação técnica BRA/4/049 no período de 2001-2002 (CARVALHO et al., 2002).

O LABIHS é equipado com uma sala de controle digital, onde são simulados processos e operações de uma planta nuclear tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). Possui uma sala anexa para controle dos cenários de operação, além de sistemas para gravação de eventos e monitoramento de vídeo e áudio das interações entre operadores. Embora o LABIHS não replique todas as condições reais de uma sala de controle, ele oferece um ambiente simulado que permite avaliar o desempenho dos operadores em condições de operação não usuais, aumentando a segurança e a eficiência da planta (CARVALHO et al., 2002).

Esse laboratório é projetado para experimentos de ergonomia e fatores humanos, simulando o ambiente operacional de uma usina nuclear. Na sala de controle, são realizados treinamentos ocasionais por operadores capacitados. A Figura 2 ilustra as telas da sala de controle durante o simulador em funcionamento (OLIVEIRA, 2009).

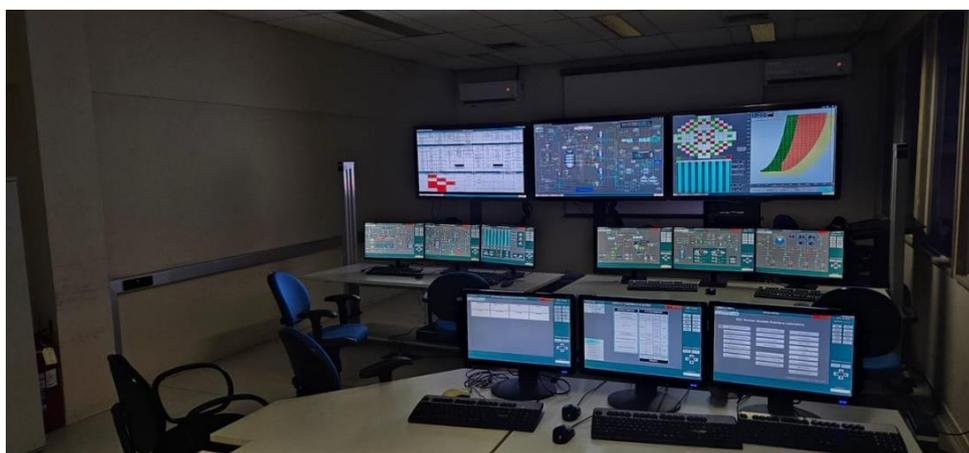


Figura 2: Sala de controle

Fonte: LABIHS (2023).

Com os avanços na instrumentação e tecnologia da informação, atualizar as salas de controle das usinas nucleares tornou-se fundamental para reduzir erros humanos e aumentar a segurança operacional. Um dos objetivos principais do LABIHS é garantir que as atualizações tecnológicas otimizem a operação e a segurança da planta, contribuindo para a redução de falhas operacionais (CARVALHO, 2005).

O LABIHS é amplamente reconhecido por suas contribuições na área de interfaces humano-sistema, facilitando a interação entre pessoas e sistemas tecnológicos. O laboratório utiliza um diagrama funcional, ilustrado na Figura 3, para representar de forma clara e estruturada os componentes e suas interações dentro do sistema em estudo (AUGUSTO, 2004).

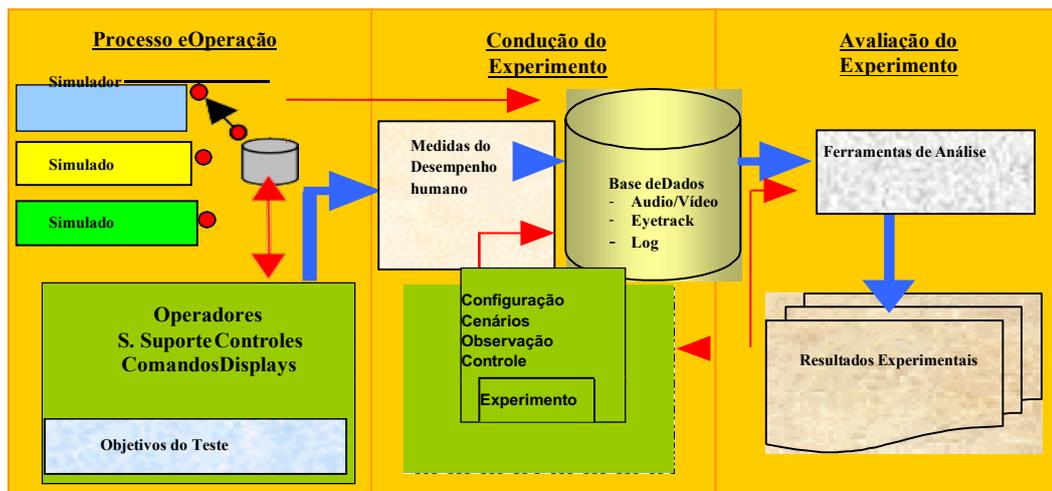


Figura 3: Diagrama Funcional do LABIHS

Fonte: LABIHS (2002).

O laboratório foca no desenvolvimento de sistemas de supervisão e controle aplicáveis a setores como energia nuclear, aeroespacial, transporte e vigilância, sempre com foco na ergonomia e segurança operacional. A Figura 4 mostra as telas operacionais utilizadas pelos operadores no simulador do LABIHS (AUGUSTO, 2004).



Figura 4: Laboratório de Interfaces Humano-Sistemas (LABIHS) do Instituto de Engenharia Nuclear

Fonte: www.ien.gov.br

O LABIHS possui um simulador compacto de um reator PWR, com telas de alarme que reproduzem as telas de monitoramento de uma usina nuclear real. A Figura 5 apresenta uma visão geral das telas de alarmes utilizadas durante as operações simuladas (MARINS, 2018).

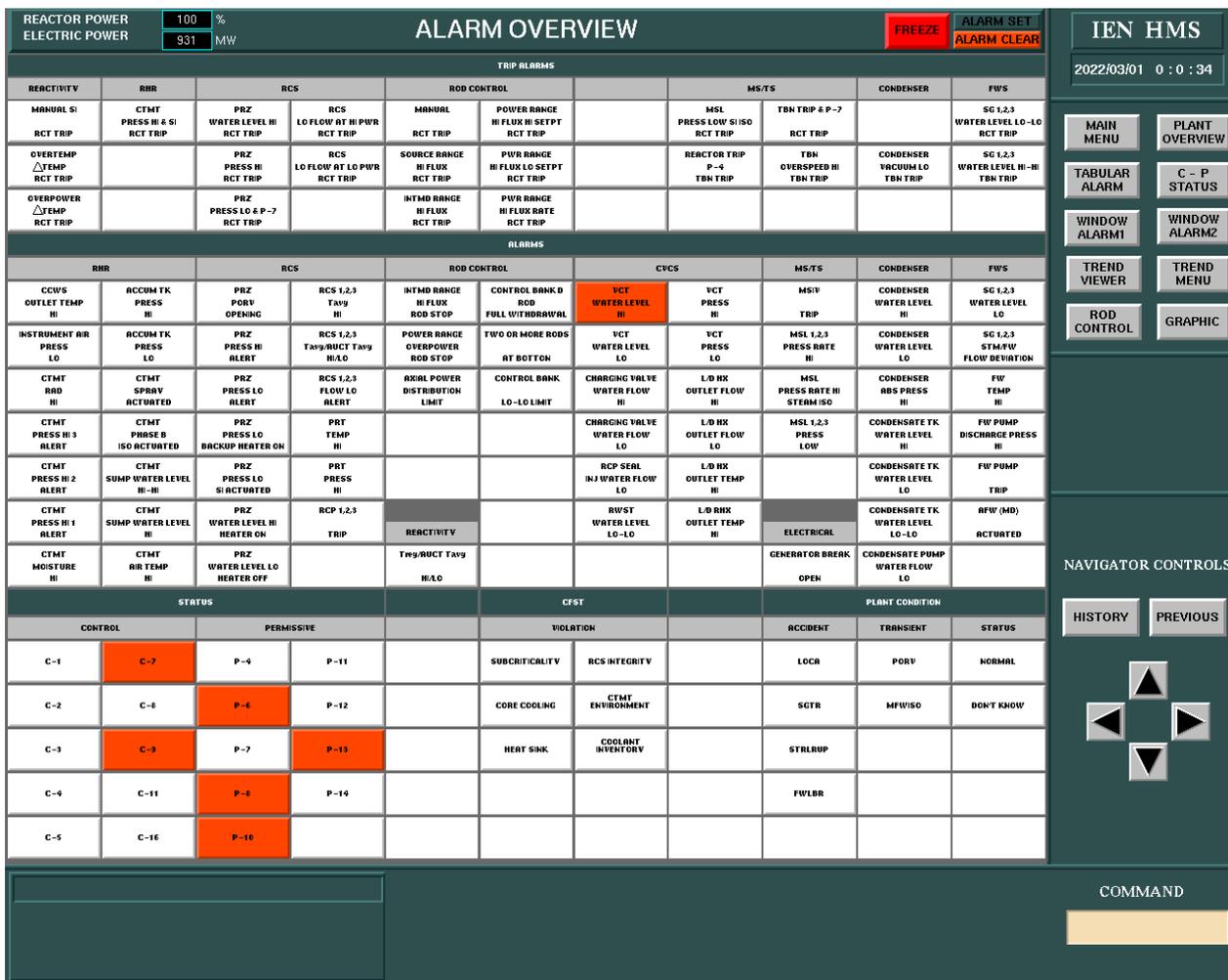


Figura 5: Tela geral de alarmes do LABIHS.

FONTE: Autor,2023

A instalação inclui uma sala de controle onde é simulada a operação do reator, e uma sala de instrução para definir cenários e registrar dados operacionais, possibilitando uma análise detalhada do desempenho dos operadores com ferramentas de análise de fatores humanos. Todo o equipamento necessário para operar um simulador semelhante ao da usina de Angra I está disponível no laboratório (MARINS, 2018).

Além disso, o LABIHS possui sistemas de gravação que documentam atividades e comunicações dos operadores, criando um ambiente ideal para o treinamento e desenvolvimento de habilidades operacionais. Este laboratório proporciona uma experiência próxima à realidade, o que é essencial para a capacitação de operadores em condições de segurança e eficiência (MARINS, 2018).

O LABIHS permite que operadores simulem cenários de emergência, como falhas de equipamentos, transientes de reator e perda de refrigeração, aprimorando suas habilidades de resposta rápida e tomada de decisão. Esse treinamento é fundamental para o desenvolvimento de competências operacionais em usinas nucleares (SANTOS, 2003).

Em suma, o LABIHS do IEN é uma ferramenta avançada para o treinamento de operadores, proporcionando um ambiente seguro e realista que favorece o desenvolvimento de habilidades operacionais e estratégias de resposta a emergências. Essa estrutura contribui diretamente para a eficiência, segurança e confiabilidade na operação de usinas nucleares, fortalecendo o setor nuclear como uma fonte de energia sustentável (SANTOS, 2003).

4 O SISTEMA DESENVOLVIDO

4.1 O módulo de aquisição de dados

O simulador LABIHS utiliza uma arquitetura modular, em que se destaca a memória compartilhada como o repositório central das variáveis essenciais da simulação. Todos os módulos que necessitam acessar informações sobre o processo simulado estabelecem comunicação com essa memória central, garantindo a integridade e a disponibilidade dos dados de maneira centralizada.

Para integrar esses dados aos demais sistemas, o módulo Network Dataserv desempenha uma função essencial ao acessar a memória compartilhada e disponibilizar as variáveis por meio do protocolo TCP/IP, permitindo a comunicação em rede. Importante ressaltar que esse módulo acessa os dados exclusivamente para leitura, garantindo que as informações sejam recuperadas com precisão e não sejam modificadas durante o processo. O programa desenvolvido em LabVIEW conecta-se ao Network Dataserv para ler as variáveis armazenadas, possibilitando o monitoramento

eficiente e a transmissão de dados para os módulos de visualização e controle do simulador. Essa arquitetura robusta permite uma comunicação fluida entre os diferentes módulos, promovendo uma visão unificada das variáveis em tempo real.

4.2 Automatização do procedimento de partida da planta

A verificação das condições iniciais em uma planta nuclear é uma etapa crítica, composta por um conjunto de procedimentos que asseguram a segurança e o funcionamento correto antes de o reator entrar em operação. Tais verificações cobrem múltiplos aspectos, incluindo a configuração física do reator, o abastecimento de combustível, e o estado dos sistemas de resfriamento e de segurança. Para auxiliar nessa etapa, foi desenvolvido um módulo em LabVIEW que automatiza o procedimento de partida, baseando-se nas variáveis monitoradas no simulador e no manual operacional da planta.

4.2.1 Procedimento de partida da planta

O procedimento de partida da planta requer que o operador verifique o status de uma série de sistemas críticos, abaixo estão destacadas as variáveis e seus status de acordo com o manual:

- **Sistema RHR (*Residual Heat Removal* - Remoção de Calor Residual):** Confirmar se todas as válvulas de isolamento estão abertas e pelo menos uma das bombas do sistema está ativa, assegurando a temperatura ideal no *Reactor Coolant System* (RCS) antes da operação.
- **Válvulas de Isolamento:** Verificar se as válvulas HV108, HV208, e HV308, que isolam as linhas de vapor principal, e as válvulas de alívio PV101, PV201 e PV301 estão em condição de fechado, como mostrado na interface a figura 6 .“*REACTOR COOLANT SYSTEM - RCS*”.

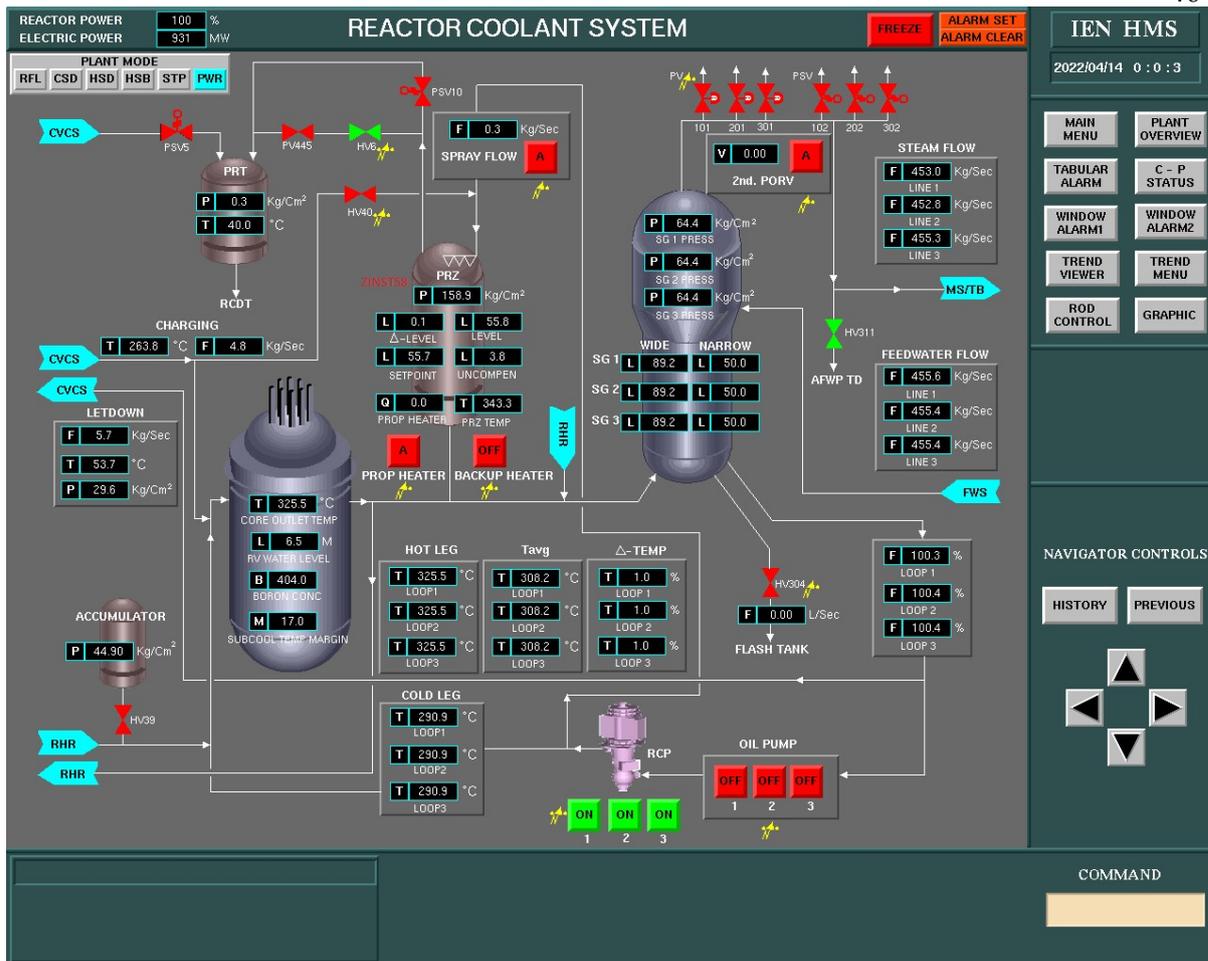


Figura 6: Tela do simulador – REACTOR COOLANT SYSTEM
 FONTE: Autor (2023)

- Se o sistema CVCS (*Chemical and Volume Control System* - Sistema de Controle Químico e de Volume) está configurado como algumas variáveis que são elas: O nível de água do tanque VCT PRESS (maior do que 1,1 Kg/cm²) está normal e um nível de N₂ (a pressurização do gás nitrogênio acima de 60%) está sendo mantido no tanque VCT, o *Makeup Control System* está no modo automático e ajustado para fornecer uma concentração de boro igual ao do sistema RCS, o fluxo de *Letdown* está estabilizado via linha de *letdown* do RHR e os três orifícios das válvulas de isolamento (HV1, HV2 E HV3) estão abertos; os aquecedores do pressurizador estão desligados, as válvulas de controle do spray do pressurizador estão em manual e fechadas, a válvula de alívio do pressurizador (PV 445) e a válvula de bloqueio (HV6) estão fechadas, o sinal de injeção de segurança (SI) está bloqueado (*SAFETY INJECTION BYPASS*), a água do *makeup system* deve ter um nível suficiente, a pressão do acumulador, a concentração de boro e o nível de água estão com o requerido pela especificações técnicas, as válvulas de isolamento estão fechadas e os *breakers* estão desligados.

Essas e outras variáveis críticas são monitoradas em diferentes telas do simulador, permitindo uma avaliação minuciosa de cada parâmetro. Assim que todas as variáveis são verificadas e atendem às especificações, a operação da planta pode ser iniciada.

4.2.2 Etapas para a criação da tela das condições iniciais

Para a criação da tela de condições iniciais foram estabelecidas etapas, abaixo está descritas cada etapa:

ETAPA 1: Identificação do status das variáveis de acordo com o procedimento de operação do simulador.

ETAPA 2: Criação, em bloco de nota, dos Point ID's e overview para leitura e avaliação das variáveis no simulador.

ETAPA 3: Criação do diagrama de bloco, VI's e indicadores em *Labview*.

ETAPA 4: Testes e simulações da tela criada, analisando a comunicação do simulador com a ferramenta, checando e validando cada variável na tela do simulador e seu status na ferramenta de apoio.

ETAPA 5: Validação da ferramenta pelos operadores do primário e do secundário do simulador.

A primeira identificação foi na tela RHR a válvula RHRPUP com status de aberta. Foi identificado que a variável, dentro do simulador tinha o *point ID* de KLAMPOO55.

Ainda de acordo com o procedimento de operações do simulador, as válvulas HV108, HV208, HV308 da tela *FEEDWATER SYSTEM* (SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA) deve permanecer com o status de fechada. As variáveis foram HV108, HV208, HV308 foram identificadas respectivamente como, BH108,

BHV208 e BHV308 no programa do simulador e foram adicionadas na lista de *point ID's* e overview para que o programa pudesse identificar e avaliar o status das variáveis no simulador. A figura 7 abaixo demonstra a tela com as variáveis mencionadas acima.

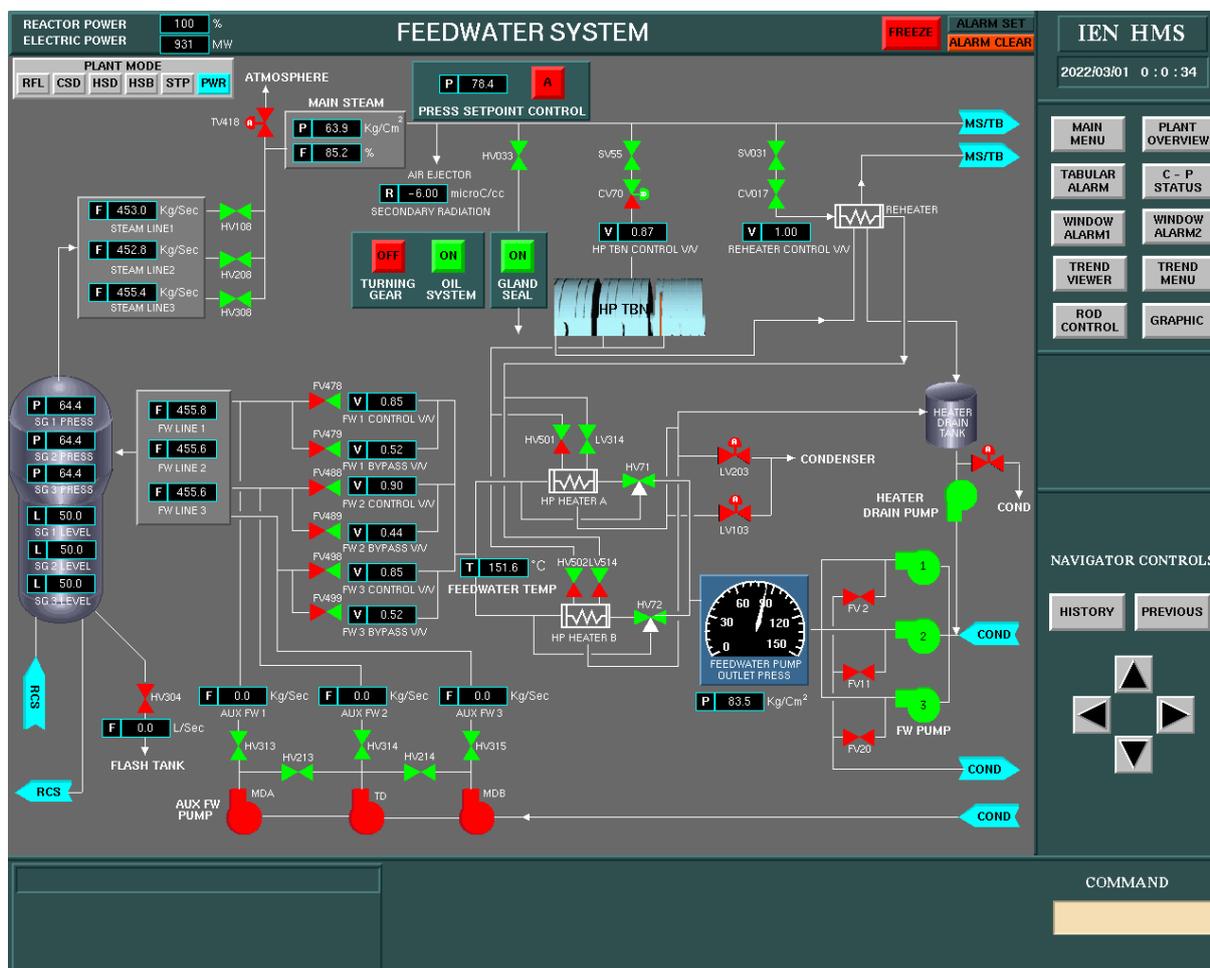


Figura 1: Tela do simulador – FEED WATER SYSTEM
 FONTE: Autor (2023)

Na tela de RCS (*REACTOR COOLANT SYSTEM* - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR) são analisados os status de fechado das válvulas PV101, PV201 e PV 301. A figura 7 apresenta a tela e suas respectivas válvulas.

As válvulas PV101, PV201 e PV301 foram identificadas no simulador como BV101, BV201 e BV301.

Continuando na análise dos operadores, a próxima tela a ser identificada é a *CHEMICAL AND VOLUME CONTROL SYSTEM* (SISTEMA QUÍMICO E DE CONTROLE DE VOLUME) demonstrada na figura 8. Nesta tela o operador avalia se

o nível do VCT Level está com status de normal. De acordo com o manual de operações do simulador, para que seja caracterizado o status de normal, esta variável deverá estar na faixa de 60% à 70%. Além desta variável, os operadores também checam as variáveis “MAKEUP MODE” com status de automático – verde e se as válvulas HV1, HV2 e HV3 encontram-se com status de aberta.

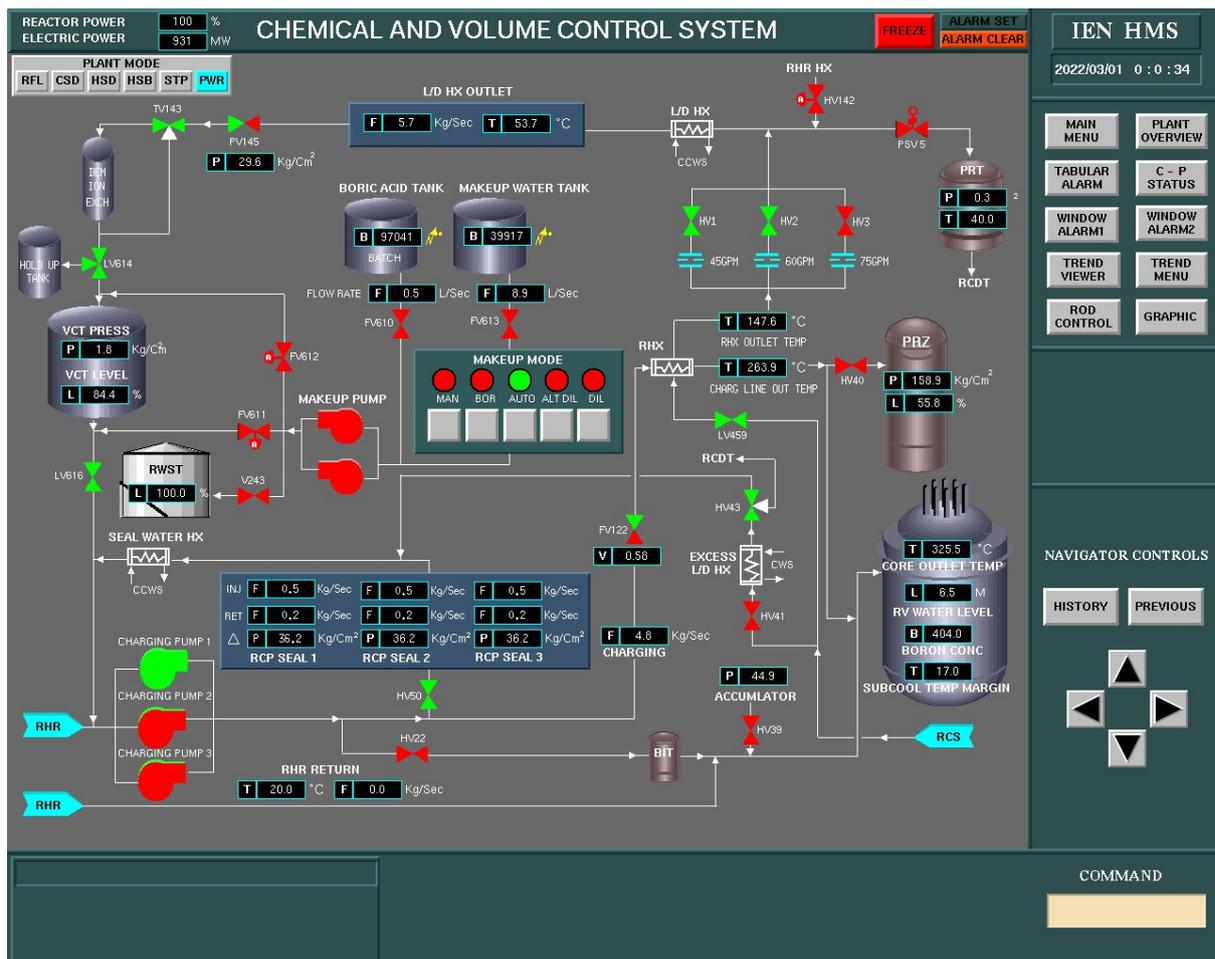


Figura 8: Tela do simulador – CHEMICAL AND VOLUME CONTROL SYSTEM
 FONTE: Autor (2023)

A próxima tela a ser checada nas condições iniciais é a tela da imagem 7 de REACTOR COOLANT SYSTEM (SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR) com as válvulas PV445 e HV66 ambas com status de fechada. Na identificação dessas variáveis no simulador os ID's encontrados foram respectivamente: ZVCT e KALAMPOO86.

Transpassando ainda pelas variáveis das condições iniciais, os operadores avaliam os status das variáveis “Safety Injection” o status da “Actual” (fechado – vermelho) e “Bypass” (aberto – verde) ambas na tela da figura 9 REACTIVITY

CONTROL SYSTEM (SISTEMA DE CONTROLE DE REATIVIDADE).

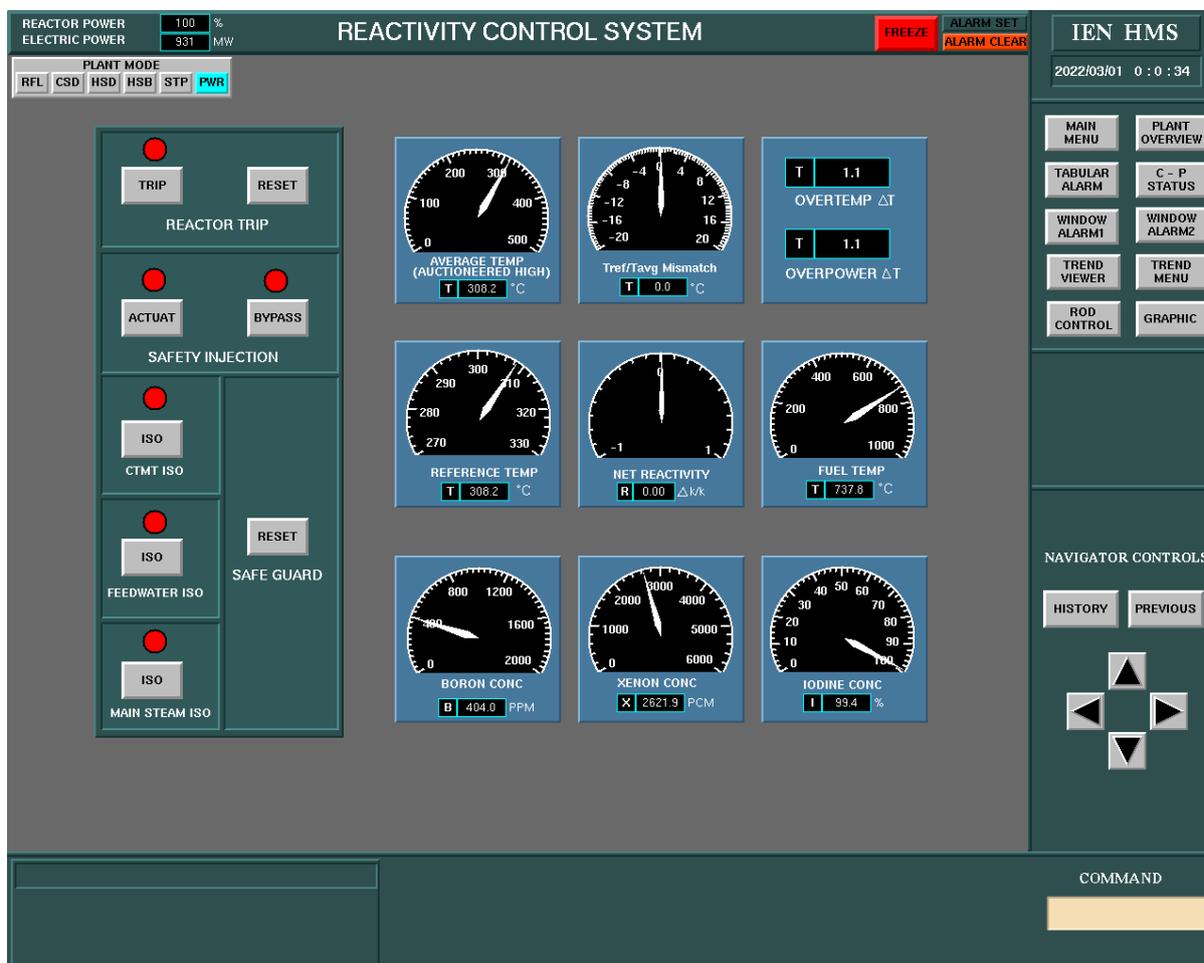


Figura 9: Tela do simulador – REACTIVITY CONTROL SYSTEM

FONTE: Autor (2023)

As próximas telas analisadas pelos operadores são: “*CHEMICAL AND VOLUME CONTROL SYSTEM*” e “*RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM*”. Na primeira tela da figura 8 – *CHEMICAL AND VOLUME CONTROL SYSTEM* o objetivo do operador é checar o nível do Boron Conc, que de acordo com o procedimento de operação do simulador deve estar na faixa de 800 à 810. Avançando para a checagem da segunda tela da figura 10 – *RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM* o operador avalia o status na tela do *CCWS TEMP*, de acordo ainda com o procedimento, o mesmo deve ser encontrado com a condição de serviço – verde. Ambas variáveis identificadas na tela, foram localizadas no simulador como KALAMPO6 E KALAMPO7 respectivamente.

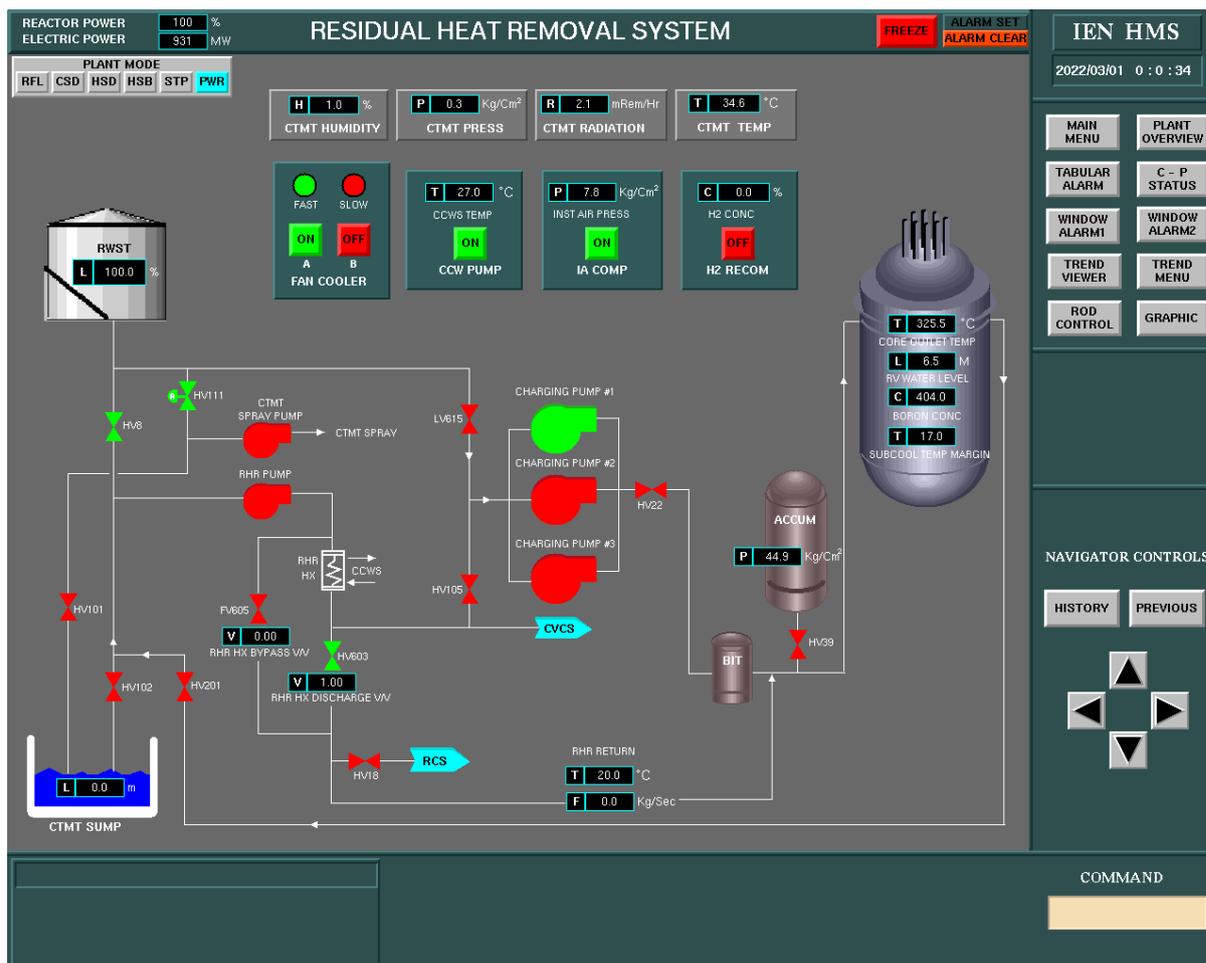


Figura 10: Tela do simulador – RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM
 FONTE: Autor (2023)

A varredura realizada pelos operadores para que possa avaliar as condições iniciais da planta nuclear no simulador, leva em média 10 minutos para que sejam checadas todas as válvulas e status das variáveis na tela.

4.2.3 Módulo de automatização do procedimento de partida da planta

Para cumprir os requisitos da primeira etapa de criação da ferramenta de apoio ao operador se fez necessário a identificação de cada variável, seu status e a comparação da nomenclatura advinda workstation Unix HP-UX. Os dados da simulação ficam armazenados em uma "memória compartilhada". Foi desenvolvido um programa em C/C++ que é executado na workstation (descrito na seção anterior), que acessa essa "memória compartilhada" e disponibiliza as variáveis armazenadas nela para o LabView através de uma comunicação via rede em protocolo TCP-IP.

De acordo com o procedimento mencionado acima e objetivando alcançar a segunda etapa foi fundamental identificar cada válvula/variável (point ID`S) do simulador. Com isso, foram criados dois documentos em bloco de notas (PointIDs e Overview) para que o software em LabView pudesse identificar cada a variável do sistema.

O módulo de automatização do procedimento de partida da planta apresenta uma tela de auxílio ao operador (figura 11), tem como objetivo reduzir esse tempo de checagem para menos de 1 segundo, reduzindo não só o tempo de checagem como também a possibilidade de erros humanos na análise de cada variável. A ferramenta de automatização seguiu critérios: Interface intuitiva, que as informações contidas na ferramenta fossem relevantes e que a indicação de cada estado das variáveis fosse fidedigna.

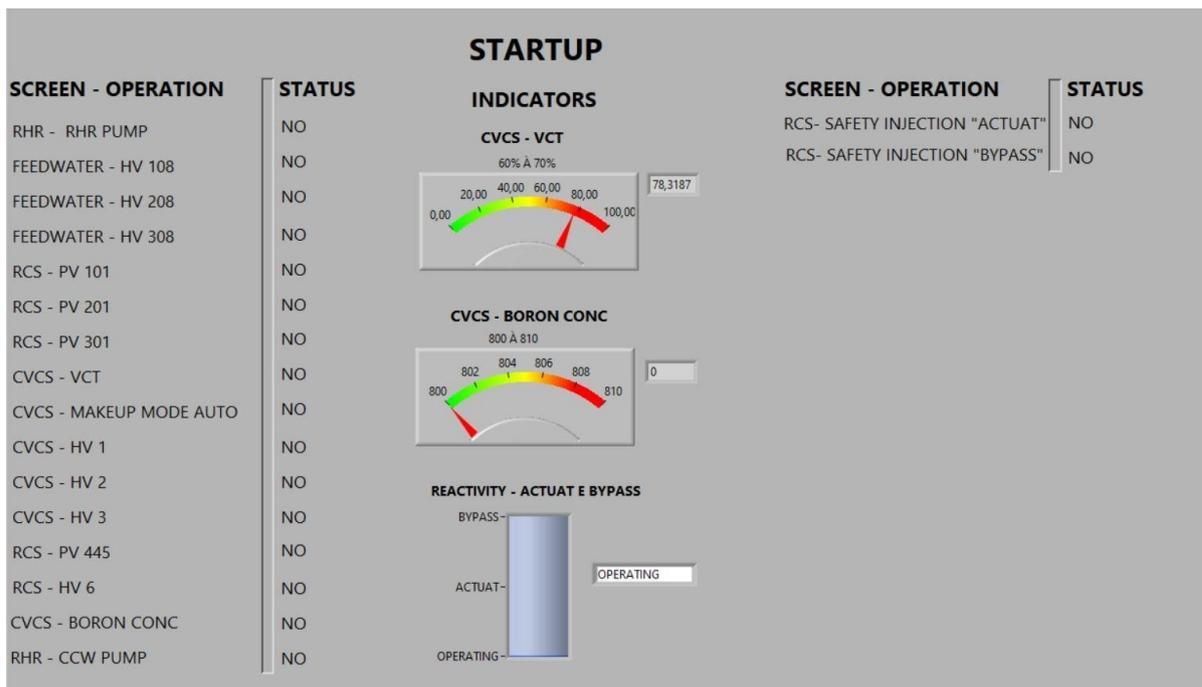


Figura 11: Tela criada em LabView para apoio aos operadores do simulador de uma planta nuclear

FONTE: Autor (2023)

Na tela do módulo de automatização do procedimento de partida da planta, criada de apoio aos operadores (figura 11), foram inseridas as condições iniciais de cada tela observada pelos operadores e as variáveis a serem checadas. Para que o operador possa iniciar a operação da planta, todas as condições iniciais da tela criada deverão estar na condição "YES". Havendo uma única variável com o status de "NO", o operador irá até a tela indicada no programa para avaliar o real estado da válvula/variável na tela do simulador, modificá-la de acordo com o procedimento de operação e posteriormente avançar com o início de operação da planta.

A figura 12 demonstra como os point's ID's foram separados no diagrama de bloco do Labview. Esta deu início a conclusão da terceira etapa da criação da ferramenta de automatização das condições iniciais. Após realizar a organização, foram inseridos os status a serem identificados na ferramenta, utilizando comparação entre o status desejável e a informação advinda do simulador.

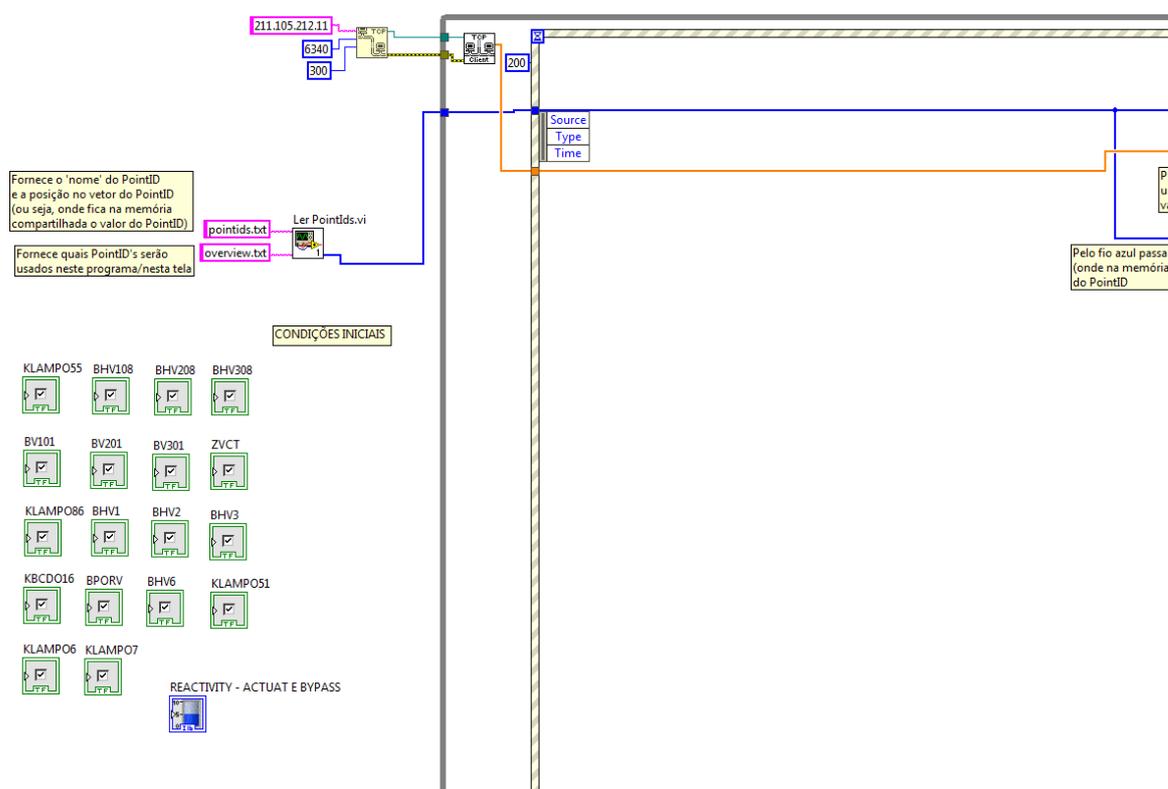


Figura 12: Point ID das condições iniciais

FONTE: Autor (2023)

A quarta etapa foi realizada dentro do laboratório. Os testes da ferramenta foram executados em conjunto com os operadores do primário e do secundário do simulador da planta nuclear.

Na quinta e última etapa, foi criado um formulário de validação da ferramenta para que os operadores pudessem avaliar a facilidade do início da operação, a tomada de decisão após a criação da ferramenta, a leitura e a interpretação das informações na tela, a viabilidade de utilização da ferramenta nos treinamentos ministrados e a possibilidade de inserir a ferramenta junto ao projeto do simulador.

4.3 Automatização do procedimento de identificação de acidentes

A identificação dos acidentes em uma planta nuclear requer a avaliação de diversos fatores distintos dentro de um evento acidental. Para a criação da tela de identificação de acidentes foi avaliada a disponibilidade dos três acidentes no simulador do LABIHS. A identificação das variáveis que caracterizam um possível acidente foi avaliada de acordo com o procedimento de emergência do simulador do laboratório. Vale destacar que a ferramenta criada de apoio aos operadores serve única e exclusivamente para a detecção dos acidentes no LABIHS e que a criação de um programa de auxílio aos operadores de uma planta nuclear real, se faz necessário um estudo sobre todas as variáveis de acordo com o tipo de reator da usina em pesquisa.

4.3.1 *Procedimentos de identificação de acidentes*

O procedimento de emergência do simulador existente dentro do LABIHS é um documento que auxilia o operador a lidar com diferentes situações, como falhas de sistemas, vazamentos ou outros eventos anormais. Esse procedimento garante que os operadores saibam reagir adequadamente e minimizar os riscos.

Para identificar ao possível acidente de de Perda de Energia AC foram observados que o TRIP de reator era acionado, as barras de controle eram inseridas no núcleo e que a chave seccionadora “AUX NET” ficava com status de aberta. No simulador a chave seccionadora foi identificada como KLAMPO233 e o TRIP do reator como KLAMPO9. A figura 13 demonstra a tela Electrical SYSTEM, local onde está situada a alimentação auxiliar e sua respectiva chave seccionadora.

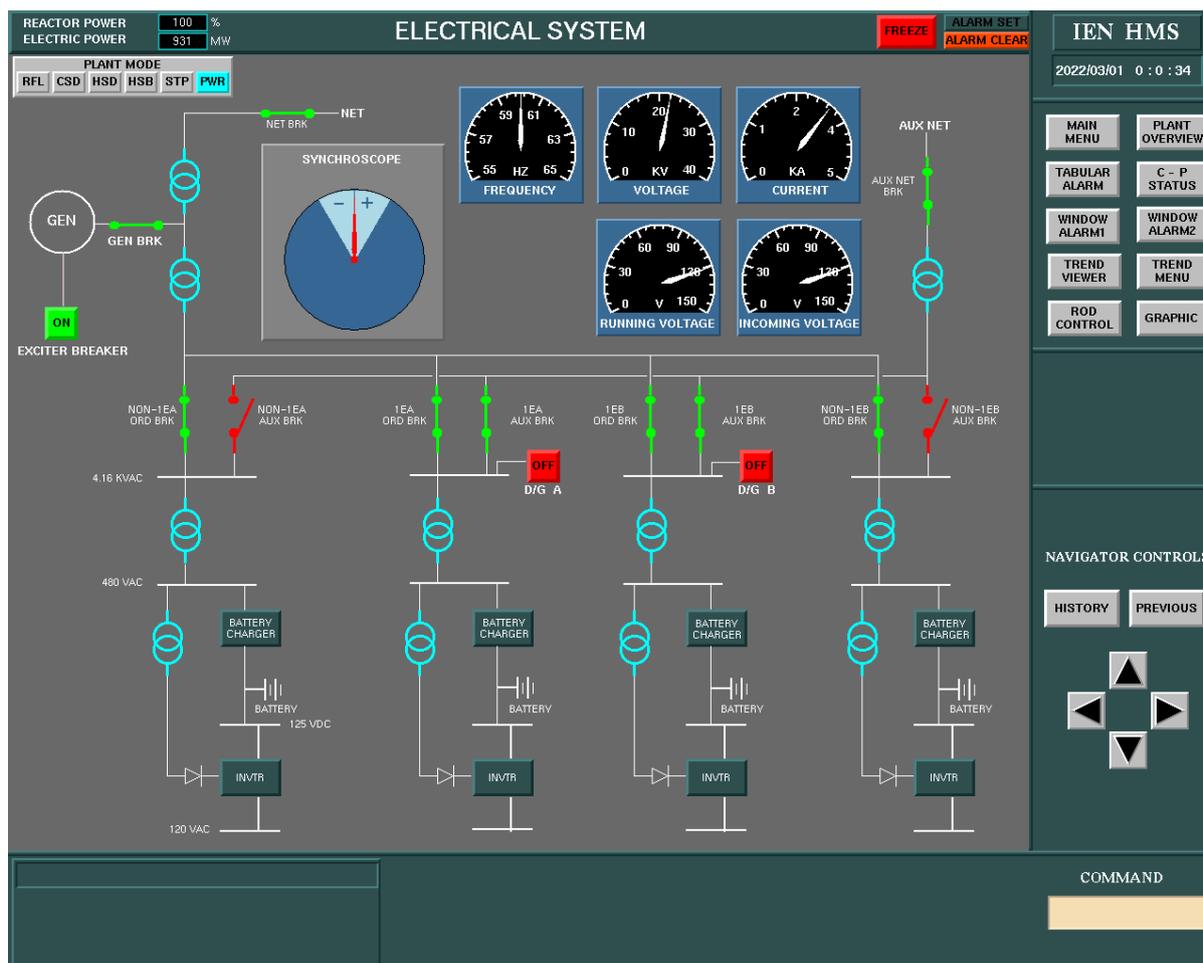


Figura 13: Tela do simulador – ELETRICAL SYSTEM
FONTE: Autor (2023)

Na avaliação do comportamento do simulador para identificar o acidente do tipo LOCA, foi observado que ocorre o TRIP no reator, assim como o acidente de perda de energia AC. Ademais ao TRIP, outras variáveis que demonstravam a suspeita do referido acidente foi total despressurização do gerador de vapor.

Na figura 14, REACTOR COOLANT SYSTEM, pode-se identificar a despressurização através das variáveis SG1, SG2 e SG3 – NARROW – L. De acordo com o manual de emergência do simulador, se ao menos uma dessas variáveis chegar ao valor de 100, isto é um indicador de que o gerador de vapor está despressurizado.

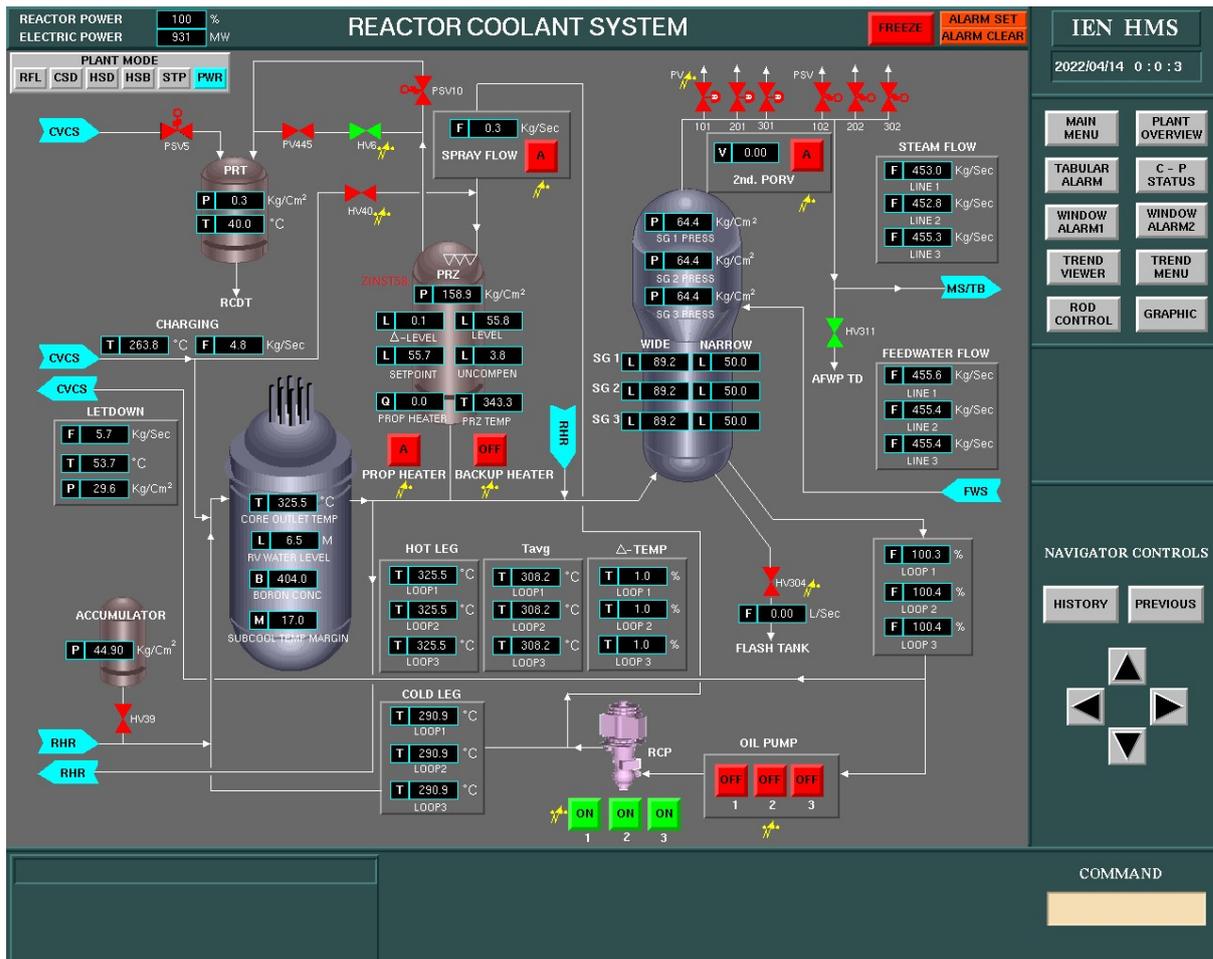


Figura 14: Tela do simulador – REACTOR COOLANT SYSTEM

FONTE: Autor (2023)

O TRIP no reator se faz necessário para identificar os possíveis acidentes PERDA DE ENERGIA AC e LOCA. Entretanto, para a análise do acidente do tipo ATWS o TRIP do reator não ocorre, o que gera uma dificuldade na sua identificação. Segundo o procedimento de emergência do simulador, o acidente do tipo ATWS é de difícil identificação e que até mesmo os operadores mais experientes têm dificuldades para identificá-los. Avaliando os indícios de uma possível ATWS foram identificadas o comportamento de algumas variáveis de acordo com o procedimento de emergência. As variáveis analisadas foram: TRIP do reator – Fechado, a inserção de parte das barras de controle acrescido da variação, com lógica ou, da variável POWER RANGE PERCENT POWER identificada com point ID ZINST1 <25% ou >109% ou da variável PRZ PRESSURE (NARROW RANGE) identificada com point ID ZINST58 <=136,78

ou $\Rightarrow 167,72$ ou da variável TURBINE TRIP identificada com point ID KLAMPO195 com status de Aberta – Verde na tela do simulador.

De acordo com o manual de emergência do simulador, identificado um possível acidente por ATWS, se faz necessário dar TRIP no reator para validar a suspeita. Entretanto, em uma planta nuclear real este tipo de operação é extremamente delicado uma vez que o desligamento do reator causará a interrupção da geração de energia elétrica na usina.

4.3.2 Módulo de automatização da identificação de acidentes

Para a criação do módulo de automatização dos procedimentos de identificação de acidentes foi utilizada a base de *ID's* e *overview* criado para as condições iniciais, acrescido das variáveis necessárias para identificar cada tipo de acidente. A figura 15 mostra, dentro do diagrama de blocos do *LabView*, as variáveis de acordo com o tipo de acidente.

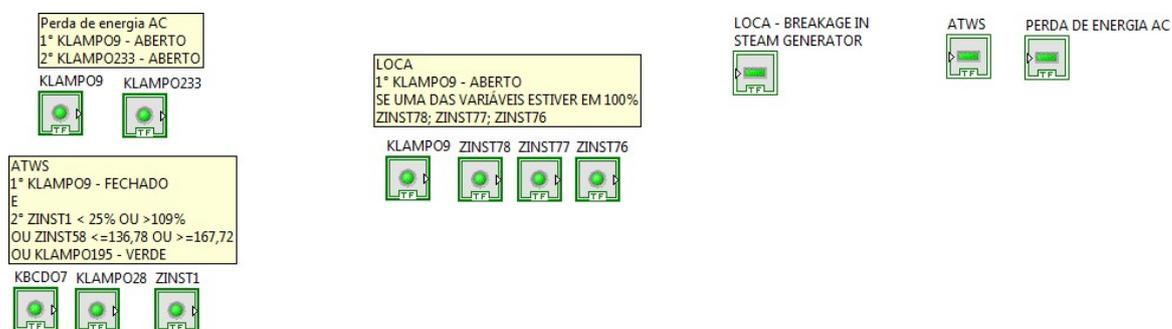


Figura 15: Point ID das condições iniciais

FONTE: Autor (2023)

Assim como na criação das condições iniciais, a tela de auxílio ao operador na identificação de possível acidente foi elaborada seguindo algumas tratativas:

ETAPA 1: Análise do comportamento dos três tipos de acidentes ATWS, LOCAe Perda de Energia AC.

ETAPA 2: Utilização do procedimento de emergência para identificar o tipo de acidente e as medidas a serem adotadas.

ETAPA 3: A identificação das variáveis, de acordo com o procedimento, que validam a suspeita do possível acidente.

ETAPA 4: A localização da variável, adição do point ID e do overview no bloco de notas, a comparação com o status desejado e criação das telas de fácil identificação pelo operador.

ETAPA 5: Teste do tipo de acidente sendo executado no simulador e ratificação da identificação do tipo de acidente na ferramenta de apoio ao operador.

Avaliada as variáveis para a identificação dos possíveis acidentes foi desenvolvida a ferramenta de apoio criando a lógica em diagrama de blocos em Labview. A figura 16 apresenta toda a estrutura lógica por trás da tela criada e a figura 17 ilustra a ferramenta criada de apoio a decisão dos operadores.

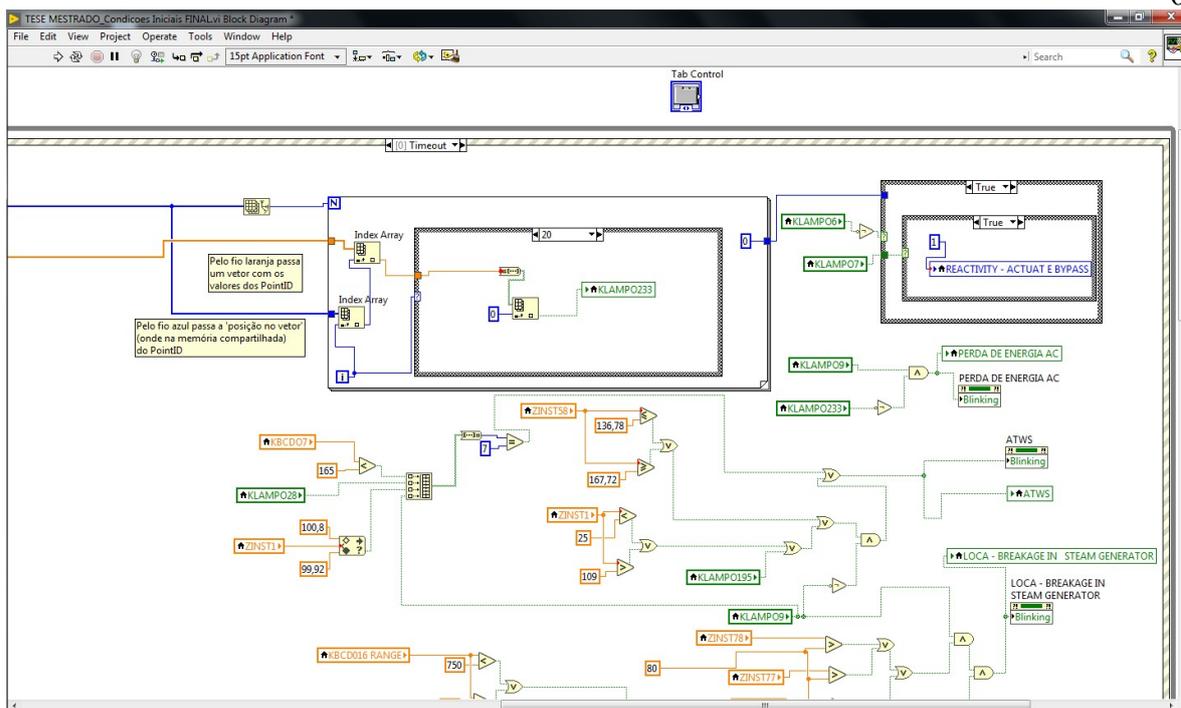


Figura 16: Diagrama de blocos em Labview – ferramenta de apoio aos operadores

FONTE: Autor (2023)

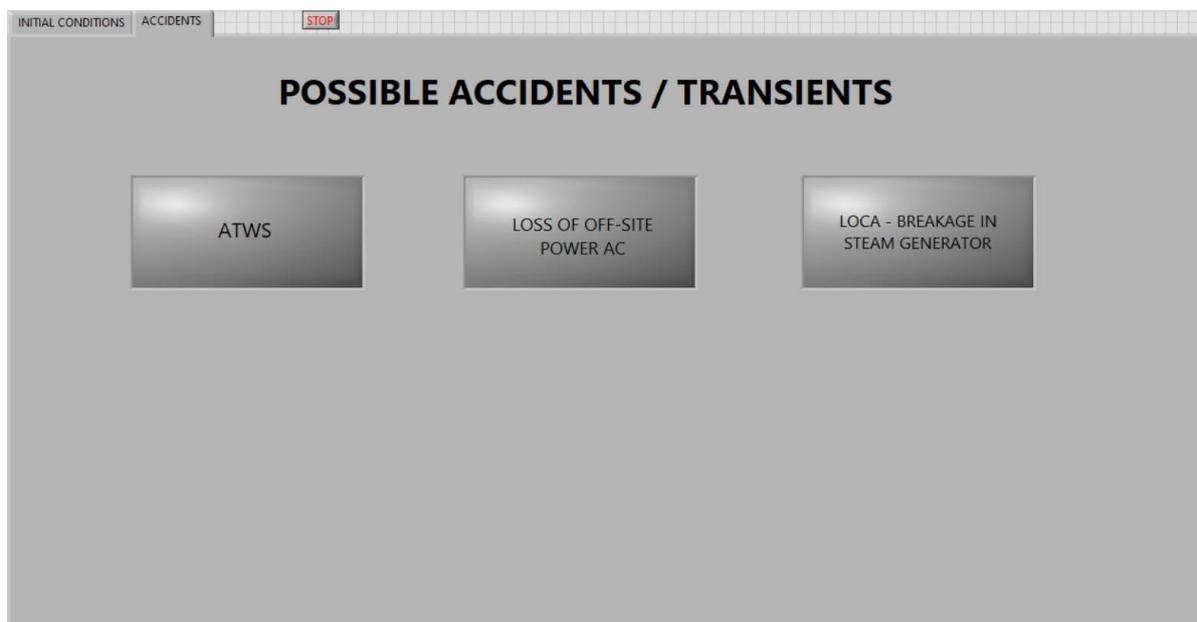


Figura 17: Ferramenta de apoio aos operadores do laboratório

FONTE: Autor (2023)

A tela foi criada considerando parâmetros que garantam uma interface intuitiva, eficiente e segura. Abaixo, seguem os parâmetros utilizados para a criação da tela:

1. Legibilidade: A tela foi criada usando elementos visuais claros e legíveis, avaliado o uso adequado de fontes, tamanhos de texto e contraste de cores para garantir uma fácil leitura. De acordo com os estudos levantados sobre IHM (Interface homem máquina) os critérios abordados acima são importantes considerando as condições de trabalho na planta nuclear, que podem envolver baixa luminosidade ou emergências.

2. Organização e hierarquia: A disposição dos elementos na tela seguiu uma estrutura lógica e hierárquica de acordo com o manual de emergência do simulador. Foram destacados os tipos na mesma sequência do manual, contribuindo com informações prioritárias e de relevância imediata sendo apresentadas de forma clara e destacada. Foram agrupadas as informações relacionadas e utilizadas em espaçamento adequado entre os elementos para evitar a poluição visual.

3. Cores e codificação visual: O uso de cores foi analisada cuidadosamente, levando em consideração a percepção de cores pelos operadores e a importância da distinção rápida de informações críticas. Foi utilizada uma codificação visual consistente para indicar o status do alarme de acordo com o tipo de acidente, garantindo que as cores escolhidas fossem facilmente distinguíveis.

4. Feedback e confirmação: Após a criação da interface foi fornecido o feedback dos operadores. Ambos os operadores, tanto das telas do primário do simulador como também do secundário, indicaram que a ferramenta criada os auxiliava na identificação dos acidentes de acordo com os eventos simulados no laboratório. Acrescentaram ainda que a ferramenta permite que os operadores tenham confiança em suas interações com o sistema e possam tomar medidas corretivas, se necessário.

5. Interface responsiva: A ferramenta criada deve responder de forma rápida e eficiente às interações do operador, pensando nesta condição a tela foi desenvolvida com gaps de alguns segundos na identificação de cada tipo de acidente, garantindo que os comandos sejam executados sem atrasos significativos. Isso é particularmente importante em situações críticas que exigem respostas rápidas.

6. Acesso a informações relevantes: Os operadores devem ter acesso rápido e fácil a informações relevantes, como dados de processo, alarmes, procedimentos operacionais e histórico de eventos. Ainda que os operadores tenham acesso as telas de alarme do simulador, as diversas opções de possíveis acidentes não permitem ao operador a ter certeza de que tipo de evento acidental está se deparando. Com isso a ferramenta é fundamental para otimizar e ratificar o possível acidente com tempo reduzido de resposta.

7. Treinamento e familiarização: Considerando a necessidade de fornecer treinamento adequado aos operadores de usina nuclear no laboratório, o uso da ferramenta de apoio a tomada de decisão é autodidata, não havendo necessidade de treinamento específico a familiarização com a ferramenta.

4.4 Avaliação dos operadores sobre a ferramenta

Para fazer uma avaliação da ferramenta de automatização e da ferramenta de identificação de possíveis acidentes, os operadores do Circuito Primário e do secundário do Simulador do LABIHS foram expostos a algumas perguntas sobre a ferramenta aos operadores do simulador.

Ambos os operadores concordaram que a tela "condições iniciais de operação" agiliza o processo de verificação das condições iniciais de operação, facilitando o início das operações do simulador e auxiliando os operadores na tomada de decisões. Os operadores concordam universalmente que a tela "condições iniciais de operação" é amigável e orienta o usuário para ações viáveis, com as informações apresentadas nesta tela sendo utilizadas para tomar decisões informadas. Eles também endossaram esta tela como um sistema excepcional de apoio à decisão para operadores de simuladores e recomendam sua inclusão em projetos de simuladores.

Os operadores concordaram que a tela de "identificação de possíveis acidentes" minimiza a carga cognitiva ao simplificar a identificação de acidentes, facilitando a tomada de decisão. As informações exibidas nesta tela são fáceis de ler e compreender, permitindo a exploração de ações viáveis. A exibição de "identificação de possíveis acidentes" fornece informações valiosas para os operadores tomarem decisões informadas. A sua integração no projeto do simulador é importante, pois serve como sistema de apoio à decisão para identificar possíveis acidentes durante as simulações. O operador pode utilizar as informações dessa tela para aprimorar suas habilidades de tomada de decisão. As questões respondidas são apresentadas no APÊNDICE 1.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O projeto desenvolvido teve como principal objetivo avaliar o impacto da automatização de procedimentos operacionais na tomada de decisão durante o procedimento de partida de uma planta nuclear e na identificação de três possíveis acidentes. Esperava-se, com isso, reduzir o tempo de execução das tarefas, aumentar a assertividade das operações e mitigar possíveis falhas de percepção humana. A eficácia das interfaces criadas foi avaliada através de questionários aplicados aos operadores, o que evidenciou o sucesso dos objetivos almejados com este trabalho.

Para atingir tais objetivos, foi desenvolvido um sistema que automatizou tarefas essenciais, como:

- Procedimento de partida do reator (checklist das condições iniciais);
- Identificação de três tipos de transientes/acidentes (LOCA, ATWS, Perda de energiaAC).

As ferramentas desenvolvidas alcançaram plenamente seus objetivos, especialmente na redução do tempo de resposta aos eventos. Por exemplo, as verificações das condições iniciais realizadas pelos operadores, que anteriormente levavam em média 10 minutos, passaram a ser executadas em apenas alguns segundos com o auxílio da ferramenta automatizada. Além disso, a interface de identificação de possíveis acidentes reduziu significativamente o tempo necessário para a identificação de um acidente (aproximadamente 5 minutos), o que também diminuiu a carga cognitiva dos operadores durante essas situações críticas.

Contudo, foi observado que a ferramenta não substitui a necessidade de leitura e compreensão do manual de operações pelos operadores. Além disso, a confirmação de falhas no simulador não pode ser atribuída exclusivamente ao sistema automatizado, dado o número de variáveis que uma planta nuclear real pode apresentar.

Por fim, conclui-se que essas ferramentas são promissoras e demonstram uma efetividade considerável quando aplicadas no ambiente do LABIHS. Isso sugere que a automatização de procedimentos operacionais, com os devidos ajustes e adaptações, poderia contribuir para a agilização e maior precisão na operação de usinas nucleares reais. Ademais, considerando que o sistema desenvolvido está integrado ao simulador do LABIHS, este conceito pode ser amplamente utilizado no treinamento em aulas ministradas no laboratório.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para oferecer sugestões para próximos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, pode-se indicar:

- 1 - Desenvolver outras telas em Labview para auxiliar na operação do simulador do LABIHS na identificação de outros possíveis acidentes.
- 2 - Ampliar a identificação de acidentes e analisar a viabilidade de instalação do programa em uma planta nuclear real.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, V. E. *et al.* **Desenvolvimento de Metodologias e Aplicação de Técnicas de Análise e Gerenciamento de Riscos para Melhorias no Controle, Segurança e Licenciamento de Centrais Nucleares e Instalações Radioativas.** *Brazilian Applied Science Review*, v. 5, n. 1, p. 417-428, 2021.

ALVES, L. F. **Laboratório remoto para controle e supervisão de processos industriais em planta didática multitarefa.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, 2018.

AMBROS, P. C. **Avaliação da Metodologia. ATHEANA para sua Utilização na Análise da Confiabilidade Humana em Usinas Nucleares.** Tese de Doutorado – Programa de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE/UFRJ, 2005.

ARAÚJO, E. V. **Gerenciamento de alarmes em plantas industriais: conceitos, normas e estudo de caso em um forno de reaquecimento de blocos.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

ASSIS, L. G. **Proposta de implementação de um sistema de controle e automação em um reator industrial químico.** Monografia – Programa de Pós-graduação em Manutenção Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2021.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de Química-: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente.** 7° ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

AUGUSTO, S. C. *et al.* **A Criação de telas para o Simulador do Labihs.** Relatório Técnico RT-IEN-05/2004. Instituto de Engenharia, 2004.

AVELLAR, R. K. **Um estudo comparativo entre normas e diretrizes de projetos de salas de controle digitais para usinas nucleares PWR.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

AZZARI, B. S. O. **A importância do relações públicas na construção e manutenção da imagem e reputação de organizações governamentais: um estudo de caso do estado soviético após a tragédia de Chernobyl.** Trabalho de

Conclusão de Curso - Curso de Relações Públicas com Ênfase em Comunicação Organizacional, Universidade de Caxias do Sul, 2020.

BALTAZAR, A. R. D. G. S. **Erro humano e erro organizacional nas atividades de manutenção das aeronaves na perspectiva da Grounded Theory: o caso nacional.** Tese de Doutorado - Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade de Lisboa (Portugal), 2020.

BANDEIRA, F. P. M. **Energia Nuclear-Alguns Aspectos.** Artigo - Câmara dos Deputados, Brasília – DF, Maio, 2005.

BASTIAN, H. P. **Automação na construção civil: o avanço das impressoras 3D.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2021.

BATISTA, C. C. **Monitoramento de produção de embalagens utilizando LabVIEW™.** Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

BORGES, E. M. *et al.* **Análise do acidente de perda de refrigerante primário devido a quebra da linha de surto do pressurizador da usina nuclear Angra 2.** Revista Internacional de Ciências, v. 10, n. 1, p. 3-21, 2020.

BRAGA, C. C. *et al.* **Modelagem do acidente de TMI-2** em: IX Encontro de Física de Reatores e Termohidráulica, IX ENFIR - Caxambu, MG, 1993.

BURATTO, W. G. **Construção e supervisão dos principais parâmetros de um gaseificador de leito fixo e fluxo contracorrente de resíduo de biomassa da Região Serrana Catarinense.** Dissertação de Mestrado – Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2020.

CAIXETA, L. C.; DA CUNHA FARIA, V. H.; RAMOS, G. E. O. **Implementação de uma metodologia laboratorial para reprodução de uma turbina eólica com o LabVIEW.** Research, Society and Development, v. 11, n. 1, p. e21411124812-e21411124812, 2022.

CARVALHO, B. R.; ASSUMPÇÃO, A. C. V. **O papel das organizações nos grandes acidentes da indústria química.** Monografia - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

CARVALHO, E. F. *et al.* **Metodologia para avaliação e salas de controle avançadas de reatores nucleares: estudo de caso utilizando o laboratório de interfaces homem sistema**, Relatório Técnico RT-IEN-18/2006. Instituto de Engenharia, 2006.

CARVALHO, E. R. *et al.* **Estratégia para a redução da emissão de dióxido de carbono gerada pelo consumo de energia em segmentos industriais brasileiros**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Amazonas, 2016.

COELHO, D. P.; CAMELO, J.; MENEZES, I. **Educação para o desenvolvimento na era global: possibilidades de uma leitura pós-colonial**. Educação, Sociedade & Culturas, n. 53, p. 97-119, 2018.

CONCEIÇÃO, G. W. *et al.* **Sustentabilidade e o transporte urbano de passageiros na cidade do Rio de Janeiro: um modelo que promova utilização de fontes energéticas alternativas com impacto no desempenho das empresas do segmento. Projeto Aplicativo 2022** - Programa de Pós-graduação em Gestão de Negócios, Fundação Dom Cabral, 2022.

CONTENTE, J. A. V. S. **Resolução de problemas em contexto colaborativo e não formal: estudo de caso de tecnologia espacial no projeto CanSat Açores**. Tese de Doutorado – Didática das Ciências, Universidade de Lisboa 2022.

CORDOVIL, E. M. *et al.* **Aumento da confiabilidade no sistema de refrigeração nas salas de controle de turbinas hidráulicas**. CONEM-2018, Salvador-BA, 2018.

CORRÊA, M. M. **Impacto da reconstituição de amostras de laboratório na avaliação do potencial de liquefação em depósitos de rejeito**. Dissertação de Mestrado –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CÔRTEZ, P. L. **Administração de sistemas de informação**. Saraiva Educação SA, 2013.

COSTA, I. C. A.G. da *et al.* **Avaliação da confiabilidade de sistemas de distribuição considerando a interferência do vento, esquemas de proteção e variações de tensão**. Tese doutorado - Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

Carvalho, P. V. R.; Mol, A. C. A.; COSTA, R. G. da. **Aid system in the attention direction for accidents diagnosis at nuclear power plants based on artificial intelligence**. CIEOM – Conferência Conjunta Internacional sobre Engenharia Industrial e Gestão de Operações, São Carlos - SP, 2010.

DA SILVA, R. P.; ENGELMANN, W. **A quarta revolução industrial: (Des)emprego?**, Editora Appris, 1º Edição, 2020.

DA VEIGA, J. E. **Energia Nuclear: do anátema ao diálogo**. Senac, 2018.

DAMILANO, C. T. **O uso da inteligência artificial pelo empregador na seleção e no controle das atividades executadas pelo empregado**. Editora Thoth, 2022.

DARÓS, G. F. **Projeto elétrico para substituição de transformadores convencionais por transformadores de alta frequência aplicados em precipitadores eletrostáticos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Programa de Engenharia Elétrica de Tubarão, Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018.

DAVI, S. M. A. **Análise da evolução dos processos de recrutamento e seleção: utilização de ferramenta de automação nos processos seletivos com foco na gestão por competência**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Produção, Universidade Federal Rural do Semi - Árido, Rio Grande do Norte, 2021.

MÓI, A. C. A. **Um Sistema de Identificação de Transientes com Inclusão de Ruídos e Indicação de Eventos Desconhecidos**. Tese de Doutorado – PEN, Programa de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

AGUIAR, A. E. *et al.* **Análise do Coeficiente Global de Temperatura de Reatividade do Reator Argonauta**. VI SENCIR - Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações, Belo Horizonte, 2022.

CARVALHO, D. W. **O Desastre em Mariana 2015: o que temos a apreender com os desastres antropogênicos**. Laudo Técnico, Belo Horizonte, 2016.

FREITAS, C. M.; PORTO, M. F. S.; MACHADO, J. M. Huet (Ed.). **Acidentes industriais ampliados: desafios e perspectivas para o controle e a prevenção**. SciELO-Editora FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 2000.

FREITAS, K. R. H. C. **Instituto Médico Legal de São paulo: saúde e segurança do trabalhador de necropsia**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Trabalho, Saúde e Ambiente, Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho, São Paulo, 2019.

JESUS, A. F.; SANTOS, J. P. M.; WENDLAND, E. **Geoprocessamento de Bacia Hidrográfica e a Solução Automatizada do Fluxo em Aquífero Freático**. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 6, n. 1, Editora SBMAC, São Carlos-SP, 2018.

MESSIAS, M. M. *et al.* **O uso de ferramentas Google para a produção automatizada de relatórios da aprendizagem em turmas de séries iniciais para as escolas públicas do município de Fortaleza-CE**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 17, p. e122111739151-e122111739151, Fortaleza – CE, 2022.

OLIVEIRA, L. F. S.; BARROSO, A. C. O. **A summary of the Three Mile Island accident: from zero hour to lessons for the future**. *Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos*, Minas Gerais, 2019.

SIQUEIRA, J. P. Lara; BOAVENTURA, J. M. G. **Estratégia para corporações e empresas: teorias atuais e aplicações**. Editora Cengage Learning, 2022.

DOMINGUES, L. S. **Estudo da eficiência de inibidores e da resistência à corrosão localizada da superliga Incoloy 800, utilizada no circuito secundário do gerador de vapor do tipo PWR, em meio simulador de frestas**. 2019. Dissertação de Mestrado - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP – Escola Politécnica, São Paulo, 2019.

REIS, L. B.; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. Editora Manole, 2º E., Barueri, SP, 2006.

NICOLAU, A S. **Computação Quântica E Inteligência De Enxames Aplicados Na Identificação De Acidentes De Uma Usina Nuclear PWR**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro 2010.

FAGUNDES, G. M. **Fogos gerais: transformações tecnopolíticas na conservação do cerrado (Jalapão, TO)**. Tese Doutorado - Departamento de Antropologia, Universidade de Brasília, 2019.

FALLER, R.R. **Engenharia e Design: Contribuição ao estudo da seleção de materiais no projeto de produto com foco nas características intangíveis.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

FARINA, A. S. **Controle de microrrede baseado em frequência.** Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

FERNANDES, D. S. **A mediatização da Central Nuclear de Almaraz.** Dissertação de Mestrado – Universidade Beira Interior, Porto, Portugal, 2021.

FERNANDES, M. M. **Controle de processos como um serviço: uma abordagem para a indústria 4.0.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2020.

FERNANDES, M. A. M. **Controle de condição em motores elétricos de indução.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

FONSECA JÚNIOR, M. *et al.* **Pré-despacho de carga em usinas termoelétricas considerando a gestão da manutenção via lógica fuzzy.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2018.

FONSECA, R. A. **A human reliability analysis of the Three Mile power plant accident considering the THERP and ATHEANA methodologies; Uma análise da confiabilidade humana do acidente na Usina de Three Mile Island II considerando as metodologias Therp e Atheana.** INAC 2005 – Conferência Internacional sobre o Atlântico Nuclear, Santos - SP, 2005.

FREITAS NETO, L. G. **Concepção de núcleo de reator de sal fundido de tório para propulsão naval.** Tese de Doutorado – IPEN -Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

GAVRONSKI, J. D. **Carvão mineral e as energias renováveis no Brasil.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

GODOY, B. *et al.* **Método para aceleração de expertise em decisões operacionais complexas: um estudo sobre tomada de decisão de pilotos na aviação comercial.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Administração, PUC, Rio Grande do Sul, 2022.

GOULART, R. S. *et al.* **Proposta de um sistema de manutenção 4.0 para máquinas e equipamentos agroindustriais florestais.** Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

GRECCO, T. H. C.; BERTEQUINI, A. B. T. **Estudo Do Controle Tecnológico Laboratorial E De Campo Do Concreto Betuminoso Usinado A Quente.** Especificação Técnica ET-DE-P00/027 - Controle Tecnológico Do CBUQ, Centro Universitário Unitoledo, Araçatuba, SP, 2018.

GUERMANDI, V. I. **Inteligência de negócio aplicado à análise de processos da indústria 4.0 através do software Power BI.** Monografia – Instituto de Ciências e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2022.
GUIMARÃES, L. A. *et al.* **Metodologia de gerenciamento da degradação por envelhecimento nas usinas nucleares de Angra.** Dissertação de Mestrado - IEN – Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2017.

GUSSAMULO, N. S. K. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Muaguide utilizando o modelo SWAT-Soil and Water Assessment Tool.** Monografia – Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique, 2022.

JORGE, G. O. A. **Desafios e limitações da implementação do BIM em projetos de edificações.** Tese de Doutorado - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2022.

JOYCE, J. P.; LAPINSKY, G. W. **Uma história e visão geral do conceito do sistema de exibição de parâmetros de segurança.** IEEE - Transições em Ciência Nuclear, v. 30, n. 1, pág. 744-749, 1983.

JUNQUEIRA, C. N.; DOMINGUES, W. S.; BONON NETTO, J. S. M. **Automação de usina hidrelétrica. Sistema digital de supervisão e controle; Automação da Usina de Serra da Mesa, GO. Sistema digital de supervisão e controle.** Conferência 2 SEPOCH – Simpósio de Especialistas em Operações Hidrelétricas, Goiás, 2000.

KLAUCK, R. *et al.* **Mapeamento de depósitos de patentes referentes à atividade terapêutica de compostos químicos e de estudos clínicos em andamento no**

Brasil. Dissertação de Mestrado – Programa de Mestrado Profissional em Farmacologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2022.

KODOSKY, Jeffrey. *LabVIEW Proceedings of the ACM on Programming Languages*. v. 4, n. HOPL, Article N 78, Pp. 1-54, New York, 2020.

LAMB, F. **Automação industrial na prática-série Tekne**. AMGH Editora, Porto Alegre, 2015.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Sistemas de informação gerenciais: administrando a empresa digital**. Bookman Editora - 17ª Edição, 2022.

LAZZARI, B. S. O. **A importância do relações públicas na construção e manutenção da imagem e reputação de organizações governamentais: um estudo de caso do estado soviético após a tragédia de Chernobyl**. Monografia – Programa de Relações Públicas com Ênfase em Comunicação Organizacional, Universidade Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2020.

LEWERENZ, D. G. **Nuclear Power Plant Operations: A Guidebook**. American Nuclear Society, 2000.

LEATHERBARROW, A.; BOTTMANN, D. **Chernobyl**. L&PM Editores, 2019.

MAGALHÃES, R. N.; RODRIGUES, K. D.; OLIVEIRA, J. C. **Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado–UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2004.

MARINS, E. R. **Realidade virtual aplicada à proteção física de instalações nucleares**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MARQUES, A. P. **Trajectórias de qualificação profissional: processos de dualização. Um estudo de caso da indústria têxtil**. Núcleo de Estudos em Sociologia do Instituto de Ciências Sociais da Universidade do Minho, Edições Afrontamento, Santa Maria da Feira, 2005.

MARTINS, J. D. D. **Mudanças climáticas em face do atual estado de coisa-Inconstitucional e Inconvencional-no contexto do estado brasileiro**. Editora Juriá, Curitiba, 2019

MARTINS, M. P. S. **Estudo de fatores humanos e observação dos seus aspectos básicos, focados em operadores do reator de pesquisa IEA-R1, objetivando a prevenção de acidentes ocasionados por falhas humanas.** Dissertação de Mestrado - IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

MATOS, Gonçalo Ribeiro de. **Machine learning aplicado à gestão de activos físicos industriais.** Tese de Doutorado - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2021.

MATOS, Mateus de; OLENIK, Symon. **Implementação de redes neurais Perceptron e Adaline em ambiente LabVIEW™.** Monografia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MORAIS, F. **A Ilha: um repórter brasileiro no país de Fidel Castro.** Editora Companhia das Letras, 1º ed., 2019.

MOREIRA, H. L.; BASTOS, A. M.; SANTOS, R. B. **Análise comparativa da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos e eólicos para microgeração de energia elétrica.** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, Gramado, Rio Grande do Sul. 2018.

MOREIRA, L. S. **Classificação de acidentes de uma usina nuclear do tipo PWR usando redes neurais.** Monografia - Curso de Engenharia nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

MUACHIA, A. *et al.* **Uso das equações generalizadas de pitzer para Avaliação termodinâmica de gases.** SAPIENTIAE: Revista de Ciências Sociais, Humanas e Engenharias, v. 6, n. 1, Pp. 35-43, 2020.

MÜLLER, M. L. *et al.* **Sistema Supervisório e Aquisição de Dados de uma Usina de Geração Fotovoltaica.** Monografia – Centro Tecnológico de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

NASCIMENTO, A. L. N.; BASSO, S. **Câmara Climática: desenvolvimento de uma câmara automatizada para controle de temperatura e umidade.** Monografia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2019.

NASCIMENTO, C. S. **Modelo com qualidades psicométricas para avaliação da cultura de segurança em instalações nucleares**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Software Overview**. Austin, TX: National Instruments, 2022. Disponível em: www.ni.com. Acesso em: 30 out. 2024.

NETO, M. R. B.; DE CARVALHO, P. C. M. **Geração de energia elétrica: fundamentos**. Saraiva Educação SA, 2012.

NORONHA, T. P. **Geração automática de sistemas compatíveis com o Arrowhea Framework utilizando IOPT-Tools**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018.

NUNES, R. A. **Qualidade de vida no trabalho: revisão de alguns modelos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Administração do Centro de Ciências Sociais e Aplicadas, Centro Universitário Nove de Julho, São Paulo, 2004.

O'HARA, K.; SELLEN, **A comparison of reading paper and on-line documents**. In: Anais da Conferência ACM SIGCHI sobre Fatores humanos em sistemas de computação, Atlanta, 1997.

OLIVEIRA, M. V. de *et al.* **Requisitos básicos para implementação de um sistema de procedimentos computadorizados no Laboratório de Interfaces Homem-Sistema-LABIHS – RT – IEN – 04/2008**, Rio de Janeiro, 2008.

PARREIRA, C. C. A.; NETO, J. C. B.; CORRÊA, B. H. B. C. **Modelagem e simulação dinâmica de um reator nuclear por fissão: uma revisão**. Article - *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Pp. 1-15, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2021.

PEREIRA, A. F. de A. N.; QUELHAS, O. L. G. **Os acidentes industriais e suas conseqüências**. In: *4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management*. Donostia – San Sebastián, 2010.

PEREIRA, G. S.; MOTTA, M. G. D. **Indústria 4.0 e economia circular: uma transformação digital e sustentável na engenharia, com aplicação no setor de alimentos e bebidas**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

PERINI, A. V. **As ferramentas e tecnologias da indústria 4.0 e sua potencial aplicabilidade na manutenção**. Trabalho de Conclusão de Curso – Programa de

Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2018.

PINHO, B. E. **Uma proposta inicial de um plano para o período de transição do desligamento permanente da usina nuclear Angra 1 até a condição de safe storage.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PIZZINGA, V. H. Notas sobre Chernobyl: **Análise de alguns aspectos relacionados às situações de trabalho da usina nuclear de Pripyat.** Cadernos de Psicologia Social do Trabalho, In: Centro de Psicologia Aplicada ao Trabalho do Departamento de Psicologia Social e do Trabalho do Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo. Artigo. 23, n. 2, Pp. 143-156, São Paulo, 2020.

QUEIROZ, L. M. O. **Análise orçamentária comparativa entre estrutura metálica e estrutura de concreto pré-moldado para um caso específico de galpão industrial em João Pessoa-PB.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2020.

QUINTANS, A. A. O. *et al.* **Usina Termelétrica Borborema Energética.** Relatório de Estágio Integrado - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2019.

REIS, A. D. C. **Análise da atividade cognitiva do operador de sala de controle da produção de controle da produção de petróleo on-shore: uma abordagem da ergonomia para a gestão das restrições do sistema sociotécnico.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2015.

RIBEIRO, J. M. **O conceito da indústria 4.0 na confecção: análise e implementação.** Tese de Doutorado – Programa de Pós – Graduação da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga, 2017.

RIBEIRO, L. A. A. **A técnica de conjunto aplicada aos prognósticos de dispersão atmosférica em condições de acidente na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (Angra Dos Reis/RJ).** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

RIBEIRO, M. T. S. **Vozes Submersas: políticas públicas, desenvolvimento e resistência lá na Morada.** Editora Dialética, 2021.

RICARDO, G. H. P. *et al.* **Uso da biomassa da cana-de açúcar para geração de energia elétrica.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ROCHA, B. M. V. **Rejeitos radioativos: um estudo de caso para Angra 2.** Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

RODRIGUES, N. A. **Avaliação experimental de diferentes modos de operação de um biorreator de leito empacotado multicamadas para produção de celulases por cultivo em estado sólido.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PPGEQ, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2021.

ROSAR, M. F. F. **Administração Escolar: um problema educativo ou empresarial?** Autores Associados, Editora Cortez, 4^o Edição, 2023.

SMITH, John. **A automação na indústria moderna.** Disponível em: <http://www.exemplo.com/documento.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.

SANTOS, C. P. **A gestão do processo de inovação nas concessionárias brasileiras de energia elétrica.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, C. S. **Metodologia de especificação de sistemas de instrumentação e controle para usinas nucleares móveis.** Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SANTOS, E. P. **Mercado no Brasil para uso de energias renováveis e ações de eficiência energética.** Dissertação de Mestrado – Do instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SANTOS, E. J. R. **Previsão de precipitação usando máquinas de vetores de suporte visando sua implementação em sistemas embarcados.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Brasília – UNB, Brasília, 2019.

SANTOS, I. J. A. L. *et al.* **A ergonomia no licenciamento e na avaliação de salas de controle de reatores nucleares.** Tese de Doutorado - Programas de Pós-

Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

SANTOS, I. J. A. L. **Avaliação do simulador compacto de um reator nuclear PER de três loops do Laboratório de Interfacer Homem Sistema, o LABIHS**. Relatório - Repositório Institucional do IEN – Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2003.

SANTOS, M. M. D.; LEME, M. O.; JUNIOR, S. L. S. **Indústria 4.0: fundamentos, perspectivas e aplicações**. Saraiva Educação AS Editora: Érica, São Paulo, 2018.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Editora: Edipro, 1º edição, 2019.

SEGANTINE, R. N. *et al.* **A influência das micro-ondas no abatimento de gases de efeito estufa**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2020.

SEVALHO, M. C. V. **O plano de emergência da central nuclear de Angra dos Reis/RJ: avaliação sobre os riscos para o turismo no distrito de Mambucaba**. Dissertação de Mestrado Acadêmico em Turismo - Programa de Pós-graduação em Turismo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

ILVA, J.; ENGELMANN, M. **Desafios da automação industrial**. Revista Brasileira de Engenharia, v. 15, n. 4, p. 234-250, 2020.

SILVA, J. P. S. **Modelo de sistema de automação aplicado à operação de redes de abastecimento hídrico**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da UFRN, Natal, 2019.

SILVA, P. C. **Mudanças climáticas e guerra na Ucrânia: uma possível retomada da energia nuclear**. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, W. V. M. *et al.* **Análise de aspectos de natureza da ciência na minissérie Chernobyl e considerações sobre o uso da minissérie no ensino de ciências**. Revista Brasileira de História da Ciência, v. 15, n. 2, pág. 541-569, 2022.

SILVA, W. V. M. *et al.* **Análise de aspectos de natureza da ciência na minissérie Chernobyl e considerações sobre o uso da minissérie no ensino de ciências**. Artigo - Revista Brasileira de História da Ciência, v. 15, n. 2, Pp. 541-569, 2022.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. Editora Blucher - FAPESP, 2º Edição, 2007.

SOBRINHO, A. D. O. **A importância da inclusão de fatores humanos na análise de riscos em plantas industriais**. Dissertação de Mestrado - Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, G. R. M. **Abordagem investigativa sobre o acidente de Chernobyl**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2022.

SOUZA, J. T. V. **Uso da lógica fuzzy para desenvolvimento de um método para a gestão do conhecimento nuclear: aplicação no laboratório de interfaces humano-sistema (Labihs) do Instituto de Engenharia Nuclear**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2021.

STUMBLES, P. A. e outros. **As células dendríticas do trato respiratório em repouso estimulam preferencialmente as respostas das células T helper tipo 2 (Th2) e requerem sinais obrigatórios de citocinas para a indução da imunidade Th1**. Article - *The Journal of Experimental Medicine*, v. 188, n. 11, pg. 2019-2031, 1998.

TANI, F. K. **Proposta de desenvolvimento de transdutores inteligentes baseados na norma IEEE 1451 aplicados a redes LonWorks**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TEIXEIRA, R. L. P. *et al.* **Os discursos acerca dos desafios da siderurgia na indústria 4.0 no Brasil**. Article - *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, p. 28290-28309, Curitiba, 2019.

TRIGOSO, F. B. M. *et al.* **Demanda de energia elétrica e desenvolvimento socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos**. Tese de Doutorado - Programa Intercomunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

VASSÃO, C. A. **Metadesign: ferramentas, estratégias e ética para a complexidade**. Editora Blucher, 1º Edição, 2010

VELLOSO, F. **Informática: conceitos básicos**. Elsevier Brasil, 2014.

VICENTINI, L. C. *et al.* **Liderança autêntica em contexto extremo: as vivências do Bope-batalhão de operações policiais especiais de Santa Catarina**. Repositório Institucional da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.

WAGNER III, J. A.; HOLLENBECK, J. R. **Comportamento organizacional**. Saraiva Educação SA, 4º Edição, 2020.

WAZLAWICK, R. **Engenharia de software: conceitos e práticas**. Elsevier Editora Ltda, 1º Edição, 2019.

APÊNDICE

Questionários elaborados e respondidos pelos operadores do simulador do LABIHS para validar as ferramentas desenvolvidas nesta dissertação.

Avaliador 1: Operador do Circuito Primário do Simulador

A tela “condições iniciais de operação” automatiza a verificação das condições iniciais de operação facilitando o início da operação do simulador e a tomada de decisão dos operadores.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

A leitura e a interpretação das informações da tela “condições iniciais de operação” são fáceis e conduzem o usuário a praticar ações possíveis.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

Todas as informações disponibilizadas na tela “condições iniciais de operação” são utilizadas pelo operador para tomada de decisão.

- (x) concordo plenamente
- () concordo parcialmente
- () nem concordo, nem discordo
- () discordo parcialmente
- () discordo totalmente

A tela “condições iniciais de operação” é um excelente sistema de apoio à decisão aos operadores do simulador e deve ser integrada ao projeto do simulador.

- (x) concordo plenamente
- () concordo parcialmente
- () nem concordo, nem discordo
- () discordo parcialmente
- () discordo totalmente

O que poderia melhorar na interface para melhorar a tomada de decisão?
Interface está de acordo.

A tela “identificação de possíveis acidentes” reduz a carga cognitiva na identificação do acidente pelos operadores, facilitando a tomada de decisão.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

A leitura e a interpretação das informações da tela “identificação de possíveis acidentes” são fáceis e conduzem o usuário a praticar ações possíveis.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

Todas as informações disponibilizadas na tela “identificação de possíveis acidentes” são utilizadas pelo operador para tomada de decisão.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

A tela “identificação de possíveis acidentes” é um excelente sistema de apoio à decisão aos operadores na identificação de acidentes do simulador e deve ser integrada ao projeto do simulador.

- (x) concordo plenamente
- () concordo parcialmente
- () nem concordo, nem discordo
- () discordo parcialmente
- () discordo totalmente

O que poderia melhorar na interface para melhorar a tomada de decisão?
Interface está de acordo.

Avaliador 2: Operador do Circuito Secundário do Simulador

A tela “condições iniciais de operação” automatiza a verificação das condições iniciais de operação facilitando o início da operação do simulador e a tomada de decisão dos operadores.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

A leitura e a interpretação das informações da tela “condições iniciais de operação” são fáceis e conduzem o usuário a praticar ações possíveis.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

Todas as informações disponibilizadas na tela “condições iniciais de operação” são utilizadas pelo operador para tomada de decisão.

- concordo plenamente

- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

A tela “condições iniciais de operação” é um excelente sistema de apoio à decisão aos operadores do simulador e deve ser integrada ao projeto do simulador.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

O que poderia melhorar na interface para melhorar a tomada de decisão? Interface atendeu às expectativas.

A tela “identificação de possíveis acidentes” reduz a carga cognitiva na identificação do acidente pelos operadores, facilitando a tomada de decisão.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo

discordo parcialmente

discordo totalmente

A leitura e a interpretação das informações da tela “identificação de possíveis acidentes” são fáceis e conduzem o usuário a praticar ações possíveis.

concordo plenamente

concordo parcialmente

nem concordo, nem discordo

discordo parcialmente

discordo totalmente

Todas as informações disponibilizadas na tela “identificação de possíveis acidentes” são utilizadas pelo operador para tomada de decisão.

concordo plenamente

concordo parcialmente

nem concordo, nem discordo

discordo parcialmente

discordo totalmente

A tela “identificação de possíveis acidentes” é um excelente sistema de apoio à decisão aos operadores na identificação de acidentes do simulador e deve ser integrada ao projeto do simulador.

- concordo plenamente
- concordo parcialmente
- nem concordo, nem discordo
- discordo parcialmente
- discordo totalmente

O que poderia melhorar na interface para melhorar a tomada de decisão?
Interface atendeu às expectativas.

