



OTIMIZAÇÃO BASEADA NO PSO PARA APOIO À GESTÃO DE MANUTENÇÃO E TESTE PARA UM SISTEMA DE INJEÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE UM REATOR PWR

Gabriel Bastos de Mattos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Rio de Janeiro

Mai de 2022

OTIMIZAÇÃO BASEADA NO PSO PARA APOIO À GESTÃO DE MANUTENÇÃO E
TESTE PARA UM SISTEMA DE INJEÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE UM REATOR PWR

Gabriel Bastos de Mattos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Aprovada por: Prof^a. Andressa dos Santos Nicolau

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso de Melo

Prof. Anderson Alvarenga de Moura Meneses

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2022

Mattos, Gabriel Bastos

Otimização Baseada no PSO para Apoio à Gestão de Manutenção e Teste para um Sistema de Injeção de Alta Pressão de Reator PWR / Gabriel Bastos de Mattos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XI, 66 p.: il.; 29,7 cm

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 53-57

1. Otimização por Enxame de Partículas.
2. Sistema de Injeção de Alta Pressão.
3. Disponibilidade e Custo. I. Nicolau, Andressa dos Santos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título

DEDICATÓRIA

A
Pedro Portela Soares,
Reginaldo Guerrei de Mattos
e Wilson Pereira Bastos

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a meus avôs Reginaldo Guerrieri de Mattos e Wilson Pereira Bastos, que não tiveram a oportunidade de me ver chegar até aqui. A meu avô Reginaldo agradeço por todos os ensinamentos sobre amor, respeito, tolerância e paciência. A meu avô Wilson agradeço por todos ensinamentos sobre amor, honestidade, força e família.

Dedico também, de maneira especial, porém triste, a meu padrasto Pedro Portela Soares, que sempre teve orgulho de falar que tinha um filho engenheiro, que nos deixou há tão pouco tempo, enquanto eu terminava este trabalho. Agradeço por tudo durante estes quase 20 anos.

Agradeço a minhas avós, Benedita e Marcia, por todo amor e carinho que me deram até hoje. Vocês estiveram sempre ao meu lado por todo esse tempo.

À minha mãe, Edvane, meu pai, Luis Eduardo e minha irmã, Luísa, agradeço por formarem o conceito de família, mesmo que diferente, já é a base de muitas coisas.

Agradeço à minha namorada, Carolline Müller, por todo companheirismo e paciência, e principalmente, pelo apoio, carinho e tranquilidade dados enquanto eu realizava este trabalho.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Andressa dos Santos Nicolau, que sempre teve todo carinho e toda paciência do mundo comigo durante 2 anos, cobrando quando necessário e sendo compreensiva durante todos os momentos. Uma professora que me marcou com seu jeito calmo e tranquilo, além de seu jeito de ensinar, se mostrando um exemplo admirável nesta profissão. Obrigado por tudo.

Agradeço aos professores Alan Lima e Roberto Schirru, pelos momentos de paciência dedicados a me ajudar a passar pelos caminhos da programação.

Por fim, agradeço à Ordem DeMolay e a Frank Sherman Land, pelos ensinamentos e pela oportunidade de fazer uma família dentro desta organização.

Agradeço a todos que não foram citados, mas contribuíram de alguma forma para esta fase na minha vida.

É o fim de mais uma fase, e talvez o início de outra.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO BASEADA NO PSO PARA APOIO À GESTÃO DE MANUTENÇÃO E TESTE PARA UM SISTEMA DE INJEÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE UM REATOR PWR

Gabriel Bastos de Mattos

Maio/2022

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Programa: Engenharia Nuclear

Centrais nucleares contam com uma série de sistemas de segurança que garantem sua operação segura e dentro dos padrões exigidos pelos órgãos de controle. O Sistema de Injeção de Alta Pressão do Reator (HPSI) é um sistema de reserva essencial no caso de emergências, sua confiabilidade é garantida principalmente devido às ações de teste e manutenção. Tais ações, estão relacionadas à segurança e, também, a questões de custo-benefício, tais como: indisponibilidade mínima com custo restrito, ou custo e indisponibilidade mínimos, respeitando as restrições de segurança. Dessa forma, essas estratégias de manutenção estão relacionadas com problemas de otimização complexos. Considerando a eficácia dos métodos de inteligência artificial como ferramentas de otimização, este trabalho propõe um modelo de otimização, para o Intervalo de Testes (TIs) de componentes de um modelo simplificado de HPSI, baseado no algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Para o modelo foram desenvolvidas três funções objetivos, duas com o objetivo de minimizar os valores de indisponibilidade e custo de manutenção, e uma com o objetivo de minimizar a indisponibilidade com um custo limite. O estudo de caso mostrou que a metodologia proposta foi capaz de encontrar ótimos resultados para a solução do problema. E quando comparado com resultados da literatura, apresentou resultados semelhantes para indisponibilidade e melhores para o custo. Dessa forma, pode-se dizer que o modelo desenvolvido aponta um caminho promissor para a otimização de estratégias de manutenção, e também para a solução de problemas de natureza semelhante.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PSO-BASED OPTIMIZATION TESTING AND MAINTENANCE SCHEDULE FOR
A HIGH-PRESSURE SAFETY INJECTION SYSTEM OF A PWR REACTOR

Gabriel Bastos de Mattos

May/2022

Advisor: Andressa dos Santos Nicolau

Department: Nuclear Engineering

Nuclear Power Plants (NPPs) rely on a series of safety systems that guarantee its safe operation within the standards demanded by the regulation bodies. The High-Pressure Safety Injection System (HPSI) is fundamental to take action on abnormal situations, staying in standby until it is demanded, its reliability is guaranteed by the test and maintenance routine. Those actions are related to safety and to cost-benefit situations, like minimum unavailability with cost as constraint, or minimum cost and unavailability within the safety standards. By that way, those maintenance strategies are related to complex optimization problems. Considering the effectiveness of artificial intelligence methods as tools for optimizing complex functions, this work is based on a Particle Swarm Algorithm (PSO) to optimize the Test Intervals (TIs) of a HPSI components. To achieve this purpose, a PSO model was developed and three fitness functions, two aiming to achieve lowest value to unavailability and cost simultaneously, and one looking to reduce unavailability as low as possible, using the cost as a constraint. The model developed in this work was capable to achieve TIs that make it possible lower component unavailability combined with lower maintenance costs. When compared to the literature, the results obtained were equivalent in terms of unavailability and better when it comes to cost. Therefore, it can be said that the developed model points to a promising way for TIs optimization, and for a promising path for using this approach to solve other optimization problems of a similar nature.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE SEGURANÇA	9
2.1.1. INDISPONIBILIDADE DE SISTEMAS EM STAND BY	12
2.1.2. CONFIABILIDADE DE SISTEMAS EM CONJUNTO	15
2.1.3. CORTE MÍNIMO	17
2.2. SISTEMA DE INJEÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE REATOR PWR.....	19
3. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)	22
3.1. APLICAÇÃO DO PSO EM FUNÇÕES DE TESTE	26
3.1.1. FUNÇÃO ESFERA.....	27
3.1.2. FUNÇÃO RASTRIGIN.....	28
3.1.3. RESULTADOS PRELIMINARES PARA FUNÇÕES DE TESTE.....	29
4. METOLOGIA PROPOSTA.....	34
4.1. MODELO SIMPLIFICADO DO SISTEMA HPSI	34
4.1.1. ESPECIFICIDADES DO SISTEMA	36
4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	38
4.2.1. FUNÇÃO DE INDISPONIBILIDADE.....	39
4.2.2. FUNÇÃO DE CUSTO.....	40
4.3. FUNÇÃO FITNESS.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OS DA LITERATURA.....	50
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÊNDICE A: PROGRAMAÇÃO EM PYTHON DO PSO DAS FUNÇÕES DE TESTE	58
APÊNDICE B: PROGRAMAÇÃO EM PYTHON DO PSO-HPSI.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema dos componentes principais de uma usina nuclear (NUTEC, 2022) .	5
Figura 2. Conjunto de componentes em série.....	15
Figura 3. Conjunto de componentes em paralelo.....	15
Figura 4. Sistema k-em-n.....	16
Figura 5. Sistema complexo com cortes mínimos.....	17
Figura 6. Exemplo de árvore de falhas de sistema complexo (GARCÍA, 2015).....	18
Figura 7. Árvore de falhas reduzida por MCS (GARCÍA, 2015).....	19
Figura 8: Esquema simplificado do sistema de injeção de segurança.....	21
Figura 9. Atualização da posição da partícula no espaço (NICOLAU, 2010).....	24
Figura 10. Fluxograma representativo de um PSO	25
Figura 11. Função Esfera (SURJANOVIC, 2013).....	27
Figura 12. Função Rastrigin com $-5 \leq x \leq 5$ (SURJANOVIC, 2013).....	28
Figura 13. Gráfico de convergência do PSO para função Esfera com 100 partículas, 10 dimensões e 1000 iterações.....	32
Figura 14. Gráfico de convergência do PSO para função Rastrigin com 100 partículas, 10 dimensões e 1000 iterações	32
Figura 15. HPSI simplificado (adaptado de HARUNUZZAMAN E ALDEMIR, 1996)	35
Figura 16. Código de correção de bordas do PSO-HPSI.....	47
Figura 17. Convergência do PSO-HPSI com a <i>fitness</i> 1.....	48
Figura 18. Convergência do PSO-HPSI com a <i>fitness</i> 2.....	49
Figura 19. Convergência do PSO-HPSI com a <i>fitness</i> 3.....	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Estudo de Populações do PSO para a Função Esfera	29
Tabela 2. Estudo de Populações do PSO para a Função Rastrigin	29
Tabela 3. Estudo de Dimensões do PSO para a Função Esfera.....	30
Tabela 4. Estudo de Dimensões do PSO para a Função Rastrigin.....	30
Tabela 5. Estudo de Iterações do PSO para a Função Esfera.....	31
Tabela 6. Estudo de Iterações do PSO para a Função Rastrigin.....	31
Tabela 7. Estudo da variação de Loops do PSO para Função Esfera.....	33
Tabela 8: Cortes Mínimos do HPSI simplificado	35
Tabela 9. TIs e TPs de componentes do HPSI (MARTORELL et. al., 2002).....	36
Tabela 10: Restrições para Intervalo de Testes.....	37
Tabela 11. Parâmetros fixos utilizados (MARTORELL et. al., 2000).....	42
Tabela 12. Valores iniciais de indisponibilidade e custo	44
Tabela 13. Estudo de População e Iterações para PSO-HPSI	44
Tabela 14. Estudo do parâmetro fator de inércia – PSO-HPSI	45
Tabela 15. Estudo da variação dos parâmetros c_1 e c_2 no PSO-HPSI.....	46
Tabela 16. Parâmetros utilizados no PSO-HPSI	46
Tabela 17. Melhores resultados encontrados com testes realizados com o PSO-HPSI..	47
Tabela 18. Comparação da otimização por PSO com GA	50

LISTA DE ABREVIATURAS

AOT – Allowed Outage Time

APS – Análise Probabilística de Segurança

BIT – Boron Injection Tank

BWR – Reator a Água Fervente

CLO – Condições Limite de Operação

ETBR – Especificações Técnicas Baseadas em Risco

GA – Genetic Algorithm

HPSI – High Pressure Safety Injection System

LOCA – Loss-of-Coolant-Accident

LPSI – Low Pressure Safety Injection System

MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

MCS – Minimal Cut Sets

PSO – Particle Swarm Optimization

PWR – Pressurized Water Reactor

RCS – Reactor Cooling System

RWST – Refueling Water Storage Tank

SCE – Sistemas, Componentes e Equipamentos

SIS – Sistema de Injeção de Segurança

SREN – Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo

TIs – Intervalo de Teste

TP – Tempo de Parada

TSs – Especificações Técnicas

1. INTRODUÇÃO

Centrais nucleares são equipadas com diversos sistemas de segurança com o objetivo de garantir a sua operação de forma segura e dentro dos padrões exigidos pelos órgãos de controle. Estes sistemas de segurança trabalham de forma ativa/passiva para fornecer proteção ao reator caso alguma situação anormal seja detectada, considerando que para todos Sistemas, Componentes e Equipamentos (SCE) envolvidos, são desenvolvidos uma série de protocolos e procedimentos para que sejam alcançados altos níveis de confiabilidade (FULLWOOD, R. R., 1988).

No caso de sistemas em reserva, ou seja, aqueles sistemas que permanecem em espera até serem acionados por alguma demanda, são exigidos altos níveis de disponibilidade e confiabilidade para operação, de modo que eles não falhem quando demandados. Esta disponibilidade é garantida por diversos fatores, dentre eles, pode-se destacar os procedimentos de teste, inspeção e manutenção (FULLWOOD, R. R., 1988).

As rotinas de teste, inspeção e manutenção garantem uma maior confiabilidade na operação dos SCE, principalmente aqueles ligados à segurança nuclear. As ações de manutenção (USNRC, 1991a) são feitas a longo prazo e têm por objetivo garantir a qualidade dos SCE durante toda a sua vida útil. Dentre as ações de manutenção podem-se considerar: reparos, peças de reposição, testes, calibração e inspeções em serviço todas realizadas dentro dos limites de segurança, que levam em consideração os efeitos na confiabilidade e disponibilidade dos SCE em toda a planta, e o custo de cada ação.

No entanto, enquanto o custo da manutenção está diretamente relacionado com a frequência e duração da manutenção, a disponibilidade dos SCE, principalmente aqueles relacionados à segurança da planta, nem sempre estão diretamente relacionados com a frequência de manutenção, pois uma maior frequência e duração das atividades de manutenção podem levar à redução das taxas de falha dos SCE, mas, por outro lado, seu tempo parado, também é estendido resultando em uma baixa disponibilidade (WANG et al., 2020). Além disso, os custos envolvidos nessas ações são altos, e procura-se, então, garantir a confiabilidade dos SCE com menores custos envolvidos.

Dentro desta visão de confiabilidade aprimorada dos SCE e custos mais baixos, podem-se destacar duas abordagens: a primeira é a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) (IAEA, 2008), onde as ações de manutenção são feitas fora da obrigatoriedade dos procedimentos de manutenção buscando opções de manutenção em que o custo de manutenção adicional é compensado pelo benefício de menos falhas dos SCE. Por outro lado, o segundo está relacionado com flexibilizar ou modificar os Intervalos de Teste (TIs) e os Tempos de Parada (TP) dos SCE de segurança, definidos nas especificações técnicas (USNRC, 1983) sem sacrificar os critérios de risco subjacentes, conhecido como Especificações Técnicas Baseadas em Risco (ETBR) (USNRC, 2011).

Tanto a abordagem MCC quanto a análise de ETBR, são tratados dentro da área de Análise Probabilística de Segurança (APS) (IPEN, 2022), onde geralmente são usadas técnicas práticas e heurísticas, em vez de técnicas matemáticas formais para desenvolver procedimentos de manutenção melhorados (KHALAQUZZAMAN et. al, 2011, GJORGIEV et. al., 2012, KANCEV E CEPIN, 2011, HARUNUZZAMANE ALDEMIR, 1996, USNRC, 2012). No caso do ETBR, na maioria das vezes é feita uma análise de sensibilidade para comparar várias combinações de TIs, TP, e conjuntos de componentes em cada manutenção, de forma a encontrar cronogramas de manutenção com riscos inferiores ou comparáveis aos encontrados dentro dos procedimentos já existentes. O objetivo é mostrar que mudanças nesses parâmetros permitiriam por exemplo: maior flexibilidade operacional, otimização dos programas de manutenção, aumento da produção, entre outros, sem sacrificar a segurança da instalação.

Atualmente está sendo dada atenção especial à análise das alterações nos TIs dentro das especificações técnicas das centrais nucleares. Um consenso tem sido criado sobre a necessidade de tornar esses requisitos mais eficazes em termos de risco e custos envolvidos (USNRC, 1998, UPV, 1998, WANG et. al., 2020)

Dessa forma, pode-se olhar o problema de aumento de confiabilidade, aumento da disponibilidade (diminuição da indisponibilidade) e custos mais baixos como um problema de otimização, onde deve-se ter o máximo de disponibilidade dos equipamentos com menor custo associado, respeitando as restrições de segurança (MUÑOZ et. al., 1997). Ou seja, o problema pode ser formulado em termos de uma função objetivo, no qual deseja-se minimizar o custo e maximizar a disponibilidade, sujeito a restrições, a nível de SCE ou desempenho da planta, onde a otimização dos parâmetros é feita por um método de otimização.

No caso de otimizar os TIs com base na confiabilidade (risco), indisponibilidade e custo, normalmente levam a funções objetivos multimodais e não lineares e uma variedade de restrições lineares e não lineares, resultando em um espaço de busca complexo, discreto, e com regiões de soluções viáveis e inviáveis que eventualmente apresentam ótimos locais. Devido a esse fato, ao longo dos anos, métodos de inteligência artificial (IA) têm sido aplicados a esse problema. Estudos como MARTORELL et. al., (2000 e 2002) e WANG et. al., (2020) utilizaram métodos de IA para otimizações de riscos e custos em usinas nucleares.

Considerando a efetividade dos métodos de IA como uma ferramenta de otimização e o auxílio que estes métodos podem trazer para a indústria como uma ferramenta efetiva e confiável de estudo e análise, este trabalho tem por objetivo a otimização, pelo algoritmo Enxame de Partículas (do inglês “*Particle Swarm Optimization*” - PSO) (KENNEDY E EBERHART., 1995), dos TIs dos componentes de um sistema relacionado com a segurança nuclear nos critérios de risco e custo.

O modelo de PSO desenvolvido para otimização foi aplicado em um modelo simplificado do Sistema de Injeção de Alta Pressão de Reator, do inglês, *High Pressure Safety Injection System* (HPSI), de um Reator a Água Pressurizada utilizado na literatura (HARUNUZZAMAN E ALDEMIR, 1996, MARTORELL et. al., 2000 e 2002, WANG et. al., 2020), onde foram desenvolvidas e testadas 3 funções objetivo, todas com o foco na minimização de valores de TIs que fornecesse menor indisponibilidade e menor custo de manutenção, porém uma das funções objetivo teve como restrição o valor do custo de manutenção.

O modelo de PSO desenvolvido foi capaz de encontrar valores de TIs que possibilitam uma menor indisponibilidade dos componentes, associado a um menor custo de manutenção. Os resultados encontrados mostram os benefícios da adoção de modelos ETBR e PSO, em particular na otimização restrita de TIs, e apontam um caminho promissor do uso desta abordagem para resolver outros problemas de otimização de natureza semelhante.

Para apresentar o método proposto, seus fundamentos teóricos e os resultados obtidos, este trabalho está organizado em 5 capítulos descritos sumariamente a seguir.

O Capítulo 2 apresenta uma descrição dos fundamentos teóricos que trouxeram embasamento para a realização desta dissertação. Inicialmente, introduz a segurança operacional de uma central nuclear e os dispositivos aplicados para garanti-la. Em seguida, uma breve introdução sobre a análise probabilística de segurança aplicada a centrais nucleares, os conceitos de risco, engenharia de confiabilidade e indisponibilidade de equipamentos. Em seguida, uma explicação do Sistema de Refrigeração de Emergência de um Reator PWR e seus componentes, apresentando um foco no HPSI e sua atuação em situações de acidente, como um *Loss-of-Coolant-Accident* (LOCA).

O Capítulo 3 apresenta os conceitos e fundamentos do PSO, seu fluxograma, um pseudocódigo do seu funcionamento e sua aplicação na otimização de funções de teste discretas e contínuas, juntamente com os resultados desta otimização, que possibilitaram o estudo dos parâmetros do PSO.

O Capítulo 4 apresenta o modelo de HPSI abordado neste trabalho, bem como a modelagem do PSO desenvolvida. A descrição técnica do modelo simplificado do HPSI, seus caminhos de fluxo, especificidades e *Minimal Cut Sets* (GARCÍA, 2015) aplicados para a otimização do PSO também são abordados. Além disso, são apresentadas e descritas as funções objetivo desenvolvidas e aplicadas no modelo de HPSI, assim como os parâmetros e restrições aplicados na otimização.

O Capítulo 5 apresenta os resultados do modelo de PSO desenvolvido para o HPSI, onde os resultados encontrados são comparados com outros métodos da literatura.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho e capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fissão nuclear, que ocorre dentro do reator, produz aumento de temperatura e elementos radioativos, portanto, precisa ocorrer em ambiente controlado, com isolamento e proteções que garantam a segurança dos trabalhadores da central e do meio ambiente, não só em condições normais de operação, como em situações anormais ou acidentes. Portanto, uma central é equipada para, caso necessário, desligar o reator com segurança e remover seu calor residual (NUCLEN, 1985).

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de uma usina nuclear, onde pode-se observar seus componentes principais. Em amarelo é apresentado o circuito primário, representado por vaso de pressão (reator), pressurizador e bomba. Este sistema é selado pois é nele que ocorre a fissão dos elementos radioativos, de maneira a não permitir vazamento do refrigerante e seu contato com outros sistemas em situações normais.

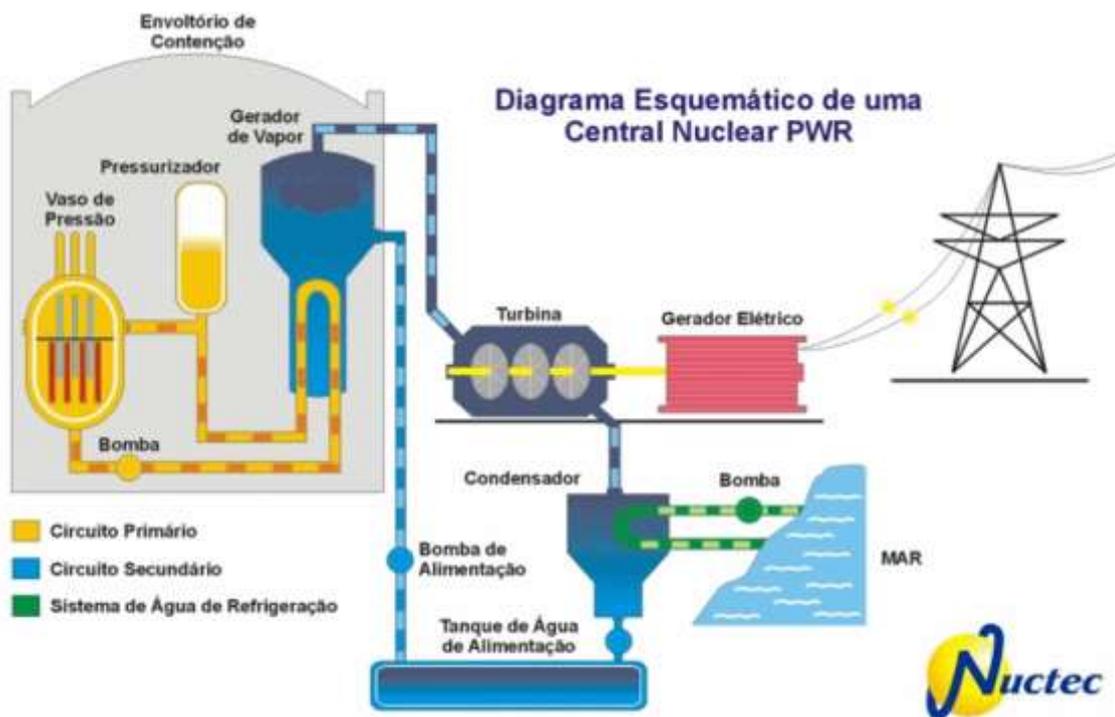


Figura 1. Esquema dos componentes principais de uma usina nuclear (NUTEC, 2022)

Esta não é a única barreira de segurança do reator, ele é composto de múltiplas barreiras, as principais são:

- 1ª - Combustível – Composto pela própria estrutura cristalina da pastilha e o tubo de revestimento da vareta;
- 2ª - Sistema selado do refrigerante – Sistema primário estanque;
- 3ª - Vaso do reator – Blindagem de concreto envolvendo o vaso do reator;
- 4ª - Contenção – Prédio do reator, com o prédio da contenção de aço envolvendo todo o sistema, e o o prédio em si, de concreto armado com isolamento contra água do subsolo.

Os objetivos básicos dos estudos de segurança de usinas nucleares são os de reduzir as chances de ocorrência de acidentes que possam levar ao escapamento de material radioativo da planta. Para atingir esse objetivo, os projetos dos sistemas do reator devem ser tão seguros quanto possível, o que implica em um balanço entre a melhoria na segurança e na tecnologia e nos aspectos econômicos. Para isso, é necessário:

- Barreiras múltiplas de segurança contra o escapamento de material radioativo;
- Realização de análise detalhada de uma grande variedade de eventos para avaliar a segurança do reator;
- Introdução de dispositivos de segurança para a proteção do público e da central contra erros humanos, falhas de SCE e eventos naturais (e. g., maremotos, terremotos, furacões etc.).

Pode-se dizer que a segurança de uma usina nuclear está baseada em três pilares, definidos pela defesa em profundidade, são eles: prevenção, proteção e mitigação de acidentes. A prevenção é o primeiro nível das ações de segurança, onde as condições de acidente devem ser evitadas, e isto se dará a partir da observância dos requisitos de projeto, fabricação e operação, de maneira a garantir a segurança, assim como, enfatizar a qualidade, redundância, a inspeção e o teste antes da aceitação para operação comercial e considerando o período de vida da planta.

No segundo nível da segurança, proteção, admite-se que incidentes podem ocorrer, tanto no projeto, quanto na construção e operação e, por isso, deve-se dotar a planta com sistemas e dispositivos de segurança capazes de oferecer proteção aos trabalhadores, público e meio ambiente. Por exemplo, o reator deve possuir um Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (SREN) para evitar o derretimento do combustível e a liberação de produtos de fissão devido ao aquecimento dos produtos de fissão em seguida a um acidente de perda de refrigerante.

Por fim, a mitigação, terceiro nível, que suplementa os dois primeiros, adicionando uma margem de segurança no caso de eventos improváveis ou inesperados. A necessidade de sistemas de segurança adicionais é determinada avaliando-se analiticamente os efeitos de incidentes severos originários da falha simultânea de vários componentes da instalação e alguns dos sistemas de segurança sobre a planta, seu pessoal associado, e o público. Sendo assim, o terceiro nível visa limitar as consequências de acidentes, caso ocorram, a despeito de medidas preventivas.

Para avaliações de segurança dos SCE da usina, são avaliados acidentes com danos potencialmente severos ao núcleo e com frequências de ocorrência muito baixas, de modo a estabelecer critérios de desempenho para a adição ou extensão de sistemas de segurança de engenharia. Dessa forma a segurança nuclear garante que cerca de 98% de todo material radioativo permanecerá confinado na planta, se houver refrigeração adequada que evite o derretimento do núcleo garantindo a proteção dos trabalhadores, público e meio ambiente (LEWIS, E. E., 1977).

Os dispositivos de segurança podem ser passivos, que agem de forma a mitigar as consequências de um acidente com liberação de radionuclídeos, utilizando barreiras fixas, como o próprio tubo de revestimento do combustível, blindagem do reator, prédio da contenção o reator com isolamento do subsolo. Como também podem ser dispositivos de segurança ativos, que agem de forma a garantir a integridade dessas barreiras.

Os dispositivos de segurança ativos irão agir em condições anormais de operação ou em acidentes de base de projeto, garantindo a segurança em quaisquer circunstâncias. Estes dispositivos de segurança são atuados pelo Sistema de Proteção do Reator. Este sistema não tenta identificar a causa da falha, somente age de forma a eliminar quaisquer situações anormais atuando os dispositivos (NUCLEN, 1985).

Dentre alguns dos dispositivos de segurança ativos, temos:

Sistema de Proteção do Reator – Este sistema monitora continuamente as variáveis de processo da usina e sempre que detecta iminência de condições de risco, inicia automaticamente contramedidas de segurança;

- Sistema de Desligamento Rápido do Reator – Este sistema age inserindo totalmente as barras de controle absorvedoras de nêutrons no reator, que ficam sustentadas sobre ele magneticamente, e quando são soltas, entram por gravidade no núcleo;
- Sistema de Isolamento da Contenção – Este sistema veda a contenção da atmosfera externa de forma a não permitir a saída de ar possivelmente contaminado por particulados radioativos;
- Suprimento Ininterrupto de Energia Elétrica – Este sistema faz o suprimento de energia elétrica de emergência na usina por meio de geradores à diesel, para abastecer os sistemas de segurança caso a rede elétrica externa não esteja mais disponível;
- Sistema de Água de Alimentação de Emergência – Este sistema garante um suprimento continuado de água nos geradores de vapor caso o circuito da turbina seja afetado por algum acidente com falha do sistema operacional.
- Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo – Este sistema é responsável por refrigerar o núcleo, podendo também agir em situação de desligamento do reator, mas é importante principalmente em situações de LOCA.

Todos esses sistemas são tratados pela área de análise de segurança (IPEN, 2022), que por sua vez, pode ser dividida em duas áreas: análise de segurança determinística e análise de segurança probabilística, de maneira que as duas abordagens se complementam. A análise determinística de segurança trata de analisar de modo conservador um conjunto de acidentes de base de projeto, como sequência de eventos e árvores de falha. A APS é o complemento que avalia probabilidade de falhas de equipamentos e erros de operador, reproduzindo em estimativas numéricas os níveis de segurança de uma instalação.

A APS é considerada ferramenta fundamental de apoio ao projeto de uma instalação nuclear, pois é um meio que possibilita determinar a confiabilidade dos sistemas de segurança e estimar o risco de acidentes com consequências indesejáveis.

Ao longo dos anos, observa-se um crescente aumento tanto das autoridades reguladoras quanto da indústria nuclear para estimular o uso da APS para estimar os gastos de recursos em usinas nucleares envolvidos em ações de teste, manutenção e inspeção (MARTORELL et. al., 2000, VESELY E APOSTOLAKIS, 1999, USNRC, 1995 e 1998), respeitando as restrições impostas pela segurança nuclear.

2.1. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE SEGURANÇA

Estimar riscos em centrais nucleares é um trabalho complexo, pois estas instalações envolvem uma enorme quantidade de sistemas com uma quantidade de equipamentos, componente e subcomponentes, onde podem apresentar diversos tipos de falhas, e cada falha pode ocasionar falhas em outros equipamentos, isto significa que a quantidade de fatores a serem considerados em cada situação é muito grande, causando assim toda a complexidade.

As definições de risco lidam com 2 fatores, a frequência, e as consequências da ocorrência de um evento, sendo assim, a definição de risco é frequentemente utilizada de acordo com a Equação (1) (JONKMAN et. al., 2015).

$$Risco = Frequência \times Consequências \quad (1)$$

Como uma forma de estimar estes riscos, a APS se aplica de forma efetiva para quantificar numericamente o risco de acidentes e apresentar probabilidades de ocorrência de um evento. Ela permite uma estimativa da probabilidade de ocorrência de um evento de maneira que possa possibilitar uma comparação para aumento da segurança. Este método é bastante útil, porém não é considerado uma medida absoluta por motivos reguladores (BODANSKY, 2004).

Uma maneira de estudar o comportamento de um sistema é analisando sua confiabilidade, que tem por definição tratar da probabilidade de um sistema estar em funcionamento após um período de tempo t . Esta probabilidade será dada por um valor numérico entre 0 e 1, onde 1 representa o sistema estar 100% em funcionamento.

Sendo assim, a confiabilidade $R(t)$ se dá pela relação com a taxa de falha $\lambda(t)$ de um elemento analisado, conforme a Equação (2):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2)$$

Em sistemas não reparáveis a confiabilidade se equivale à disponibilidade, porém, em unidades reparáveis, em um tempo t a unidade pode estar funcionando ou em manutenção, que, teoricamente, irá retorná-lo à situação de funcionamento, considerando que este reparo irá devolver a condição de nova à unidade, o valor médio da Disponibilidade $A(t)$ pode ser dado pela Equação (3) (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011).

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3)$$

onde, MTTF significa o tempo médio entre falhas e MTTR significa o tempo médio do reparo.

De maneira inversa à Disponibilidade $A(t)$, temos a Indisponibilidade, que trata da possibilidade de uma unidade não estar em funcionamento em um tempo t em que for demandado, como na Equação (4).

$$U(t) = 1 - A(t) \quad (4)$$

Os métodos de Análise Probabilística de Segurança visam avaliar e quantificar os níveis de risco de uma central calculando a probabilidade de ocorrência de falhas e suas consequências. Alguns dos fatores que podem influenciar neste processo de quantificação, são os fatores relacionados às Especificações Técnicas (TSs) de Manutenção, tornando a estrutura da APS como uma função destes.

Então, a contribuição de risco de um sistema, pode ser tratada de acordo com a contribuição de risco de seus componentes. Para analisar a contribuição de risco de um componente ou de um equipamento, pode-se analisar sua indisponibilidade por falha em demanda, teste e manutenção.

Segundo MARTORELL (2002), a indisponibilidade de um sistema está dividida em erros humanos, falhas de causa comum e indisponibilidade de componentes, sendo este último diretamente relacionado às TSs.

As TSs são estipuladas por órgãos regulares, como USNRC e CNEN, que juntamente com fabricantes dos SCE, tratam de estabelecer critérios técnicos que devem ser seguidos pelos SCE. Traz seções como Condições Limite de Operação (CLO), aplicabilidade, ações a serem tomadas e requerimentos de fiscalização (HOFFMAN, et al., 2004).

A CLO é definida como a menor capacidade funcional ou nível de desempenho de sistema, subsistema, componente ou equipamento necessário para garantir a operação segura da usina.

As TSs irão definir frequência e tempo de duração para a realização de inspeções e testes, e também tempos de indisponibilidade de aceitáveis para os SCE, em vista de garantir a manutenção da qualidade dos SCE, de maneira a garantir que fiquem dentro dos limites da CLO.

2.1.1. INDISPONIBILIDADE DE SISTEMAS EM STAND BY

Considera-se como um sistema em *stand by*, aquele sistema que fica em prontidão para ser acionado sob demanda num instante t , e após demandado, começar a operar imediatamente.

Portanto, para isto, este tipo de sistema necessita estar sempre operacional, e para possibilitar essa operacionalidade, ele deve fazer parte dos protocolos de segurança, que dentre outras coisas, recebem vigilância de testes e manutenções frequentemente, de maneira a garantir a qualidade do sistema e reduzir a sua indisponibilidade o quanto for possível.

O conceito de disponibilidade se aplica a estes sistemas, pois estes devem estar disponíveis quando demandados, diferente de sistemas que estão em contínuo funcionamento, para os quais não há essa demanda pontual num tempo t . Esta disponibilidade pode ser alterada, no caso destes estarem submetidos a testes e manutenções, pois nestes casos, o sistema não estará disponível imediatamente. Nestas situações aparece o conceito de indisponibilidade devido a efeitos de *downtime*, representado pelos tempos durante testes e manutenções.

Os testes são realizados para averiguar o estado do sistema devido a falhas aleatórias, que são falhas que podem ocorrer a qualquer momento de maneira não revelada, quando não está em operação.

As manutenções são realizadas para corrigir estas falhas, tanto falhas antes da operação, quanto falhas que ocorreram durante a operação e são corrigidas posteriormente. A manutenção preventiva visa aumentar a operacionalidade do equipamento previamente, a partir da correção de componentes que ainda não falharam, mas podem vir a falhar. Por outro lado, a manutenção corretiva visa corrigir um componente já falho.

Durante estas manutenções, é necessário que o sistema esteja inoperante por um período de tempo, onde, quanto maior este período, maior a indisponibilidade do sistema. Para isso, se tem o conceito de *Allowed Outage Time* (AOT) (USNRC, 2018), que é o tempo permitido de parada durante uma manutenção, que se for ultrapassado, reduz a disponibilidade a planta, que teria que ser desligada até o sistema ser reparado.

Para a análise da indisponibilidade de um sistema em *stand by*, pode-se dividir a análise em duas categorias, a indisponibilidade devido a falhas raleatórias e a indisponibilidade devido a efeitos de downtime.

Segundo KIM, et al., (2002), a indisponibilidade devido a falhas aleatórias (u_r) é tratada de acordo com a contribuição da indisponibilidade dependente do tempo T , representada pela Equação (5) e a contribuição média da indisponibilidade independente do período de tempo, conforme Equação (6).

$$u_r(x, T) \approx \rho + \lambda \cdot T \quad (5)$$

$$u_r(x) \approx \rho + \frac{1}{2} \lambda \cdot T \quad (6)$$

onde, ρ representa a probabilidade de falha por demanda e λ é a taxa de falha em *stand by*.

A indisponibilidade devido a efeitos de downtime pode ser dividida de acordo com: Indisponibilidade devido a testes (u_t), representada pela Equação (7); Indisponibilidade devido à realização de manutenção preventiva (u_m), representada pela Equação (8); e Indisponibilidade devido à realização de manutenção corretiva (u_c), representada pela Equação (9).

$$u_t(x) \approx f_t(x) \cdot t \cdot q_0^t \quad (7)$$

$$u_m(x) \approx f_m(x) \cdot m \cdot q_0^m \quad (8)$$

$$u_c(x) \approx f_c(x) \cdot d(x) \quad (9)$$

onde, as funções f_t , f_m e f_c representam a frequência de realização de uma ação, de testes, de manutenção preventiva e de manutenção corretiva, respectivamente, representadas pelas Equações (10), (11) e (12). Como parâmetros específicos de componentes, t representa o tempo médio de um teste, m o tempo médio de uma manutenção preventiva e $d(x)$ o tempo médio de uma manutenção corretiva, que é uma função dependente do AOT, especificada na Equação (13). Por fim, q_0^t e q_0^m são as frações de tempo entre $[0, 1]$ em que os componentes estarão offline devido a testes e manutenção preventiva, respectivamente, neste trabalho usou-se q_0^t e $q_0^m = 1$, pois t e m foram usados como tempo médio.

$$f_t(x) = \frac{1}{T} \quad (10)$$

$$f_m(x) = \frac{1}{M} \quad (11)$$

$$f_c(x) = \frac{1}{T} \cdot u_r(x, T) \quad (12)$$

onde, T representa a periodicidade de testes, M representa a periodicidade de manutenção preventiva.

O parâmetro $d(x)$ representa uma média do tempo de reparo modificada, que é relacionado ao intervalo permitido de downtime, trazido por $G(x)$, que é a probabilidade de completar o reparo dentro desse intervalo D permitido.

$$d(x) = \mu \cdot G(x) \quad (13)$$

$$G(x) = 1 - e^{-\frac{D}{\mu}} \quad (14)$$

onde, μ é o tempo médio de reparo caso não haja tempo limite de finalização.

Dessa forma, podem-se analisar, por exemplo, 4 tipos de indisponibilidades nos componentes, são elas: Indisponibilidade devido a falhas aleatórias (u_r), representada pela Equação (6); Indisponibilidade devido a testes (u_t), representada pela Equação (7); Indisponibilidade devido à realização de manutenção preventiva (u_m), representada pela Equação (8); e Indisponibilidade devido à realização de manutenção corretiva (u_c).

Tendo em vista que a indisponibilidade de um componente de sistema pode ser expressa por um somatório das indisponibilidades analisadas:

$$u \approx u_r + u_t + u_m + u_c \quad (15)$$

2.1.2. CONFIABILIDADE DE SISTEMAS EM CONJUNTO

Sistema é um conjunto de componentes interconectados de acordo com um projeto, de forma a realizar um conjunto de funções de maneira efetiva e confiável. O tipo dos componentes e sua qualidade, assim como a forma em que estão arranjados, irá influenciar diretamente no desempenho da atividade e na confiabilidade do sistema (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011).

De acordo com a configuração do arranjo deste sistema, pode-se determinar sua confiabilidade. Se o sistema não fornecer um nível adequado de confiabilidade, tanto o arranjo estrutural quanto a confiabilidade de suas partes podem ser alterados em busca de um projeto que atenda às especificações de confiabilidade (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011).

Considerando a análise de um sistema complexo com diversos equipamentos conectados, utilizam-se as maneiras de análise de confiabilidade de sistemas interligados, que podem ser em série ou em paralelo, como visto na Figura 2 e na Figura 3.

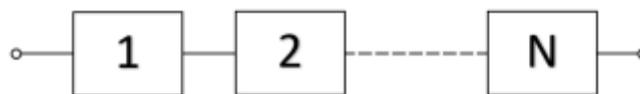


Figura 2. Conjunto de componentes em série

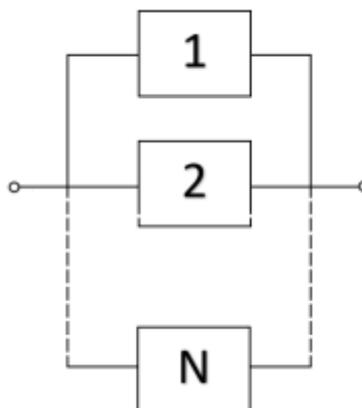


Figura 3. Conjunto de componentes em paralelo

A Indisponibilidade U , de um sistema em série, como visto na Figura 2, pode ser dada de acordo com a Equação (16).

$$U_s = \prod_{p=1}^n U_p \quad (16)$$

onde, p é o número de componentes em série no sistema.

Em sistemas onde existe uma quantidade de sistemas em série ligados de forma paralela, e para uma indisponibilidade de todo sistema, é necessário que ocorra falha em pelo menos um componente de cada caminho possível deste sistema, pode-se analisar como um sistema k -em- n , conforme mostrado na Figura 4.

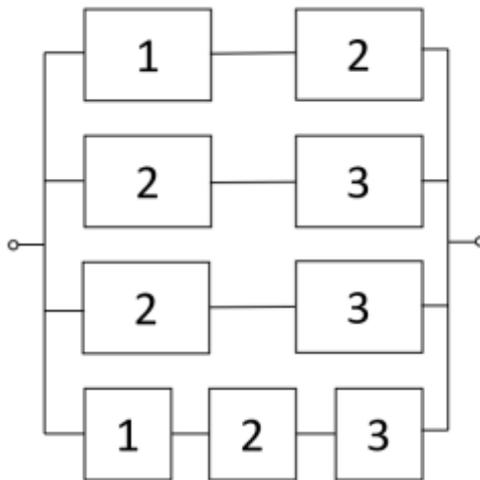


Figura 4. Sistema k -em- n

Este sistema representa 3 componentes distintos, onde há 4 caminhos possíveis para o funcionamento do sistema, onde a falha de um dos componentes em série já representa a indisponibilidade do seu caminho (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011). Sendo assim, sua função de indisponibilidade pode ser calculada por:

$$U_s = \sum_{g=1}^n \prod_{p=1}^n U_{rp} \quad (17)$$

onde, U_s é a indisponibilidade do sistema g é o número de caminhos em paralelo possíveis de falha e p é o número de componentes em série em cada caminho.

2.1.3. CORTE MÍNIMO

De maneira análoga ao sistema k-em-n, podemos também analisar sistemas mais complexos, onde a indisponibilidade de um dos componentes pode ou não causar a indisponibilidade do sistema, mas pelo método de cortes mínimos, do inglês, *Minimal Cut Sets (MCS)*, que permite analisar qual combinação específica de componentes com falhas poderá causar a falha de todo o sistema. Dessa forma, define-se cortes mínimos como as menores combinações possíveis de eventos básicos cuja ocorrência simultânea leva a uma determinada falha.

Os MCS podem ser analisados utilizando uma abordagem por diagrama de blocos ou por árvore de falhas, de modo que uma combinação de falhas de componentes pode levar a uma falha de todo o sistema, e na árvore de falhas, levando ao evento topo.

A Figura 5 apresenta um sistema complexo de diagrama de blocos onde se podem analisar os MCS que representam a combinação de eventos para que haja falha de todo o sistema.

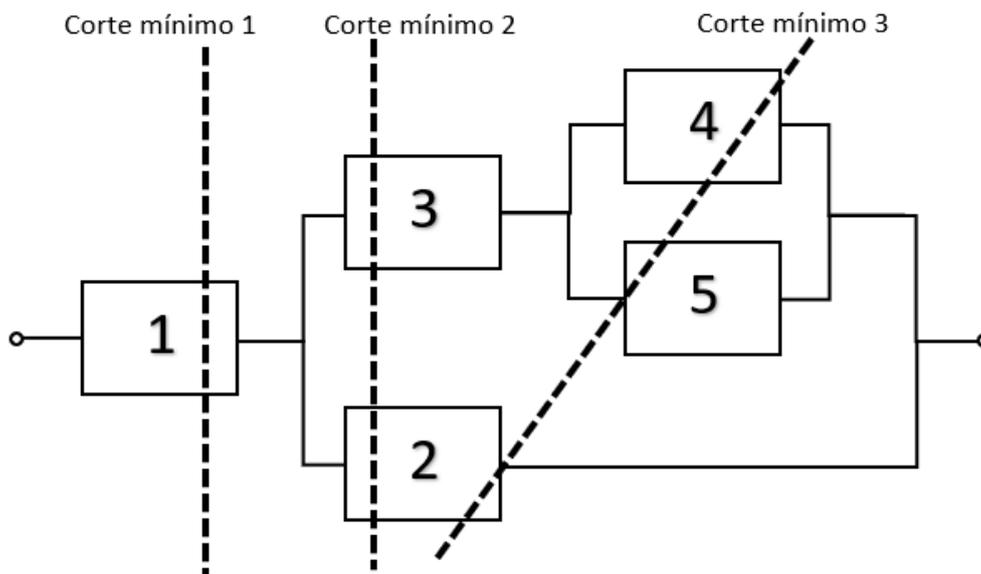


Figura 5. Sistema complexo com cortes mínimos

Conforme se observa na Figura 5, temos os MCS que representam que a combinação de eventos falhas de cada um deles representará a indisponibilidade de todo sistema, que são (1), (2, 3), (2, 4, 5).

Já no método de MCS pela árvore de falhas, a análise é realizada de acordo com a quantidade de portas OU (que sempre influenciará de forma a aumentar a quantidade de cortes mínimos), e pelas portas E (que influencia no tamanho do corte mínimo).

A Figura 6 apresenta uma árvore de falhas que mostra uma série de eventos que pode levar ao evento topo. E a Figura 7 apresenta esta mesma árvore depois da sua redução por MCS.

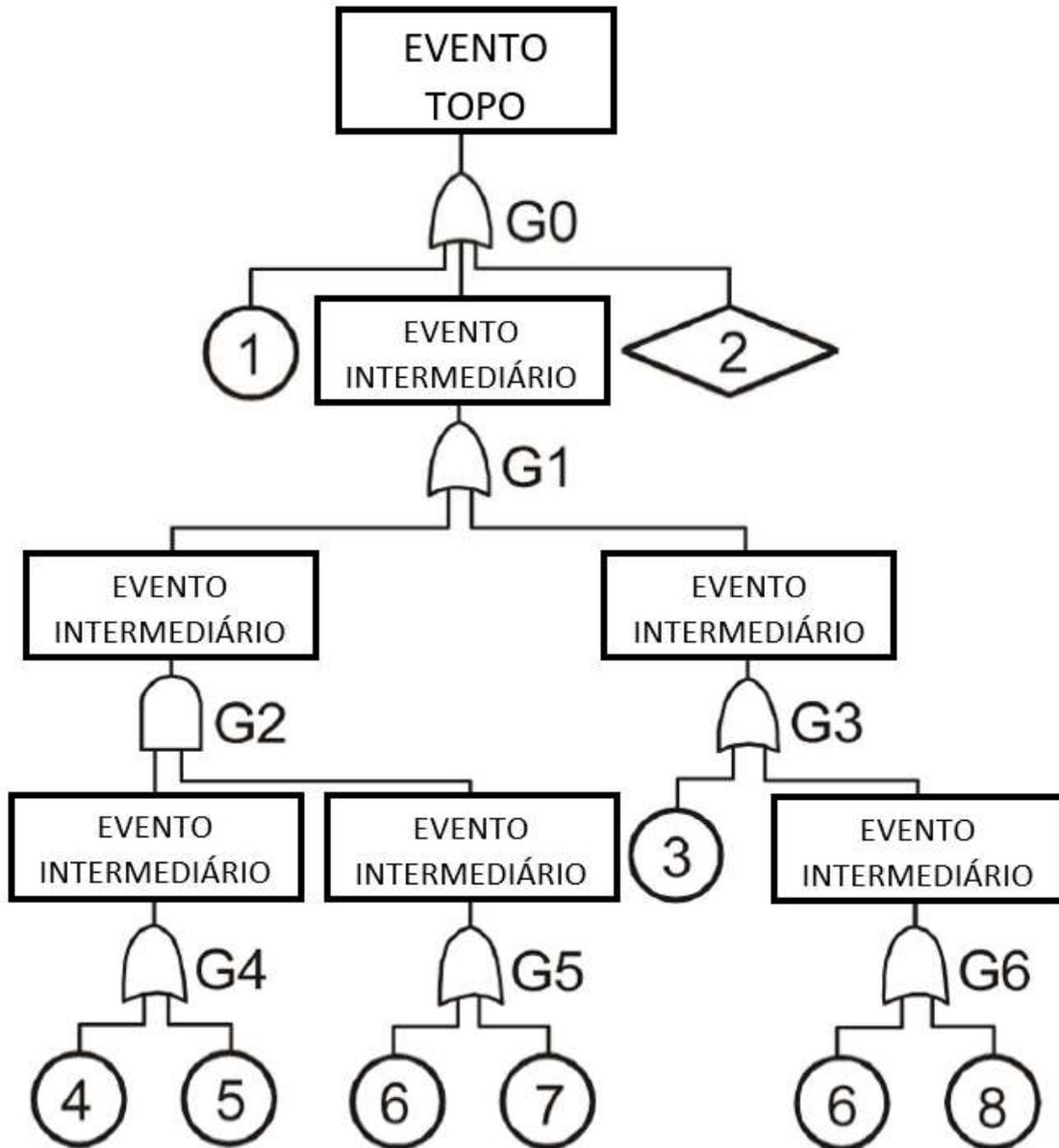


Figura 6. Exemplo de árvore de falhas de sistema complexo (GARCÍA, 2015)

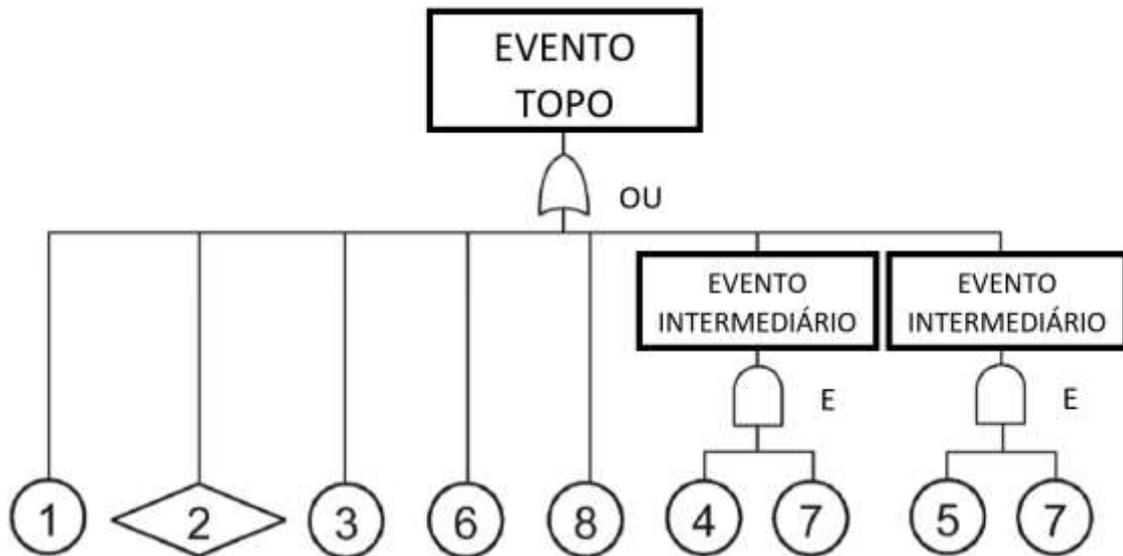


Figura 7. Árvore de falhas reduzida por MCS (GARCÍA, 2015)

Como se pode observar, a árvore de falhas reduzida apresenta os eventos básicos que levam diretamente ao evento topo, mostrando que cortes mínimos de ordem 1 levam ao evento topo de forma independente, enquanto os de maior ordem podem ser vinculados à ocorrência do outro evento.

2.2. SISTEMA DE INJEÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE REATOR PWR

LOCA (NRC, 2007), é um acidente de base de projeto para reatores nucleares do tipo reator a água pressurizada (PWR) e reator a água fervente (BWR) que é resultado da perda de refrigerante do núcleo em uma razão maior que a capacidade de reposição do mesmo pelo sistema de compensação. Este acidente pode acontecer por rompimento de uma tubulação do sistema primário do reator, por uma falha na válvula de alívio do pressurizador, etc. Esta perda de grandes quantidades de refrigerante irá impossibilitar a remoção de calor do núcleo de forma efetiva, a não ser que o refrigerante seja repostado no sistema. O acúmulo de ácido bórico devido à vaporização do refrigerante em um reator PWR, se não for controlado, pode atingir os limites de precipitação e bloquear os canais do refrigerante no núcleo, impedindo a remoção de calor adequada independentemente do tamanho da perda (NRC, 2007).

Com o fluxo da refrigeração interrompido, a temperatura do revestimento das barras de combustível sobe rapidamente, devido ao aumento do fluxo crítico de calor devido aos produtos de fissão, podendo até exceder o valor de sua temperatura de fusão e causar seu derretimento, caso não seja retomada a refrigeração do núcleo.

Segundo FRUTUOSO E MELO (1981), este tipo de acidente irá gerar as condições anormais na operação, como a redução da pressão no sistema primário e aumento da pressão no edifício da contenção, que são detectadas pela instrumentação de controle, ativando o SREN.

O SREN é projetado para proteger o núcleo em diversas situações, como um LOCA, que é atuado automaticamente de forma a proporcionar o suprimento de água borada no núcleo do reator em caso de um acidente para evitar um possível dano ao núcleo devido ao acréscimo de temperatura e pressão.

O Sistema de Injeção de Segurança (SIS) faz parte do SREN, e é ele que garante a injeção de água suficiente em caso de ocorrência de LOCA, de maneira a repor o inventário perdido, diminuindo a reação em cadeia e removendo calor do núcleo (NRC, 2000).

Conforme a Figura 8, este sistema irá retirar água borada por meio de bombas e válvulas do Tanque de Armazenamento de Água de Recarga, do inglês, *Refueling Water Storage Tank* (RWST), e injetar diretamente na perna fria do reator. No caso da usina Angra 1, este tanque tem a capacidade de cerca de 1 milhão de litros de água borada a 2000 ppm (FRUTUOSO E MELO, 1981).

O SIS pode ser dividido em Sistema de Injeção a Baixa Pressão, do inglês, *Low Pressure Safety Injection System* (LPSI), que garante uma injeção de maior quantidade de inventário, e em Sistema de Injeção de Alta Pressão, do inglês, *High Pressure Safety Injection System* (HPSI), que age em situações de emergência e por curto período em caso de acidente, ainda quando circuito primário está com altos valores de pressão e temperatura. Este sistema fica normalmente em *stand by*, e é utilizado em emergência em situações de LOCA.

O HPSI pode também atuar automaticamente em situações de não acidente, em caso de situações anormais, como baixa pressão no pressurizador, alta pressão na contenção ou anomalias no fluxo ou pressão na linha de vapor.

Quando o HPSI recebe sinal de injeção de segurança, em cerca de 20 segundos já está operando em plena capacidade, e este funcionamento dura cerca de 30 minutos. Os sinais para início de operação deste sistema podem ser: Baixa pressão no pressurizador; Alta pressão na contenção; Baixa pressão na linha de vapor, ou por atuação manual.

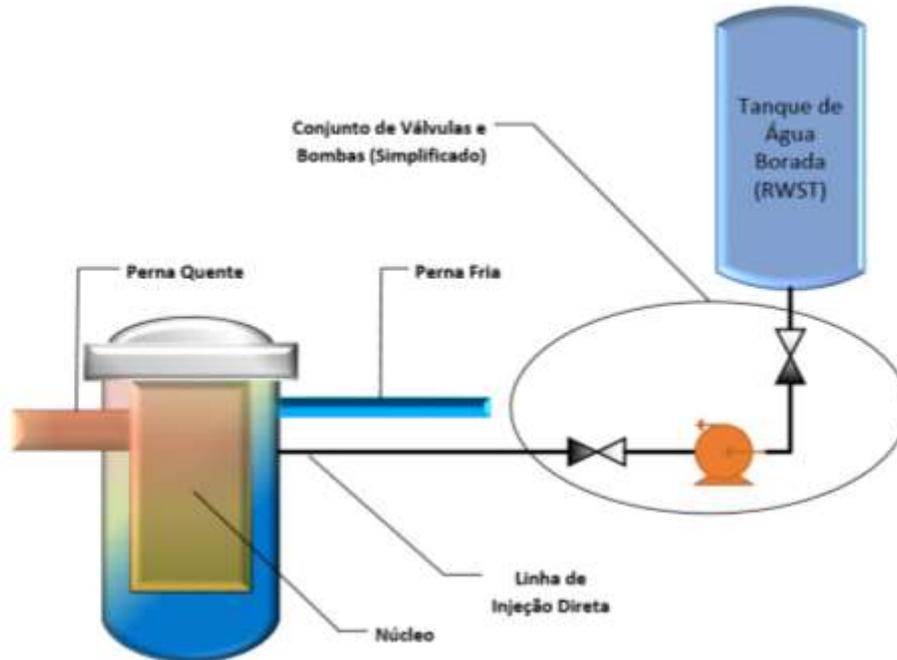


Figura 8: Esquema simplificado do sistema de injeção de segurança

3. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

O conceito de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) (KENNEDY E EBERHART., 1995), vem de 1995 quando Kennedy e Eberhart propuseram uma análise matemática e computacional do comportamento coletivo e social de cardumes de peixes e bandos de pássaros a partir da análise de estudos anteriores que conseguiam atribuir a estes animais um comportamento social ordenado e sincronizado, a partir de lógica e comunicação.

Esse comportamento pode ser analisado a partir de um cardume de peixes ou bando de pássaros em um movimento ordenado em busca de alimento ou em fuga de um predador, onde cada indivíduo irá se comportar a partir de princípios como: avaliação, comparação e imitação (KENNEDY *et al.*, 2001).

Este método de otimização visa unir estes comportamentos na forma de um algoritmo computacional evolutivo que utiliza a simulação deste meio social onde há um espaço de busca, partículas que compõem uma população, avaliação das posições através de uma função objetivo, e comparação entre o individual e o social para um melhor posicionamento no espaço de busca.

No PSO, a partícula está representada por um vetor posição e um vetor velocidade, a posição da partícula no espaço de busca é uma possível candidata à solução do problema. As partículas podem ser inicializadas no espaço de busca com posição aleatória ou previamente definida ou limitada, e com velocidade usualmente aleatória.

Cada partícula é avaliada por uma função objetivo (formulada com as características do problema a ser otimizado) e guarda sua melhor posição (P_{best}) já registrada, e a melhor posição do melhor indivíduo do grupo (G_{best}). Se, em uma dada interação t , uma nova posição se mostra melhor que o seu P_{best} , a partícula substitui seu P_{best} pelo encontrado na interação t , e caso este novo P_{best} se mostre melhor que o G_{best} , ele irá se tornar o novo G_{best} . Em cada interação todas as novas posições serão analisadas pela função objetivo, comparadas, registradas e substituídas, caso necessário.

O movimento da partícula é guiado por um vetor velocidade \mathbf{v}_i no espaço, e este vetor é calculado levando em consideração a velocidade anterior da partícula (\mathbf{v}_i^t), a melhor posição alcançada por ela (\mathbf{P}_{best}) e a melhor posição entre todas as partículas (\mathbf{G}_{best}) até esta geração. Sendo assim, o próximo passo da partícula é ajustado a cada interação (t), guiando-a, de sua posição atual (\mathbf{x}_i^t) em direção às melhores posições, individual (\mathbf{P}_{best}) e global (\mathbf{G}_{best}), conforme as Equações (18) e (19).

$$\mathbf{v}_{ij}^{t+1} = \omega \cdot \mathbf{v}_{ij}^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (\mathbf{P}_{best} - \mathbf{x}_{ij}^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (\mathbf{G}_{best} - \mathbf{x}_{ij}^t) \quad (18)$$

$$\mathbf{x}_{ij}^{t+1} = \mathbf{x}_{ij}^t + \mathbf{v}_{ij}^{t+1} \quad (19)$$

onde t representa cada interação e i representa cada partícula para as j dimensões.

Além destes fatores, o vetor velocidade traz parâmetros para garantir uma maior diversidade no espaço de busca e também uma maior exploração do espaço, evitando uma possível convergência prematura em um mínimo local. Um destes parâmetros é o fator de inércia (w) que controla o efeito que a velocidade da interação anterior irá ter para a velocidade. Um valor igual a 1 representa a aplicação de 100% da velocidade anterior, e igual a 0 representa a desconsideração da velocidade anterior. Pode-se dizer que w representa o tamanho do passo de exploração do espaço de busca, onde valores grandes de w proporcionam uma exploração menos refinada do espaço de busca, e valores pequenos uma exploração mais refinada e normalmente utilizam-se valores de w entre [0,4 e 0,9] (SHI AND EBERHART, 1999).

Outro fator de influência no próximo passo da partícula é o peso do comportamento, cognitivo e social, representado pelas constantes c_1 e c_2 , respectivamente, que irão representar o peso da correção das posições em direção a posição individual (\mathbf{P}_{best}) ou global (\mathbf{G}_{best}). Além disso, os valores aleatórios r_1 e r_2 , que são usualmente definidas no intervalo [0,1], são as variáveis aleatórias que trabalham na convergência do algoritmo, sendo aplicadas para garantir uma maior exploração do espaço e evitar a convergência prematura.

A Figura 9 representa a atualização da posição \mathbf{x}_i^t da partícula para a posição \mathbf{x}_i^{t+1} na próxima interação. Onde \mathbf{S}^t é o vetor soma das parcelas $c_1 \cdot (\mathbf{P}_{best} - \mathbf{x}_{ij}^t)$ e $c_2 \cdot (\mathbf{G}_{best} - \mathbf{x}_{ij}^t)$. Isto se dá conforme as Equações (18) e (19).

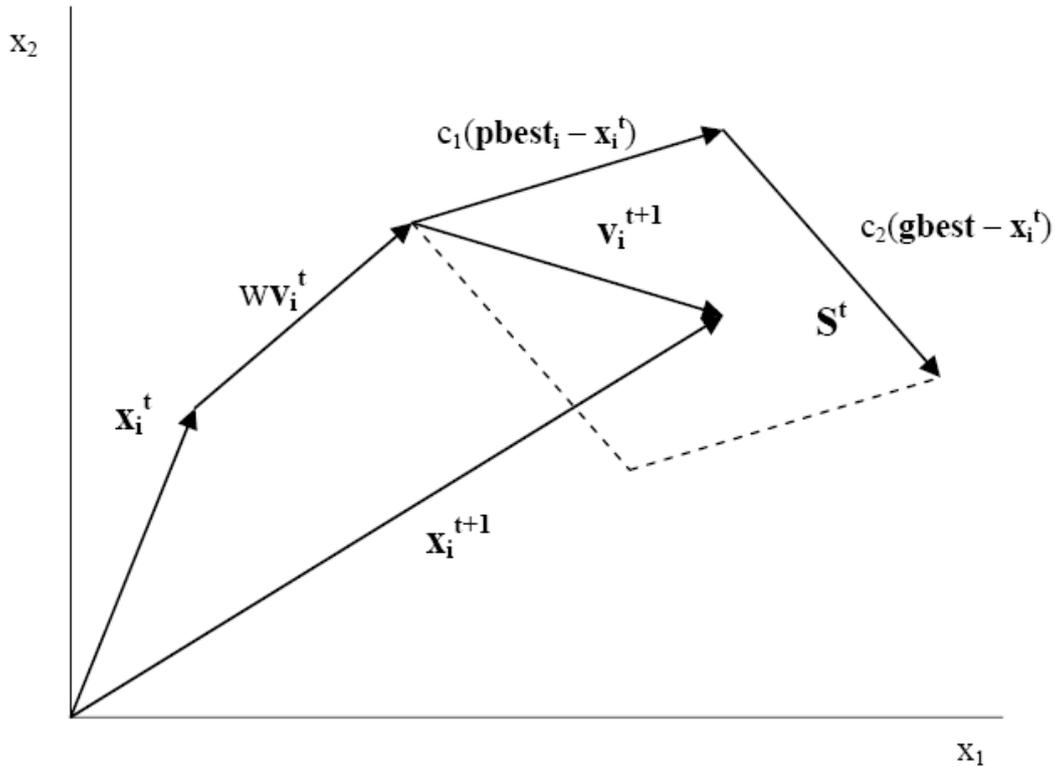


Figura 9. Atualização da posição da partícula no espaço (NICOLAU, 2010)

Essa atualização é repetida a cada interação para cada partícula, em todas dimensões. Além disso, a posição pode ser corrigida após a Equação (19), caso ultrapasse algum limite de contorno do espaço de busca $[L_{Min}, L_{Máx}]$.

Como a posição já apresenta uma candidata à solução do PSO, ela é avaliada pela Função Objetivo do PSO a cada interação, estabelecendo novos \mathbf{P}_{best} e \mathbf{G}_{best} , caso seja devido, e seguindo para a próxima interação, retornando às Equações (18) e (19), isto é representado pelo fluxograma de um PSO, mostrado na Figura 10.

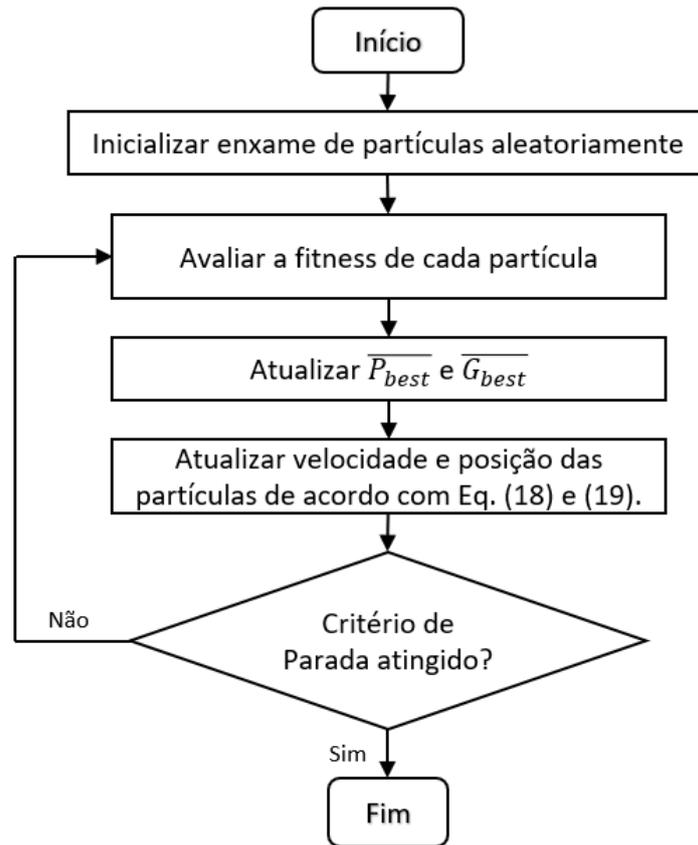


Figura 10. Fluxograma representativo de um PSO

Conforme observado no fluxograma, o PSO pode ser dividido em 2 etapas. A primeira, representa a inicialização com i partículas, onde i é a variável que assumirá valores de 1 a N , representando o número de partículas, com j dimensões, onde j é a variável que assumirá valores de 1 a D , representando o número de dimensões, para t interações, onde as partículas têm posições iniciais x_{ij} e velocidades v_{ij} aleatórias. Isto é analisado pela função objetivo f , onde, se $f(x_{ij})$ for menor que $f(\mathbf{Pbest})$, então \mathbf{Pbest} é substituída por x_{ij} . Em seguida, se $f(\mathbf{Pbest})$ for menor que $f(\mathbf{Gbest})$, então \mathbf{Gbest} é substituído por \mathbf{Pbest} , finalizando assim uma interação.

Com os valores de \mathbf{Pbest} e \mathbf{Gbest} , a partícula segue para atualização de posição, pelas Equações (18) e (19), e o PSO retorna para a etapa 1, e se repete até o critério de parada, que neste trabalho usou-se o número máximo de interações. Com o fim das interações, o valor encontrado para a melhor solução do PSO é o valor final do \mathbf{Gbest} .

3.1. APLICAÇÃO DO PSO EM FUNÇÕES DE TESTE

Antes do desenvolvimento do modelo de PSO para aplicação do HPSI, objetivo deste trabalho, foi desenvolvido um programa PSO, na linguagem de programação *python* (VAN ROSSUM, 1991), para aplicação em funções de testes, onde o código da programação é apresentado no APÊNDICE A.

As funções de teste (funções *benchmark*) selecionadas são problemas fundamentais de otimização, apresentados na forma de funções matemáticas, que podem ser otimizadas com uma série de parâmetros para definição de um conjunto de parâmetros adequados para alcançar a sua solução (HUSSAIN, et. al., 2017).

Estas funções são contínuas, com valor ótimo já conhecido, podendo ser mais simples, com um único máximo ou mínimo, com menos dimensões de busca, ou mais complexas, multimodais, de maior dimensionalidade e complexidade. Neste trabalho, foram utilizadas as Funções Esfera e Rastrigin, por serem as mais utilizadas na literatura (HUSSAIN, et. al., 2017).

3.1.1. FUNÇÃO ESFERA

A Função Esfera é uma função contínua e unimodal, considerada de fácil resolução, e com solução de mínimo igual a 0. Ela pode ser trabalhada com 3 a 256 dimensões (D) de análise.

A fórmula desta função e seu limite estão representados pela Equação (20), e seu formato é apresentado na Figura 11.

$$f(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2 \quad -100 \leq x_i \leq 100 \quad (20)$$

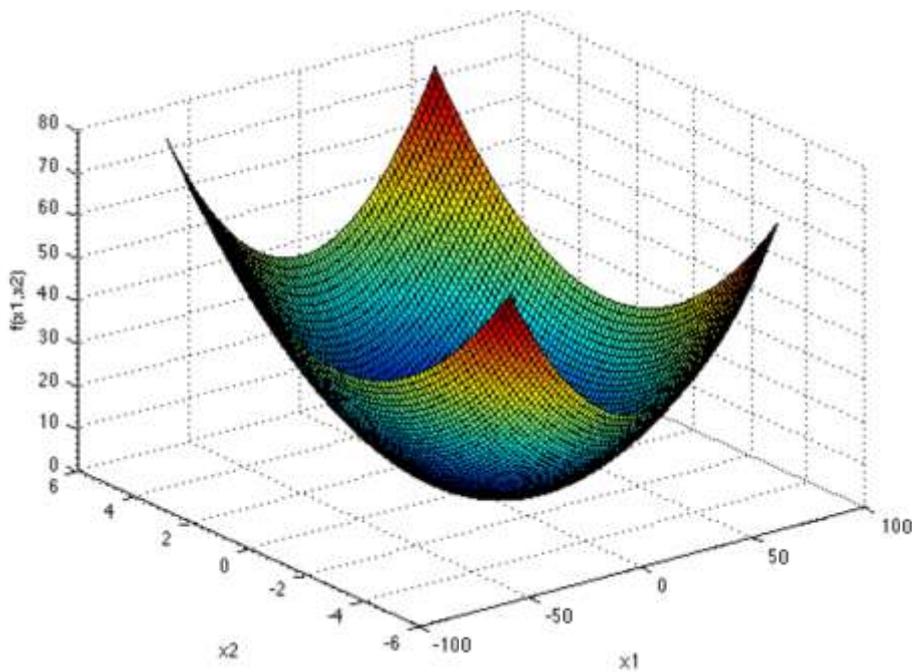


Figura 11. Função Esfera (SURJANOVIC, 2013)

3.1.2. FUNÇÃO RASTRIGIN

A Função Rastrigin é uma função multimodal e de grande complexidade de resolução, pois apresenta muitos mínimos locais, onde um algoritmo com baixa capacidade de exploração pode ficar preso em um mínimo local e não encontrar a solução global.

Esta função pode ser trabalhada de 2 a 100 dimensões (D), e tem mínimo global igual a 0. Sua fórmula está representada na Equação (21) e sua forma na Figura 12.

$$f(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10 \quad -5.12 \leq x_i \leq 5.12 \quad (21)$$

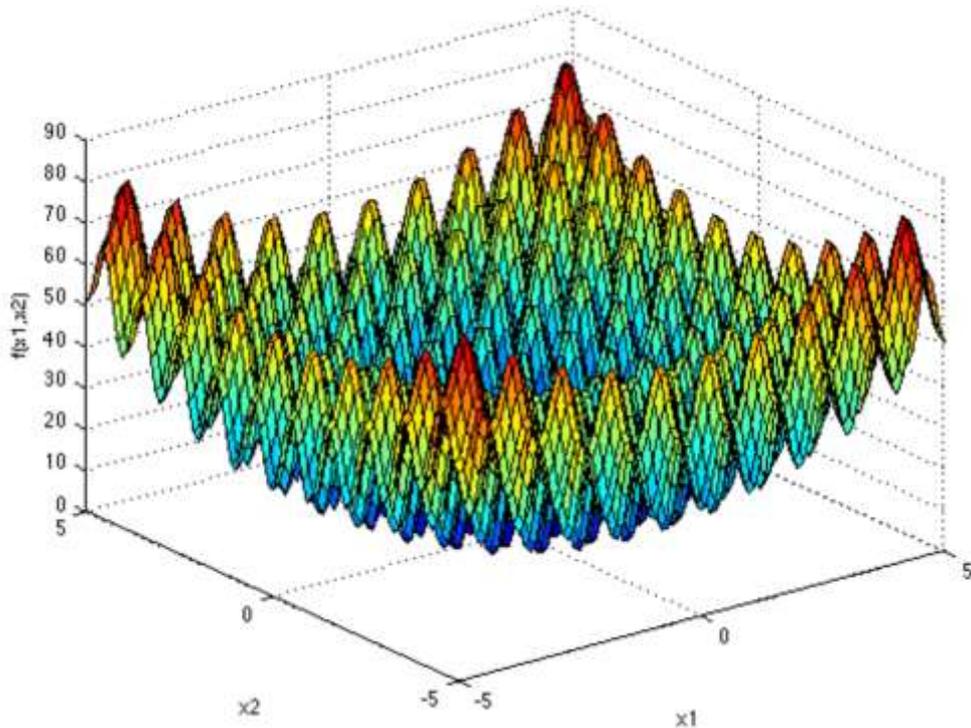


Figura 12. Função Rastrigin com $-5 \leq x \leq 5$ (SURJANOVIC, 2013)

3.1.3. RESULTADOS PRELIMINARES PARA FUNÇÕES DE TESTE

Com o intuito de analisar o comportamento do PSO e a influência dos seus principais parâmetros na otimização das funções benchmark selecionadas, diferentes testes foram realizados. O primeiro teste realizado teve como objetivo estudar a sensibilidade do tamanho da população do PSO na convergência do algoritmo. A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam os testes realizados para a função Esfera e Rastrigin, respectivamente.

Como parâmetros inicialmente utilizados no PSO, teve-se, $w = 0,729$ como fator de inércia, $c_1 = 1,3$ e $c_2 = 2,7$ como comportamento cognitivo e social, respectivamente.

Tabela 1. Estudo de Populações do PSO para a Função Esfera

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>	<i>Tempo(s)</i>
10			$7,6420 \times 10^{-5}$	$4,9729 \times 10^{-2}$	256
20			$8,5845 \times 10^{-5}$	$8,1166 \times 10^{-3}$	462
40	10	1000	$1,0392 \times 10^{-5}$	$1,9621 \times 10^{-3}$	950
80			$1,3951 \times 10^{-6}$	$2,3515 \times 10^{-4}$	2098
100			$9,3023 \times 10^{-7}$	$1,3338 \times 10^{-4}$	2562

Tabela 2. Estudo de Populações do PSO para a Função Rastrigin

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>	<i>Tempo(s)</i>
10			5,4916	19,0164	625
20			3,0499	14,0669	1702
40	10	1000	2,1114	9,6827	3035
80			2,0014	7,5756	4660
100			2,0315	6,9882	6024

Analisando os resultados apresentados, pode-se perceber o quanto o PSO é sensível ao parâmetro tamanho da população, pois, uma menor quantidade de partículas proporciona uma menor exploração do espaço de busca, enquanto percebe-se que para a maior quantidade, o resultado da busca do mínimo é mais efetivo, como se pode observar, uma redução na média da ordem de 10^{-2} , se comparada entre 10 e 80 partículas.

O segundo teste realizado teve como objetivo estudar a sensibilidade do PSO frente à dimensão do problema. A Tabela 3 e Tabela 4, apresentam os testes realizados para a função Esfera e Rastrigin, respectivamente.

Tabela 3. Estudo de Dimensões do PSO para a Função Esfera

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>
100	3	1000	$9,8249 \times 10^{-33}$	$2,4046 \times 10^{-25}$
	5		$9,2668 \times 10^{-20}$	$2,2379 \times 10^{-15}$
	10		$1,8097 \times 10^{-6}$	$1,6242 \times 10^{-4}$
	20		1,1795	13,1402
	30		44,4967	256,2108

Tabela 4. Estudo de Dimensões do PSO para a Função Rastrigin

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>
100	3	1000	0,0	0,0
	5		$5,3290 \times 10^{-15}$	$9,6600 \times 10^{-7}$
	10		0,1940	6,9015
	20		45,8094	102,7105
	30		219,4709	310,5768

Observando a variação de dimensões, em ambas as funções, das Tabelas 3 e 4 pode-se perceber que com mais dimensões de busca por cada partícula, o resultado das funções alcança valores mais altos. Observa-se em ambas as funções que o aumento do teste com 5 dimensões para 10 dimensões representa um aumento significativo dos resultados, da grandeza de 10^{15} , mostrando o quanto o acréscimo de dimensões de busca pode distanciar os resultados alcançados do ótimo da função.

O terceiro teste realizado teve como objetivo estudar a convergência do PSO frente ao número de interações para cada uma das funções. A Tabela 5 e Tabela 6, apresentam os testes realizados para a função Esfera e Rastrigin, respectivamente.

Tabela 5. Estudo de Iterações do PSO para a Função Esfera

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>	<i>Tempo(s)</i>
100	10	200	0,2057	3,0390	826
		500	0,0021	0,0402	1877
		1000	$1,8576 \times 10^{-7}$	$1,4810 \times 10^{-5}$	2181
		2500	$4,6801 \times 10^{-15}$	$7,0976 \times 10^{-11}$	5483
		5000	$7,5194 \times 10^{-24}$	$3,4505 \times 10^{-19}$	10923

Tabela 6. Estudo de Iterações do PSO para a Função Rastrigin

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média</i>	<i>Tempo(s)</i>
100	10	200	14,7183	31,5778	1046
		500	4,2433	14,9823	2573
		1000	0,2187	7,2476	5214
		2500	$4,8520 \times 10^{-6}$	1,2120	16167
		5000	$3,0198 \times 10^{-14}$	$2,2656 \times 10^{-2}$	26110

Com a variação de iterações observada nas tabelas 5 e 6, pode-se perceber que os resultados tendem a se aproximar do ótimo em ambas as funções, especialmente na função Esfera, que apresenta um progressivo aumento após a iteração 500, o que ocorre pois com mais interações a partícula poderá ter mais possibilidades de explorar o espaço de busca e caso esteja presa em um ótimo local, poderá ter a possibilidade de sair deste ótimo local.

Os gráficos de convergência do PSO para as funções Esfera e Rastrigin são apresentados nas Figura 13 e Figura 14:

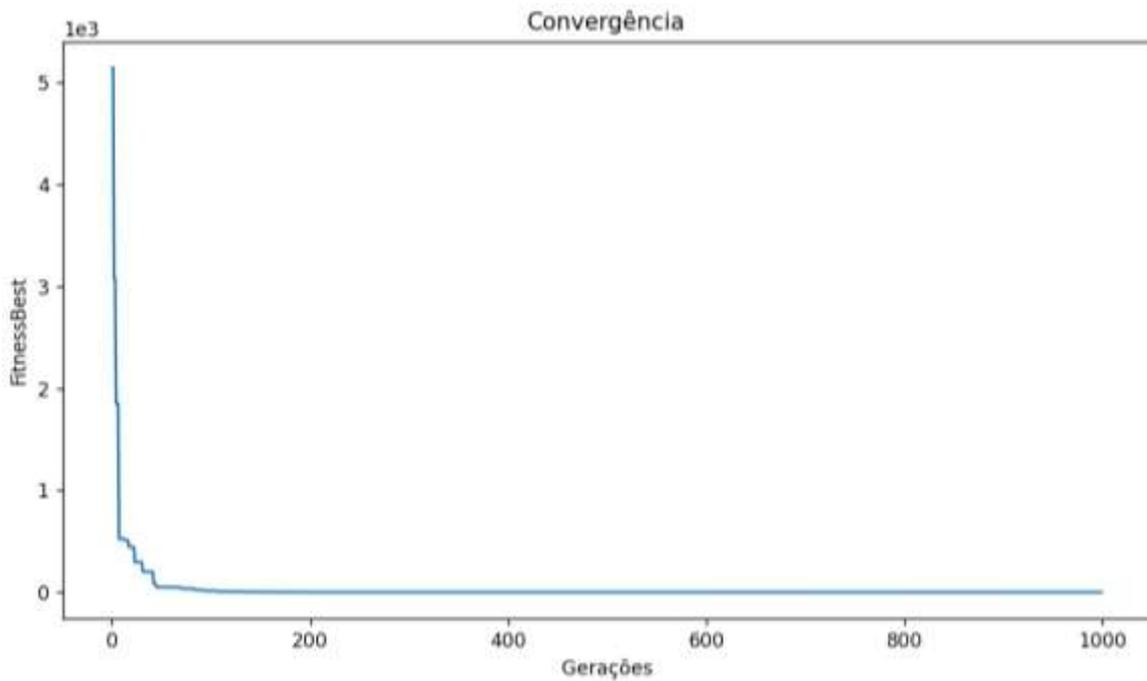


Figura 13. Gráfico de convergência do PSO para função Esfera com 100 partículas, 10 dimensões e 1000 iterações

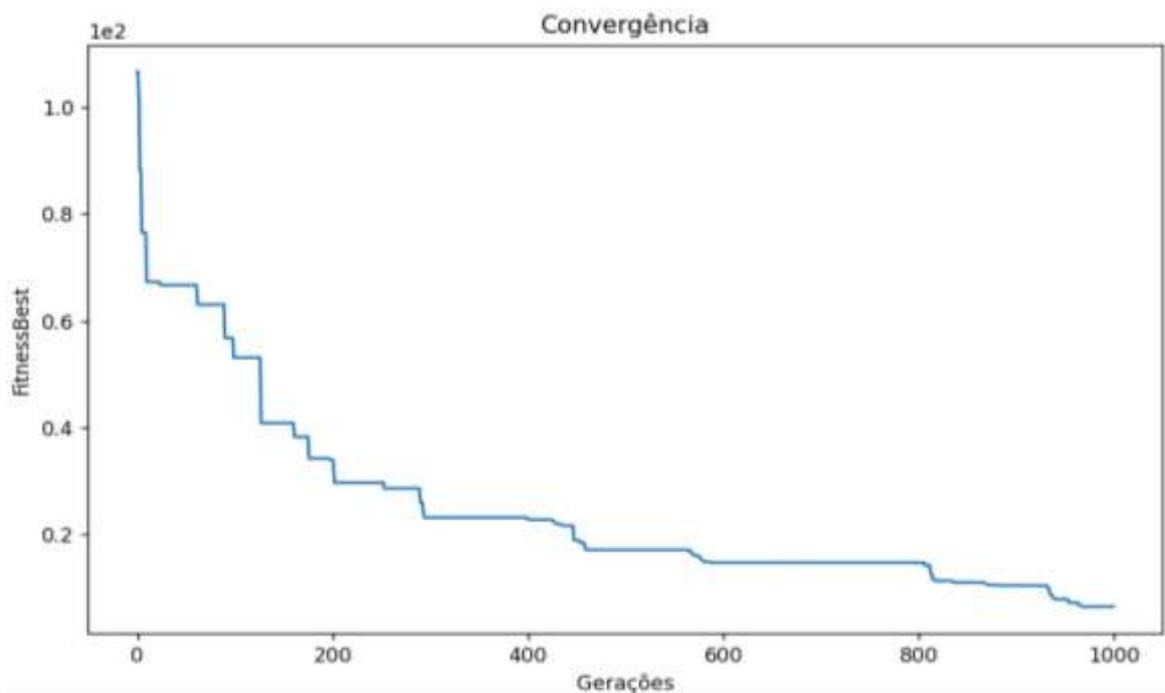


Figura 14. Gráfico de convergência do PSO para função Rastrigin com 100 partículas, 10 dimensões e 1000 iterações

Como se pode observar nos gráficos, ambas as funções apresentam significativa convergência com a utilização de 1000 iterações, especialmente a função Esfera, onde a convergência antes de 100 iterações. Isto pode facilmente ser explicado devido à natureza da função, visto que a função Esfera é unimodal, portanto, não há ótimos locais para convergência de partículas.

Todas as rodadas anteriores do PSO para todos os parâmetros foram feitas 100 vezes para garantir uma maior variabilidade de resultados e alcançar uma média mais confiável, porém, pode-se analisar na Tabela 7 a influência da quantidade de testes nos melhores resultados e na média das soluções. Visto isso, os resultados com 100 testes foram semelhantes em ordem de grandeza (10^{-7}) com a realização de 1000 testes, e na média, os resultados se mostraram melhores que com mais testes, porém, num tempo aceitável.

Tabela 7. Estudo da variação de Loops do PSO para Função Esfera

<i>População</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Iterações</i>	<i>Testes</i>	<i>Melhor Resultado</i>	<i>Média (x 10⁻⁴)</i>	<i>Tempo(s)</i>
			50	$1,2677 \times 10^{-6}$	1,4903	1093
			100	$2,9643 \times 10^{-7}$	1,6709	2167
100	10	1000	200	$6,4506 \times 10^{-7}$	1,9987	4433
			500	$4,7453 \times 10^{-8}$	1,7537	11855
			1000	$3,4552 \times 10^{-7}$	1,7001	22635

4. METOLOGIA PROPOSTA

O modelo de PSO desenvolvido e testado nas funções de teste foi adaptado para aplicação em um modelo simplificado de HPSI, similar ao de uma usina PWR, que vem sendo utilizado na literatura desde 1996 (HARUNUZZAMAN E ALDEMIR, 1996, MARTORELL et.al., 2000 e 2002, WANG et.al., 2020).

Inicialmente, o trabalho concentrou-se em estudar o modelo simplificado de HPSI, principalmente no que se refere às suas restrições e modos de falha do sistema, de modo a obter as características necessárias para o desenvolvimento das funções objetivo que seriam usadas para otimização dos valores de indisponibilidade e custo.

Com as funções objetivo definidas, o passo posterior foi adaptar o PSO desenvolvido para as funções de teste para a solução do HPSI. O modelo de PSO desenvolvido para o HPSI será aqui chamado de PSO-HPSI. O PSO-HPSI teve como objetivo a otimização de valores de TIs para os componentes (válvula e bombas) do HPSI, que, quando aplicados à função de indisponibilidade (Equação (23)) e na função de custo (Equação (28)), forneça a menor indisponibilidade dos componentes, associada a um menor custo de manutenção.

4.1. MODELO SIMPLIFICADO DO SISTEMA HPSI

O modelo HPSI, aqui considerado, consiste de 3 Bombas e 7 Válvulas; este sistema fica em reserva, e durante a operação normal do reator, uma bomba de carregamento do HPSI retira água do Tanque de Controle de Volume, do inglês, *Volume Control Tank*, (VCT) e fornece vazão de refrigeração para manter os níveis de água no Sistema de Resfriamento do Reator, do inglês, *Reactor Cooling System*, (RCS) e um pequeno fluxo de água de alta pressão às vedações das bombas RCS.

Após um LOCA, o HPSI fornece água em alta pressão para o RCS. Nesta situação, o HPSI extrai água do Tanque de Armazenamento de Água de Reabastecimento (RWST), que é injetado com ácido bórico do Tanque de Injeção de Boro, do inglês, *Boron Injection Tank*, (BIT), e descarrega para a perna fria do RCS. Normalmente a injeção é feita pelas válvulas 1 e 2, e a válvula 4 na Figura 15 entre a bomba A e a bomba B fornece um caminho de fluxo alternativo, caso ocorra falha no caminho normal.

No caso de ocorrência do LOCA, o fluido sai do RWST passando pelos caminhos de injeção 1 e 2, sendo eles, V1-PA-V3 e V2-PB-V5, respectivamente. Dessa forma, a Bomba PB e as Válvulas V4, V6 e V7 garantem fluxo alternativo em caso de falha dos caminhos normais.

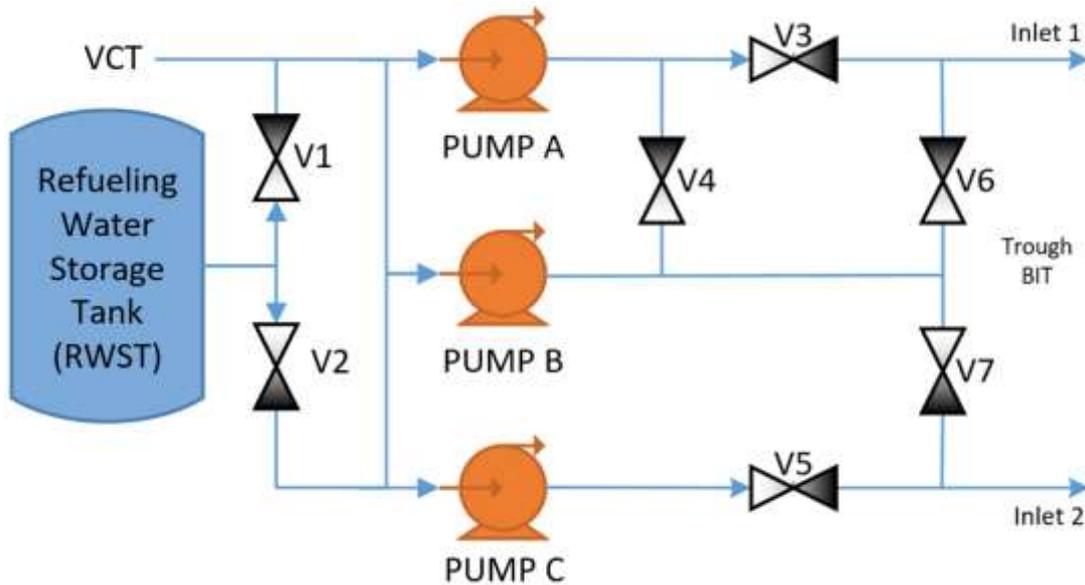


Figura 15. HPSI simplificado (adaptado de HARUNUZZAMAN E ALDEMIR, 1996)

A partir da Figura 15, podem-se relacionar os caminhos possíveis para o fluxo do tanque ao reator. Neste trabalho, para análise da indisponibilidade do sistema, foi utilizado o método de MCS.

Para análise dos MCS, foi utilizado o software “*BlockSim 2022*”, da empresa “*Reliasoft*” (reliasoft.com), que possibilitou encontrar os cortes mínimos necessários que levam à indisponibilidade do sistema. Estes MCS estão representados na Tabela 8.

Tabela 8: Cortes Mínimos do HPSI simplificado

<i>Cut Set</i>	<i>Nº de Equipamentos</i>	<i>Bombas</i>	<i>Válvulas</i>
1	2	-	V1 - V2
2	3	PA - PB	V5
3	3	PA - PB - PC	-
4	4	PB	V3 - V4 - V5
5	4	PB - PC	V3 - V4
6	4	-	V3 - V5 - V6 - V7
7	4	PC	V3 - V6 - V7
8	5	PA	V4 - V5 - V6 - V7
9	5	PA - PC	V4 - V6 - V7

Cada um dos 9 conjuntos de corte representa uma série de eventos básicos, representados pelo número de equipamentos, cuja falha independente combinada pode causar a indisponibilidade do sistema.

4.1.1. ESPECIFICIDADES DO SISTEMA

A Tabela 9 apresenta os TIs, e TPs permitidos durante uma manutenção para os componentes do HPSI. Cabe-se ressaltar que o tempo médio de teste de uma bomba é de 4h e de válvula é 0,75h.

Tabela 9. TIs e TPs de componentes do HPSI (MARTORELL et. al., 2002)

	<i>Bombas (P)</i>	<i>Válvulas (V)</i>
TIs (h)	2184	2184
TP (h)	72	8

Os procedimentos de manutenção do modelo HPSI também estão restritos por um conjunto de requisitos dados pelas especificações técnicas. De acordo com HARUNUZZAMAN E ALDEMIR (1996) é necessário que pelo menos duas bombas do HPSI estejam operacionais quando o reator estiver crítico, e que os dois trens de fluxo do RWST e do RCS estejam operáveis na atuação do HPSI em níveis de potência de 60% da potência total. Além disso, as bombas restantes e as válvulas 6 e 7 devem estar operáveis quando o reator estiver acima de 60% da potência total. Teste ou manutenção em qualquer componente é permitido desde que a operacionalidade do componente redundante no outro trem seja demonstrada.

Além disso, os requisitos operacionais especificados pelas TSs para o modelo HPSI considerado, especificam que pelo menos um dos trens de fluxo da Figura 15 permaneça em *stand by* e em prontidão de operação durante a manutenção. No entanto, os componentes em pelo menos um dos caminhos de fluxos alternativos não devem ser parados para manutenção. Dessa forma, assim como em MARTORELL et. al., (2002), os componentes foram agrupados em três diferentes estratégias de teste:

1. A Estratégia 1 se aplica às válvulas que fornecem água do RWST para a linha de sucção das três bombas, ou seja, V1 e V2.
2. A Estratégia 2 envolve todas as três bombas, PA, PB e PC, e as válvulas localizadas junto às descargas das bombas PA e PC, ou seja, V3 e V5.
3. Finalmente, as válvulas crossover V4, V6 e V7 estão incluídas na terceira estratégia.

De acordo com a estratégia 1 - as válvulas 1 e 2 são o primeiro nível do sistema, onde uma falha em uma delas já compromete 50% do caminho de saída do RWST, e uma falha das duas indisponibiliza totalmente o HPSI. Assim, elas são colocadas como as mais importantes da estratégia de prioridade.

Por outro lado, as bombas A, B e C, e as válvulas 3 e 5 são a segunda linha de prioridade, e as válvulas 4, 6 e 7 consideradas de menor prioridade, pois são de backup, então só serão necessitadas em caso de falha das anteriores.

Sendo assim, com as restrições impostas, tem-se que todos os componentes em um mesmo grupo adotarão o mesmo intervalo de teste após a otimização, embora isso não signifique necessariamente que todos eles são testados simultaneamente. A Tabela 10 apresenta os TIs relacionados com as restrições impostas pelas estratégias de teste.

Tabela 10: Restrições para Intervalo de Testes

<i>TIs</i>	<i>Válvulas</i>	<i>Bombas</i>	<i>Relação</i>	<i>Intervalo Permitido</i>
T1	V1, V2			$1 \text{ h} \leq T^1 \leq 8760 \text{ h}$
T2	V3, V5	PA, PB, PC	$T^2 = k_2 \cdot T^1$	$1 \leq k_2 \leq 10$
T3	V4, V6, V7		$T^3 = k_3 \cdot T^2$	$1 \leq k_3 \leq 10$

A relação de T, demonstrada pelos parâmetros k_1 e k_2 , representa esta relação de prioridade entre os equipamentos, o que reflete em um menor intervalo de testes dos equipamentos prioritários e um tempo k vezes maior que os demais.

Para este estudo, assim como em HARUNUZZAMAN E ALDEMIR (1996), outras restrições e condições foram assumidas, tais como:

- Pelo menos um dos caminhos de fluxo deve estar operante a todo momento;
- A falha da unidade (válvula ou bomba) só poderá ser revelada através de uma inspeção, e ou teste;
- Se uma inspeção ou teste revelar uma falha, o reparo total ou substituição da unidade é feito na manutenção;
- Cada componente (válvula e bomba) tem uma confiabilidade mínima que é equivalente aos TIs estabelecidos nas especificações técnicas;
- A confiabilidade total do sistema deve ser maior ou igual a um valor mínimo estabelecido;
- Caso um componente seja detectado inoperante durante um teste, a manutenção corretiva será realizada, e ele retornará à situação de operabilidade como novo;
- As ações de teste, inspeção, manutenção, reparo e troca são instantâneos.

4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Em usinas nucleares, é de interesse de sua gestão que o a indisponibilidade de sistemas seja minimizada, tal como o custo de manutenção. Em algumas situações é de maior interesse que se minimize o risco, e em outras situações é de interesse que se minimize os custos de manutenção, desde que a indisponibilidade ainda esteja dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores (WANG et al., 2020).

De acordo com Aldemir HARUNUZZAMAN E ALDEMIR (1996) e com o exposto na seção 4.1.1, o modelo de HPSI possui 3 características principais:

- a) existem TIs mínimos obrigatórios;
- b) existem restrições e procedimentos de manutenção;
- c) existe restrição de custo, ou seja, é mais barato manter dois componentes ao mesmo tempo do que em momentos diferentes.

A primeira característica apresenta restrições de confiabilidade que são não lineares no tempo, e requer um intervalo de tempo mínimo. A segunda característica implica na exclusão de certos componentes do sistema do processo de manutenção. A terceira característica requer que o programa de manutenção respeite os tempos de manutenção de cada componente, e a combinação ideal dos componentes, levando em consideração restrições de custo.

Dessa forma, o problema em questão se caracteriza como um problema de otimização, onde se manifesta o interesse de minimizar indisponibilidade e custo, e para a modelagem do problema utilizando o PSO consideraram-se os cálculos das funções de indisponibilidade e custo do HPSI, tais como as Equações (23) e (28).

4.2.1. FUNÇÃO DE INDISPONIBILIDADE

A indisponibilidade de um sistema pode ser adequadamente representada pela aproximação da combinação de indisponibilidades que podem levar a uma falha no sistema. Por sua vez, essa combinação pode ser representada pelos MCS do sistema, tais como os apresentados na Tabela 8. Dessa forma, a indisponibilidade total do sistema será calculada de acordo com a Equação (22):

$$U(x) = \sum_g \prod_p u_{gp}(x) \quad (22)$$

onde, g é o número de MCS resultantes da redução da estrutura do sistema e p é o número de eventos básicos relevantes em cada um dos MCS. Sendo assim, $u_{gp}(x)$ representa a indisponibilidade associada ao evento básico p no MCS g , e x é o vetor de variáveis de decisão que influenciam as funções de indisponibilidade analisadas.

Neste trabalho a função de indisponibilidade do sistema $[U(x)]$ é dada pela Equação (22), diferente da Equação (15), ou seja, sem considerar a indisponibilidade devido a manutenções preventivas, já que os parâmetros analisados neste trabalho, de forma a comparar com a literatura (MARTORELL, et. al., 2002), serão as indisponibilidades relacionadas a falhas aleatórias, procedimentos de teste e manutenções corretivas, como mostrado na Equação (23):

$$u(x) = u_r(x) + u_t(x) + u_c(x) \quad (23)$$

onde, $u_r(x)$ é dado de acordo com a Equação (6), $u_t(x)$ é dado de acordo com a Equação (7) e $u_c(x)$ é dado de acordo com a Equação (9).

Considerando a função de indisponibilidade para o caso específico deste trabalho, e os MCS, apresentados na Tabela 8, tem-se a Equação (24), que será utilizada no modelo de PSO-HPSI desenvolvido.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(\mathbf{x}) \approx & u(V1).u(V2) + u(V5).u(PA).u(PB) + u(PA).u(PB).u(PC) \\ & + u(V3).u(V4).u(V5).u(PB) + u(V3).u(V4).u(PB).u(PC) \\ & + u(V3).u(V5).u(V6).u(V7) + u(V3).u(PC).u(V6).u(V7) \\ & + u(V4).u(V5).u(V6).u(V7).u(PA) \\ & + u(V4).u(V6).u(V7).u(PA).u(PC) \end{aligned} \quad (24)$$

onde, $u(V1)$, $u(V2)$, $u(V3)$, $u(V4)$, $u(V5)$, $u(V6)$ e $u(V7)$ representam a indisponibilidade das válvulas, e $u(PA)$, $u(PB)$ e $u(PC)$ representam a indisponibilidade das bombas.

4.2.2. FUNÇÃO DE CUSTO

Para o cálculo da função de custo para o modelo de HPSI selecionado, levaram-se em consideração os custos anuais de testes e manutenção corretiva, de forma a comparar com a literatura (MARTORELL, el. al., 2002), de acordo com as Equações (25) e (26):

$$c_t(x) = \frac{t}{T} \cdot c_{ht} \quad (25)$$

$$c_c(x) = f_c(x) \cdot d(x) \cdot c_{hc} \quad (26)$$

onde, $c_t(x)$ representa a contribuição anual devido ao número de testes realizados, $c_c(x)$ é a contribuição anual dos custos relacionados a manutenções corretivas. Por fim, c_{ht} e c_{hc} são parâmetros constantes que representam custos horários associados a testes e manutenção corretiva, respectivamente.

A função custo total $C(x)$ será calculada a partir do somatório dos custos de cada componente do sistema, conforme a Equação (27):

$$C(x) = \sum_p c_p(x) \quad (27)$$

onde, p representa o número de componentes do sistema e varia de 1 até S , onde S é o número total de componentes do sistema e $c_p(x)$ o custo relacionado a cada componente submetido a testes e manutenções.

$c_p(x)$ para cada equipamento será calculado sem considerar o custo relacionado com manutenções preventivas, já que os parâmetros analisados neste trabalho irão considerar custos relacionados a testes e manutenções corretiva, como mostrado na Equação (28):

$$c(x) = c_t(x) + c_c(x) \quad (28)$$

Considerando a função custo (28) e os componentes analisados, a função de custo utilizada no modelo PSO-HPSI será demonstrada na Equação (29).

$$\begin{aligned} C(x) = & c(V1) + c(V2) + c(V3) + c(V4) + c(V5) \\ & + c(V6) + c(V7) + c(PA) + c(PB) \\ & + c(PC) + 3c(PA) + c_c(V3) + c_c(V5) \end{aligned} \quad (29)$$

onde, $c(V1)$, $c(V2)$, $c(V3)$, $c(V4)$, $c(V5)$, $c(V6)$, $c(V7)$, representam os custos relacionados às válvulas, e $c(PA)$, $c(PB)$ e $c(PC)$ os custos relacionados às bombas.

Como visto nas Equações (25) e (26), c_{ht} e c_{hc} representam custos horários, enquanto, $c_t(x)$ e $c_c(x)$ representam custo anual, sendo assim, seus resultados devem ser multiplicados por 4×2184 , sendo 2184 devido às horas em um trimestre, e 4 devido aos 4 trimestres do ano. Após isto, podem ser aplicados na Equação (28).

Na Equação (29) foi considerado que, em um período de um ano e respeitando os TIs e TP das especificações técnicas para os componentes analisados (válvulas e bombas) e as três estratégias de teste, tem-se que os custos envolvidos estão relacionados com os custos totais de teste e manutenção de todos os componentes, acrescidos dos custos de manutenção e teste das 3 bombas e os custos de manutenção das válvulas 3 e 5. Ou seja, os valores de manutenção corretiva para as válvulas V3 e V5 aparecem na equação mais de uma vez, pois dentro da estratégia de resolução do problema, quando a linha das bombas PA ou PC entram em manutenção, automaticamente as válvulas de saída destas bombas ficam indisponíveis, então elas sofrem manutenção corretiva. Além disso, o valor de $c(\text{PA})$ aparece na Equação (29) com uma multiplicação por 3, pois o valor de manutenção é o mesmo para todas as bombas, e quando uma linha de escoamento é parada para manutenção da válvula referente a ela, a bomba sofre manutenção corretiva durante este tempo, de maneira a garantir a sua confiabilidade.

A Tabela 11, apresenta os valores dos parâmetros fixos utilizados para cálculo de indisponibilidade e custo, usados nas Equações (23) e (28) do modelo simplificado de HPSI, que serão usados pelo PSO-HPSI.

Tabela 11. Parâmetros fixos utilizados (MARTORELL et. al., 2000)

<i>Equipamento</i>	λ_0 ($10^{-6}/h$)	ρ (10^{-3})	t (h)	μ (h)	c_{ht} (\$/h)	c_{hc} (\$/h)
Válvulas (V)	5,83	1,82	0,75	2,6	20	20
Bombas (P)	3,89	0,53	4	24	20	20

4.3. FUNÇÃO FITNESS

Com base nos dados, nas funções de custo e de indisponibilidade, e as restrições impostas, os parâmetros que serão otimizados neste trabalho pelo PSO-HPSI, são:

$$\bar{x} = [T1 , k_2 , k_3]$$

Dessa forma, cada partícula do PSO, é um vetor de 3 dimensões que carrega valores de T^1 , k_2 , k_3 que, aplicados nas equações de indisponibilidade e custo e analisados nas funções objetivos, são possíveis candidatas a solução do problema.

Para o desenvolvimento do modelo PSO-HPSI foram desenvolvidas três funções objetivo; duas delas tiveram como objetivo encontrar o menor valor de custo com menor indisponibilidade e a outra minimizar a indisponibilidade com o valor de custo fixo.

A primeira função objetivo (*fitness 1*) foi definida como a Equação (30), onde multiplicou-se o resultado da indisponibilidade pelo resultado do custo, de maneira a encontrar um valor de fitness mínima, ou seja, menores valores para indisponibilidade e custo.

$$fitness\ 1 = \mathbf{U}(\mathbf{x}) * \mathbf{C}(\mathbf{x}) \quad (30)$$

A segunda função objetivo (*fitness 2*) desenvolvida teve o mesmo objetivo da primeira, como diferença se teve multiplicação a indisponibilidade por um fator 10^6 de modo a ter um balanço entre indisponibilidade e custo conforme Equação (31):

$$fitness\ 2 = (\mathbf{U}(\mathbf{x}) * 10^6) * \mathbf{C}(\mathbf{x}) \quad (31)$$

A terceira função objetivo (*fitness 3*) desenvolvida foi diferente das duas primeiras, onde usou-se uma restrição no valor da função de custo, em que uma solução do problema só seria válida caso tivesse seu valor de custo menor que o valor 1439,42, valor de referência da literatura (MARTORELL et. al., 2002), tal como a Equação (32).

$$\begin{aligned} & \text{if } \mathbf{C}(\mathbf{x}) > 1439,42 \\ & \quad \mathbf{fitness\ 3} = \mathbf{C}(\mathbf{x}) \\ & \text{then:} \\ & \quad \mathbf{fitness\ 3} = \mathbf{U}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (32)$$

As funções objetivo foram implantadas no PSO-HPSI e tiveram seus parâmetros analisados de modo a selecionar aquele que melhor otimizava o problema em questão, ou seja, aqueles que fornecesse o menor valor de fitness.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como base para a avaliação dos resultados encontrados com o modelo PSO-HPSI desenvolvido, apresentado no APÊNDICE B, usaram-se como referência os valores de indisponibilidade e custo da literatura (MARTORELL et. al., 2002), conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Valores iniciais de indisponibilidade e custo

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores Iniciais</i>	<i>Indisponibilidade U (x)</i>	<i>Custo C (x) (Restrição)</i>
$T^1 (h)$	2184		
k_2	1	$7,3834 \times 10^{-5}$	1439,4233
k_3	1		

De maneira a analisar o comportamento do PSO-HPSI, inicialmente realizou-se um estudo do tamanho da população e o número de iterações para a função objetivo fitness 1, apresentada na Equação (30), onde, usou-se nestes testes valores de $c_1 = 1,8$; $c_2 = 2,2$ e $w = 0,6$.

Tabela 13. Estudo de População e Iterações para PSO-HPSI

<i>População</i>	<i>Iterações</i>	<i>Indisponibilidade</i>	<i>Custo (\$)</i>	<i>Tempo(s)</i>
100	1000	$3,1853 \times 10^{-5}$	832,51	1267
100	2000	$3,1854 \times 10^{-5}$	832,33	2101
150	1000	$3,1850 \times 10^{-5}$	832,48	1592
150	2000	$3,1854 \times 10^{-5}$	832,37	3218
250	2500	$3,1849 \times 10^{-5}$	832,41	6690

Observa-se que a variação na população ou nas iterações não afeta de forma significativa os resultados de indisponibilidade e custo, que se mantêm na mesma ordem de grandeza e variando valores apenas na terceira casa decimal, independente da mudança dos parâmetros, portanto, optou-se por avaliar o comportamento do PSO-HPSI usando uma população de 100 e iterações de 1000.

Dessa forma, fixando o tamanho da população em 100 e o número de interações em 1000, foram realizados 100 testes para a análise de sensibilidade do modelo desenvolvido em relação ao valor do parâmetro fator de inércia (w). A Tabela 14 apresenta os resultados desses testes.

Tabela 14. Estudo do parâmetro fator de inércia – PSO-HPSI

<i>Fator de Inércia (w)</i>	<i>Indisponibilidade</i>	<i>Custo (\$)</i>	<i>Tempo(s)</i>
0,2	$3,1847 \times 10^{-5}$	832,44	1072
0,4	$3,1855 \times 10^{-5}$	832,05	1000
0,6	$3,1852 \times 10^{-5}$	832,38	1022
0,8	$3,1895 \times 10^{-5}$	832,63	1090
1,0	$3,1838 \times 10^{-5}$	832,95	1164

Observa-se que a variação no fator de inércia (w) não afeta os resultados significativamente, tanto indisponibilidade quanto custo se mantêm na mesma ordem de grandeza e variando valores apenas na terceira casa decimal. Levando isso em consideração, o valor selecionado para fator de inércia foi $w = 0,6$; pois é considerado um valor que não é muito alto de forma a levar o PSO-HPSI a uma convergência prematura e não é baixo de forma a atrasar a convergência do PSO-HPSI.

Dessa forma, fixando o tamanho da população em 100 e o número de iterações em 1000, e valor de $w = 0,6$, foram realizados 100 testes para análise de sensibilidade do modelo em relação aos parâmetros c_1 e c_2 . A Tabela 15 mostra a variação do peso nos comportamentos individual e social.

Tabela 15. Estudo da variação dos parâmetros c_1 e c_2 no PSO-HPSI

<i>Peso Individual (c_1)</i>	<i>Peso Social (c_2)</i>	<i>Indisponibilidade</i>	<i>Custo (\$)</i>	<i>Tempo(s)</i>
1,0	3,0	$3,1851 \times 10^{-5}$	832,58	1488
1,5	2,5	$3,1852 \times 10^{-5}$	832,54	1038
1,8	2,2	$3,1851 \times 10^{-5}$	832,58	1008
2,0	2,0	$3,1853 \times 10^{-5}$	832,53	1267
2,5	1,5	$3,1853 \times 10^{-5}$	832,53	3682

A partir da Tabela 15 observa-se que para diferentes valores de c_1 e c_2 , os valores de indisponibilidade diferem apenas na quarta casa decimal mantendo-se na ordem de grandeza, e para custo, a mudança nos valores ocorrem na segunda casa decimal. Dessa forma, optou-se por realizar as próximas etapas dos testes com os valores dos parâmetros c_1 e c_2 em 1,8 e 2,2, respectivamente, devido a um menor valor de indisponibilidade combinado com um menor tempo.

O modelo PSO-HPSI testado com as 3 funções objetivo, foi programado na linguagem de programação *Python* pelo programa *PyCharm*, foi rodado num computador *Intel Core i5-7300HQ* de 2,50 GHz com placa *NVIDIA GeForce GTX 1050*, e teve como base os parâmetros apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros utilizados no PSO-HPSI

<i>Partículas</i>	<i>Dimensões</i>	<i>Interações</i>	<i>w</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>Posição Inicial (x_0)</i>	<i>Velocidade Inicial (v_0)</i>
100	3	1000	0,6	1,8	2,2	Aleatória [Tabela 10]	Aleatória [0,1]

Além disso, foi feito um tratamento de bordas, onde, caso as partículas ultrapassem os limites, para T^1 ($1 \text{ h} \leq T^1 \leq 8760 \text{ h}$), para k_2 ($1 \leq k_2 \leq 10$) e para k_3 ($1 \leq k_3 \leq 10$), teriam sua posição corrigida de acordo com os limites especificados e com velocidade nula, conforme o código na Figura 16.

```

if x[i][j]>limsup[j]:
    x[i][j] = random.uniform(liminf[j],limsup[j])
    v[i][j] = 0.0

if x[i][j]<liminf[j]:
    x[i][j] = random.uniform(liminf[j],limsup[j])
    v[i][j] = 0.0

```

Figura 16. Código de correção de bordas do PSO-HPSI

Como mencionado anteriormente, as funções objetivo *fitness 1* e *fitness 2* tinham como objetivo otimizar os valores de indisponibilidade juntamente com o de custo, e a terceira função objetivo (*fitness 3*) tinha como objetivo otimizar a função indisponibilidade, respeitando o valor de restrição do custo. Para todas as funções objetivo foram realizados 100 testes; os melhores resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Melhores resultados encontrados com testes realizados com o PSO-HPSI

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores de Referência</i>	<i>fitness 1</i>	<i>fitness 2</i>	<i>fitness 3</i>
T^1 (h)	2184	790	790	532
k_2	1	7,58	7,58	5,44
k_3	1	10	10	10
$U(x)$	$7,3834 \times 10^{-5}$	$3,1853 \times 10^{-5}$	$3,1854 \times 10^{-5}$	$2,4146 \times 10^{-5}$
$C(x)$	1439,42	832,54	832,48	1438,99
<i>Tempo CPU (s)</i>		136	148	141

Observa-se que as *fitness* 1 e 2 apresentam resultados da ordem de 57% de redução na indisponibilidade, e ao mesmo tempo 43% de redução no custo, quando comparadas com os valores de referência (sem otimização), enquanto a *fitness* 3 reduz em cerca de 68% o valor da indisponibilidade enquanto mantém o custo equivalente ao valor inicial.

A partir destes resultados, podemos observar que as funções objetivo 1 e 2 se mostraram bem efetivas na otimização da indisponibilidade juntamente com o custo, com valores semelhantes. Já a *fitness* 3 apresentou menor valor de indisponibilidade do que as *fitness* 1 e 2, porém valor de custo maior que as demais, uma vez que esse foi fixado em um valor acima dos encontrados na otimização.

A Figura 17 e Figura 18 mostram a convergência do modelo desenvolvido utilizando as funções objetivo 1 e 2, onde se realizou a otimização de indisponibilidade e custo, e a Figura 19 apresenta a convergência utilizando a função objetivo 3, onde foi realizada a otimização somente da indisponibilidade, mantendo o custo fixo, como uma restrição. Observa-se nas figuras 18, 19, e 20 que o modelo desenvolvido converge para os melhores resultados já nas 100 primeiras iterações.

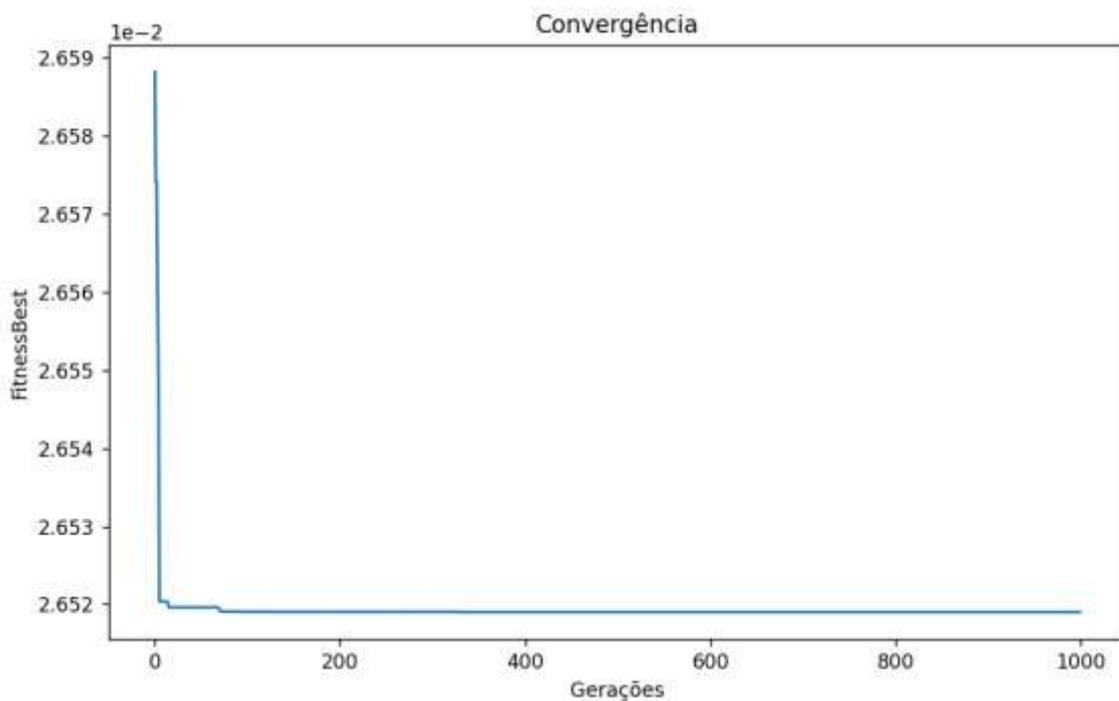


Figura 17. Convergência do PSO-HPSI com a *fitness* 1

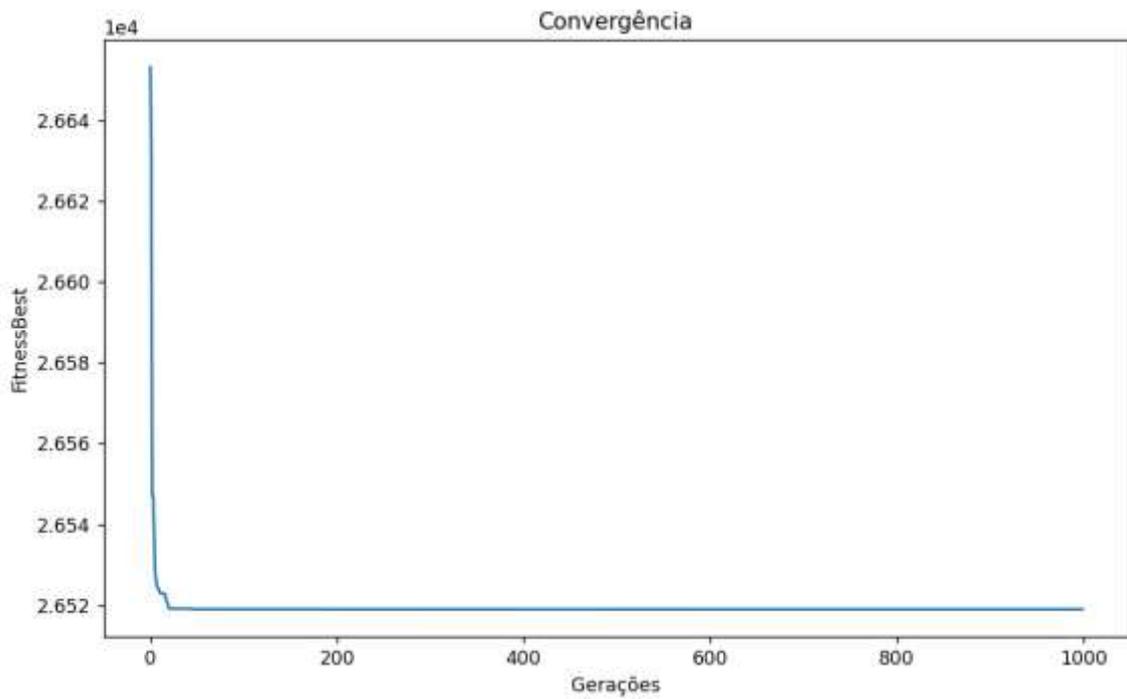


Figura 18. Convergência do PSO-HPSI com a *fitness 2*

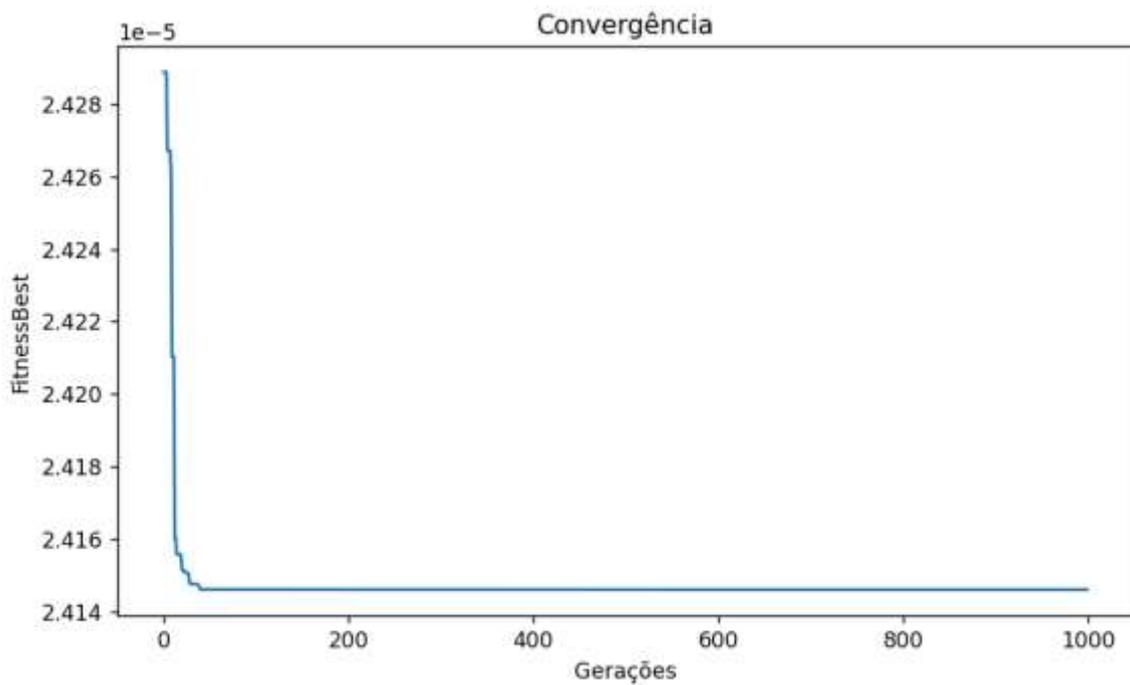


Figura 19. Convergência do PSO-HPSI com a *fitness 3*

5.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OS DA LITERATURA.

De modo a comparar o desempenho do método desenvolvido neste trabalho (PSO-HPSI), com outro método da literatura, utilizou-se o trabalho desenvolvido por MARTORELL et. al, (2000) que realizou a otimização dos parâmetros T^1 , k_2 e k_3 do mesmo modelo simplificado de HPIS analisado neste trabalho, porém foi utilizada a técnica de inteligência artificial algoritmo genético (GA), e uma *fitness* semelhante à *fitness* 3 deste trabalho. A Tabela 18 apresenta a comparação deste método com o resultado encontrado neste trabalho.

Tabela 18. Comparação da otimização por PSO com GA

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores de Referência</i>	<i>PSO-HPSI (fitness 3)</i>	<i>GA (MARTORELL et. al, 2000)</i>
T^1 (h)	2184	532	504
k_2	1	5,44	6
k_3	1	10	2
$U(x)$	7,3834 x 10 ⁻⁵	2,4146 x 10 ⁻⁵	2,5880 x 10 ⁻⁵
$C(x)$	1439,42	1438,99	1424,34
<i>Tempo CPU (s)</i>		141	263

A partir dos resultados apresentados na Tabela 18 pode-se observar que o modelo desenvolvido neste trabalho encontrou resultado semelhante ao da literatura para o valor de indisponibilidade e melhor para o custo. Além disso, os valores encontrados para os parâmetros T^1 e k_2 se mostram equivalentes entre os dois métodos, porém, o parâmetro k_3 apresenta grande diferença entre o PSO-HPSI e o GA. Esta diferença pode ser explicada considerando que os equipamentos que se encontram sob a influência deste parâmetro (válvulas V4, V6 e V7), possuem uma menor influência na indisponibilidade do sistema, considerando que são válvulas *backup*. Sendo assim, o parâmetro k_3 no PSO-HPSI apresenta TIs aceitáveis 5 vezes maiores se comparados com o método GA.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo, o desenvolvimento de um modelo de otimização baseado no PSO para otimizar os TIs dos componentes de um modelo simplificado de sistema HPSI de um reator PWR, utilizando funções de indisponibilidade (risco) e custo como critérios para a otimização.

Primeiramente, foi desenvolvido um modelo de otimização baseado no PSO para otimização de funções discretas e contínuas da literatura (funções *benchmark*), onde se mostrou sua efetividade, possibilitando também o estudo dos parâmetros do PSO, e o quanto a variação destes pode influenciar no comportamento do algoritmo.

Em seguida, o PSO foi adaptado e modelado para a otimização do modelo simplificado de HPSI, chamado de PSO-HPSI, onde foram desenvolvidas e testadas 3 funções objetivos com foco de otimização dos TIs dos componentes (válvulas e bombas) do modelo simplificado de HPSI. Duas das funções objetivo (*fitness 1* e *fitness 2*) tiveram o propósito de minimizar os valores de indisponibilidade do sistema juntamente com os valores de custo, e uma das funções (*fitness 3*) teve o objetivo de minimizar os valores de indisponibilidade do sistema, tendo como restrição o valor do custo de manutenção.

Os valores dos parâmetros T^1 , k_2 e k_3 , aplicados à função de indisponibilidade e custo e analisados nas *fitness 1* e *fitness 2*, o PSO-HPSI possibilitaram alcançar valores melhores que os valores sem o uso da otimização, com uma redução de 57% na indisponibilidade, e ao mesmo tempo 43% de redução no custo.

De maneira a comparar os resultados do PSO-HPSI com o da literatura (MARTORELL, et. al., 2000) baseado no GA, desenvolveu-se uma terceira função objetivo (*fitness 3*), onde se usou o valor do custo como restrição. O modelo PSO-HPSI encontrou resultado semelhante ao da literatura para a indisponibilidade e melhor para o custo.

Dessa forma pode-se dizer que a principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de um método eficaz de otimização integrado para estratégias de manutenção para sistemas de segurança em reserva para centrais nucleares, que apresenta um caminho promissor para aplicação em problemas desse tipo e até mesmo em problemas complexos reais.

Como uma extensão dos resultados deste trabalho, de forma a ampliar a utilização do método desenvolvido, como sugestões para trabalhos futuros, pode-se aplicar o PSO desenvolvido em um modelo real de HPSI, com estudo de falhas de causa comum em componentes idênticos.

Como forma de aprimorar o PSO desenvolvido, pode-se ampliar os estudos de sensibilidade dos parâmetros do PSO, assim como explorar outros tipos de tratamento de borda. Por fim, aplicação do modelo simplificado de HPSI pode ser aplicada em um modelo de PSO multiobjetivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BODANSKY D., 2004. *Nuclear energy. Principles, practices, and prospects*, 2 ed. Springer/ LLC, New York.

CARDOZO, F. H. P., 2019. *Simulação de Detectores de Radiação no Interior do Prédio da Contenção da Usina Nuclear Angra I*. Trabalho de Conclusão de Curso, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FOGLIATTO, F. S., RIBEIRO, J. L. D., 2011. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*, 1 ed. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil.

FRUTUOSO E MELO, P. F. F., 1981. *Análise da Confiabilidade dos Sistemas Ativos de Injeção de Segurança de Angra I*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FULLWOOD, R. R., 1988. *Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries*, 1 ed. Butterworth-Heinemann, Woburn, USA.

GARCÍA, A. C., PAPIC, L., 2015. *Reliability Modeling and Prediction*, 8 ed. The Research Center of Dependability and Quality Management, Prijedor, Serbia.

GJORGIEV, B., KANCEV, D., CEPIN, M., 2012. “Risk-informed Decision Making in the Nuclear Industry: Application and Effectiveness Comparison of Different Genetic Algorithm Techniques”. *Nucl. Eng. Des.* 250, 701–712.

HARUNUZZAMAN, M., ALDEMIR, T., 1996. “Optimization of standby safety system maintenance schedules in nuclear power plants”. *Nuclear Technology*, vol. 113:3 (Mar), pp 354-367.

HOFFMAN, D. R., DEMITRACK, T., SCHIELE, R., et. al., 2004. Improved Technical Specifications and Related Improvements to Safety in Commercial Nuclear Power Plants. *International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR*. 10 p. (Jul). Cancún, México

HUSSAIN, K., SALLEH, M., CHENG, S., et al., 2017. “Common Benchmark Functions for Metaheuristic Evaluation: A Review”. *International Journal on Informatics Visualization*, vol. 1 (Nov), nº 4-2.

IAEA, 2008. *Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants..* In: TECDOC-1590, ISBN 978-92-0-105008-3. ISSN 1011-4289.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, *Análise Probabilística de Segurança e Análise de Confiabilidade*. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=586&campo=684>. Acesso em: 12 abr. 2022, 8:02:00.

JONKMAN, S. N., STEEBBERGEN R. D. J. M., et al., 2015. *Probabilistic Design: Risk and Reliability Analysis in Civil Engineering*, 1 ed. Delft University of Technology, Delft, Países Baixos.

KANCEV, D., CEPIN, M., 2011. “The Price of Risk Reduction: Optimization of Test and Maintenance Integrating Risk and Cost”. *Nucl. Eng. Des.* 24, 1119–1125.

KHALAQUZZAMAN, M., KANG, H.G., KIM, M.C., et al., 2011. “Optimization of periodic testing frequency of a reactor protection system based on a risk-cost model and public risk perception”. *Nucl. Eng. Des.* 241 (5), 1538–1547.

KENNEDY, J., EBERHART, R. C., 1995. “Particle swarm optimization”. In: *IEEE international conference on neural networks*. v. IV, pp. 1942-1948. IEEE service center, Piscataway, NJ, EUA.

KENNEDY, J., EBERHART, R. C., Shi Y., 2001, *Swarm Intelligente*. Morgan Kaufmann Publishers. Inc, San Francisco, CA, EUA.

KIM, I. S., SAMANTA, P. K., MARTORELL, S., et al., 1992 "Quantitative evaluation of surveillance test intervals including test-caused risks," Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, U.S., 1992, Div. of Systems Research, Brookhaven National Lab., Upton, NY, U.S.

LEWIS, E. E., 1977. *Nuclear Power Reactor Safety*. 1 ed. John Wiley & Sons, The Technological Institute Northwestern University, Chicago, USA.

MARTORELL, S., SÁNCHEZ, A., CARLOS, S., et al., 2000. “Constrained Optimization of Test Intervals Using a Steady-State Genetic Algorithm”. *Reliability Engineering and System Safety* 67, pp.215-232.

MARTORELL, S., SÁNCHEZ, A., CARLOS, S., et al., 2002. “Simultaneous and multi-criteria optimization of TS requirements and maintenance at NPPs”. *Annals of Nuclear Energy* 29, pp.147-168.

MUÑOZ, A., MARTORELL, S., SERRADELL, V., 1997. “Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components”. *Reliability Engineering and System Safety* 57:107-20.

NICOLAU, A. S., 2010. *Computação quântica e inteligência de exames aplicados na identificação de acidentes de uma usina nuclear PWR*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 2012. *A Proposed Risk Management Regulatory Framework*. In: NUREG-2150 (Apr). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 2011. *An Approach for plant specific, Risk-informed decision making: Technical Specifications*. In: Regulatory guide 1.177 (May). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 2018. *An Approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis*. In: Regulatory guide 1.174, Revision 3 (Jan). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 1998. *An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the current licensing basis*. In: Regulatory guide 1.171, (Fev). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 2007. *Loss-of-Coolant-Accidents Resulting From Spectrum of Postulated Piping Breaks Within the Reactor Coolant Pressure Boundary*. Revision 3, March 2007. In: NUREG/CR-0800, Chapter 15 Section 15.6.5. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 2000. *Reliability Study: High-Pressure Safety Injection System, 1987-1997*. In: NUREGCR-5500, Vol 9. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 1991. *Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants*. In: 10CFR50.65. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 1983. *Technical Specifications - Enhancing the Safety Impact*. In: NUREG-1024, (Nov). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC), 1995. *Use of probabilistic risk assessment methods in nuclear activities: final policy statement*. In: Federal Register, vol. 60, p.42-622, (Ago). Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, EUA.

NUCLEN S.A., 1985. *Reator a Água Pressurizada do Programa Nuclear Brasileiro*. Kraftwerk Union A.G. (KWU), Nuremberg, Alemanha.

NUCLEAR TECNOLOGIA E CONSULTORIA (NUCTEC), 2022. *Educacional – Fotos - Usina.gif*. Disponível em: <<http://www.nuctec.com.br/educacional/fotos/usina.gif>>. Acesso em: 12 mar 2022, 6:00:00

SHI, Y., EBERHART, R. C., 1999. “Empirical Study of Particle Swarm Optimization”. In: *Congress on Evolutionary Computation CEC 1999*, pp. 1945-1950, Washington, DC, EUA.

SURJANOVIC S., BINGHAM D., *Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets – RASTRIGIN FUNCTION*, 2013. Disponível em: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/rastr.html>. Acesso em: 08 fev 2022, 6:00:00.

SURJANOVIC S., BINGHAM D., *Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets – SPHERE FUNCTION*, 2013. Disponível em: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/spheref.html>. Acesso em: 08 fev 2022, 6:02:00.

UPV-CSN-UNESA, 1998. *Proyecto de I + D Para Realización de una Experiencia Piloto de la Aplicación de los APS a la Modificación de las Especificaciones Técnicas*. 11 Nov.

VAN ROSSUM, G. “Python Software Foundation”. 1991. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 18 mar 2022, 6:32:00.

WANG, J., GE, D., CHEN, S. et al., 2020. “Maintenance strategy design for nuclear reactors safety systems using a constraint particle swarm evolutionary methodology”. *Annals of Nuclear Energy* 150 (2020) 107878.

VESELY, W., APOSTOLAKIS, G., 1999. “Developments in risk-informed decision-making for nuclear power plants”. *Reliability Engineering and System Safety*. Editorial 63:223-4.

APÊNDICE A: PROGRAMAÇÃO EM PYTHON DO PSO DAS FUNÇÕES DE TESTE

```
#Função Esfera e Rastrigin Oficial Gabriel Dissertação 04/2022
import numpy
import random
import math
import time
from scipy import special
import matplotlib.pyplot as plt

# Parâmetros do PSO
part = 100
dim = 10
inte = 1000

w = 0.729
c1 = 1.3
c2 = 2.7

Linf = -100
Lsup = 100

inicio = time.time()
loop = 0
gg = []
graphbest = []

while loop < 100:
    print('')
    print('LOOP ----- ', loop, '-----')
    print('')

    def f(x):
        fitness = 0
        for i in range(dim):
            fitness += (x[i]**2)
            #fitness += ((x[i]**2)-(10*math.cos(2*math.pi * x[i]))+10)
        return fitness

    x = numpy.zeros((part, dim)) # POSIÇÃO
    for i in range(part):
        for j in range(dim):
            x[i][j] = random.uniform(Linf, Lsup)

    v = numpy.zeros((part, dim)) # VELOCIDADE
    for i in range(part):
        for j in range(dim):
            v[i][j] = random.random()

    pbest = numpy.zeros((part, dim))
    for i in range(part):
        pbest[i] = x[i]

    gbest = numpy.zeros(dim)
    for i in range(dim):
        gbest = pbest[0]

    fit = numpy.zeros(part)
```

```

for i in range(part):
    fit[i] = f(x[i])

for k in range(inte):
    for i in range(part):
        for j in range(dim):
            #print('X inicial', x[i][j])
            #print('V inicial', v[i][j])
            r1 = random.random()
            r2 = random.random()
            v[i][j] = (w*v[i][j])+(c1*r1*(pbest[i][j]-
x[i][j]))+(c2*r2*(gbest[j]-x[i][j]))
            x[i][j] = x[i][j] + v[i][j]

            # check 1
            if x[i][j] > Lsup:
                x[i][j] = random.uniform(Linf, Lsup)
                v[i][j] = 0.0
            if x[i][j] < Linf:
                x[i][j] = random.uniform(Linf, Lsup)
                v[i][j] = 0.0
            if f(x[i]) < f(pbest[i]):
                pbest[i] = x[i]
            if f(x[i]) < f(gbest):
                gbest = pbest[i]
            graphbest.append(f(gbest))
        loop += 1

print('Fitness - ', f(gbest))
gg.append(f(gbest))

plt.close('all')
plt.plot(list(range(0, inte)), graphbest)
plt.title(r'Convergência')
plt.xlabel(r'Gerações')
plt.ylabel(r'FitnessBest')
plt.ticklabel_format(style='sci', axis='y', scilimits=(0, 0))
plt.show()

print('')
print('gg', gg)
print('')

menorvalor = min(gg)
print('Menor valor -', menorvalor)
print('')
media = numpy.mean(gg)
print('Media -', media)
print('')
fim = time.time()
dif = fim - inicio
print('Tempo do Código -', dif, ' segundos')
print('')
print('Partículas -', part)
print('Dimensões -', dim)
print('Interações -', inte)
print('Loops -', loop)
print('ESFERA')

```

APÊNDICE B: PROGRAMAÇÃO EM PYTHON DO PSO-HPSI

```
# PSO para Otimização do HPSI Dissertação Gabriel 04/2022
import math
import random
import time
import numpy as np
from scipy import special
import matplotlib.pyplot as plt

inicio = time.time()
loop = 0
ii = []
cc = []

while loop < 1:
    print('')
    print('LOOP ----- ', loop, '-----')
    print('')
    def fitness (srec):

        T=srec[0];
        k2=srec[1];
        k3=srec[2];

        fit= 7777;

    #Definições de parâmetros fixos
    # Valve
        lambdavalve = 5.83*(10**(-6))
        pvalve = 0.00182
        thvalve = 0.75
        dvalve = 2.6

        lambdapump = 3.89*(10**(-6))
        ppump = 0.00053
        thpump = 4.0
        dpump = 24.0

        cht = 20.0
        chc = 15.0

        qot = 1.0
        qom = 1.0

    for i in range(dim):

        # INDISPONIBILIDADE -----

        # Valvula 1
        urv1 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * T)
        utv1 = (1 / T) * thvalve * qot
        ucv1 = (1 / T) * urv1 * dvalve
        uv1 = urv1 + utv1 + ucv1

        # Valvula 2
        urv2 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * T)
        utv2 = (1 / T) * thvalve * qot
        ucv2 = (1 / T) * urv2 * dvalve
```

```

uv2 = urv2 + utv2 + ucv2

# Valvula 3
urv3 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * (T*k2))
utv3 = (1 / (T*k2)) * thvalve * qot
ucv3 = (1 / (T*k2)) * urv3 * dvalve
uv3 = urv3 + utv3 + ucv3

# Valvula 4
urv4 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * (T*k3))
utv4 = (1 / (T*k3)) * thvalve * qot
ucv4 = (1 / (T*k3)) * urv4 * dvalve
uv4 = urv4 + utv4 + ucv4

# Valvula 5
urv5 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * (T*k2))
utv5 = (1 / (T*k2)) * thvalve * qot
ucv5 = (1 / (T*k2)) * urv5 * dvalve
uv5 = urv5 + utv5 + ucv5

# Valvula 6
urv6 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * (T*k3))
utv6 = (1 / (T*k3)) * thvalve * qot
ucv6 = (1 / (T*k3)) * urv6 * dvalve
uv6 = urv6 + utv6 + ucv6

# Valvula 7
urv7 = pvalve + ((1 / 2) * lambdavalve * (T*k3))
utv7 = (1 / (T*k3)) * thvalve * qot
ucv7 = (1 / (T*k3)) * urv7 * dvalve
uv7 = urv7 + utv7 + ucv7

# Bomba A = Bomba B = Bomba C
urpa = ppump + ((1 / 2) * lambdapump * (T*k2))
utpa = (1 / (T*k2)) * thpump * qot
ucpa = (1 / (T*k2)) * urpa * dpump
upa = urpa + utpa + ucpa

# FUNÇÃO DO indisponibilidade

indisponibilidade = ((uv1*uv2) + (uv5*upa*upa) +
(upa*upa*upa) + (uv3*uv4*uv5*upa) + (uv3*uv4*upa*upa)
+ (uv3*uv5*uv6*uv7) +
(uv3*upa*uv6*uv7) + (uv4*uv5*uv6*uv7*upa) + (uv4*uv6*uv7*upa*upa))

return indisponibilidade

def custo (srec):

T=srec[0];
k2=srec[1];
k3=srec[2];

fit= 7777;

```

```

#Definições de parâmetros fixos
# Valve
    lambdavalve = 5.83*(10**(-6))
    pvalve = 0.00182
    thvalve = 0.75
    dvalve = 2.6

    lambdapump = 3.89*(10**(-6))
    ppump = 0.00053
    thpump = 4.0
    dpump = 24.0

    cht = 20.0
    chc = 15.0

    qot = 1.0
    qom = 1.0

    for i in range(dim):

        # CUSTO -----

            # Válvula 1
            ctv1 = (thvalve / T) * cht * (4 * 2184)
            ccv1 = (1 / T) * (pvalve + (lambdavalve * T)) * dvalve
* chc * (4 * 2184)
            cv1 = ctv1 + ccv1

            # Válvula 2
            ctv2 = (thvalve / T) * cht * (4 * 2184)
            ccv2 = (1 / T) * (pvalve + (lambdavalve * T)) * dvalve
* chc * (4 * 2184)
            cv2 = ctv2 + ccv2

            # Válvula 3
            ctv3 = (thvalve / (T*k2)) * cht * (4 * 2184)
            ccv3 = (1 / (T*k2)) * (pvalve + (lambdavalve *
(T*k2))) * dvalve * chc * (4 * 2184)
            cv3 = ctv3 + ccv3

            # Válvula 4
            ctv4 = (thvalve / (T*k3)) * cht * (4 * 2184)
            ccv4 = (1 / (T*k3)) * (pvalve + (lambdavalve *
(T*k3))) * dvalve * chc * (4 * 2184)
            cv4 = ctv4 + ccv4

            # Válvula 5
            ctv5 = (thvalve / (T*k2)) * cht * (4 * 2184)
            ccv5 = (1 / (T*k2)) * (pvalve + (lambdavalve *
(T*k2))) * dvalve * chc * (4 * 2184)
            cv5 = ctv5 + ccv5

            # Válvula 6
            ctv6 = (thvalve / (T*k3)) * cht * (4 * 2184)
            ccv6 = (1 / (T*k3)) * (pvalve + (lambdavalve *
(T*k3))) * dvalve * chc * (4 * 2184)
            cv6 = ctv6 + ccv6

            # Válvula 7
            ctv7 = (thvalve / (T*k3)) * cht * (4 * 2184)

```

```

        ccv7 = (1 / (T*k3)) * (pvalve + (lambdavalve *
(T*k3))) * dvalve * chc * (4 * 2184)
        cv7 = ctv7 + ccv7

        # Bomba A
        ctpa = (thpump / (T*k2)) * cht * (4 * 2184)
        ccpa = (1 / (T*k2)) * (ppump + (lambdapump * (T*k2)))
* dpump * chc * (4 * 2184)
        cpa = ctpa + ccpa

        # Bomba B
        ctpb = (thpump / (T*k2)) * cht * (4 * 2184)
        ccpb = (1 / (T*k2)) * (ppump + (lambdapump * (T*k2)))
* dpump * chc * (4 * 2184)
        cpb = ctpb + ccpb

        # Bomba C
        ctpc = (thpump / (T*k2)) * cht * (4 * 2184)
        ccpc = (1 / (T*k2)) * (ppump + (lambdapump * (T*k2)))
* dpump * chc * (4 * 2184)
        cpc = ctpc + ccpc

        # FUNÇÃO DO CUSTO
        custo = cv1 + cv2 + cv3 + cv4 + cv5 + cv6 + cv7 + (3 *
cpa) + ccv3 + ccv5

        return custo

#####

def fitgeral (srec):
    a=fitness(srec)
    b=custo(srec)
    fitgeral = (a * b)
    #fitgeral=((a)*(10**6)) * b)
    return fitgeral

'''def fitgeral(srec):

    a = fitness(srec)
    b = custo(srec)

    if b > 1439:

        fitgeral = b

    else:

        fitgeral = a

    return fitgeral'''

part = 100 # (60 -120)
inte = 1000 # (100 - 1000)
w = 0.4 # (0.4 - 0.8)
c1 = 1.8 # (a soma não pode ultrapassar 4 - 1.6 -2.0)
c2 = 2.2 # (1.6 - 2.0)
graphGbest = []
dim = 3

```

```

def main():

    v = np.zeros((part,dim))

    x = np.zeros((part,dim))

    pbest = np.zeros((part,dim))

    gbest = np.zeros(dim)

    limsup = np.zeros (dim)
    liminf = np.zeros (dim)

    limsup[0] = 8760
    liminf[0] = 0
    limsup[1] = 10
    liminf[1] = 0
    limsup[2] = 10
    liminf[2] = 0

    fit = np.zeros (part)

    for i in range(part):

        for j in range(dim):

            x[i][j]= random.uniform(liminf[j],limsup[j])

            v[i][j] = (x[i][j]/10.0)

        pbest[i] = x[i]
        # fit[i]=f(x[i])

        if i==0:
            gbest = pbest[i]

        T=x[i][0]
        k1=x[i][1]
        k2=x[i][2]

        svetor=x[i]

        # print (svetor[i])

        #if f(x[i]) < f(gbest):
        #    gbest = pbest[i]

        # if fitness(svetor) < fitness(gbest):
        #    gbest = pbest[i]

        if fitgeral(svetor) < fitgeral(gbest):
            gbest = pbest[i]

    for k in range (inte):
        #print('')
        #print('Interação ', k)
        #print('')
        for i in range (part):

```

```

        for j in range (dim):
            r1 = random.random()
            r2 = random.random()
            v[i][j] = (w*v[i][j]) + (c1*r1*(pbest[i][j]-
x[i][j])) + (c2*r2*(gbest[j]-x[i][j]))
            x[i][j] = x[i][j] + v[i][j]
            if x[i][j]>limsup[j]:
                x[i][j] = random.uniform(liminf[j],limsup[j])
                v[i][j] = 0.0
            if x[i][j]<liminf[j]:
                x[i][j] = random.uniform(liminf[j],limsup[j])
                v[i][j] = 0.0

            #if fitness(x[i]) < fitness(pbest[i]):
            if fitgeral(x[i]) < fitgeral(pbest[i]):
                pbest[i] = x[i]

        # if fitness(x[i]) < fitness(gbest):
        if fitgeral(x[i]) < fitgeral(gbest):
            gbest = pbest[i]

    # graphGbest.append(fitness(gbest))
    graphGbest.append(fitgeral(gbest))

plt.close('all')
plt.plot(list(range(0, inte)), graphGbest)
plt.title(r'Convergência')
plt.xlabel(r'Gerações')
plt.ylabel(r'FitnessBest')
plt.ticklabel_format(style='sci', axis='y', scilimits=(0,0))
plt.show()

print('x[i]', x[i])
print('função', fitness(gbest))
print('fitgeral', fitgeral(gbest))
print("custo", custo(gbest))
ii.append(fitness(gbest))
cc.append(custo(gbest))
print('Gbest Final', gbest)

if __name__=="__main__":
    main()
    loop += 1

    print('Fitness - ', indisponibilidade)

print('')
print('ii', ii)
print('')
print('cc', cc)
print('')

menorvalori = min(ii)
print('Menor valor -', menorvalori)
print('')
mediiai = np.mean(ii)
print('Media -', mediiai)

```

```
print('')

menorvalorc = min(cc)
print('Menor valor -', menorvalorc)
print('')
mediac = np.mean(cc)
print('Media -', mediac)
print('')

fim = time.time()
dif = fim - inicio
print('Tempo do Código -', dif, ' segundos')
print('')
```