



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINAS
NUCLEARES OTIMIZADO PELO ALGORITMO CUCO

Douglas dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINAS
NUCLEARES OTIMIZADO PELO ALGORITMO CUCO

Douglas dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Andressa dos Santos Nicolau, D.Sc.

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2019

dos Santos, Douglas

O Problema de Identificação de Acidentes em Usinas Nucleares Otimizado pelo Algoritmo Cuco/Douglas dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2019.

XI, 57 p.: il.; 29,7cm.

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 53 – 57.

1. Classificação de Acidentes. 2. Algoritmos Evolucionários. 3. Otimização com Cuco. 4. Voo de Lévy. I. dos Santos Nicolau, Andressa. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. O Problema de Identificação de Acidentes em Usinas Nucleares Otimizado pelo Algoritmo Cuco.

*"Você nunca alcança o sucesso
verdadeiro a menos que você
goste do que está fazendo."
Dale Carnegie*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais por terem me guiado e me influenciado a crescer na vida, não como um profissional, mas sim como um ser humano que luta e conquista.

Agradeço toda orientação cedida a mim, fornecida pela Andressa, em um momento de vazio me deu a oportunidade de resolver um problema com uma solução não muito usual, podendo ser aplicada a diversas áreas da engenharia.

Queria agradecer especialmente ao Faccini, que no início da minha graduação me deu a chance de conhecer a carreira acadêmica trabalhando em conjunto com todo pessoal do IEN, Amanda, Nathália, Pedro, Francisco, Sérgio, Edson e Bertrand. Os três anos que passei lá certamente me transformaram no excelente profissional que hoje sou. Não poderia deixar de agradecer também ao Professor Su Jian a todo suporte e por ter me influenciado a ir a todos os congressos possíveis e voltar com uma digna premiação.

Agradeço a minha família, principalmente a minha companheira e namorada Jéssica, amigos e colegas que estavam presentes nessa minha jornada de crescimento na graduação, principalmente aqueles que conseguiram aguentar o meu orgulho e estresse diário.

Agradeço também todos os meus companheiros de trabalho, do Banco BOCOM BBM pela oportunidade de crescer profissionalmente em uma área não muito conhecida por mim.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE ACIDENTES EM USINAS NUCLEARES OTIMIZADO PELO ALGORITMO CUCO

Douglas dos Santos

Setembro/2019

Orientadora: Andressa dos Santos Nicolau

Curso: Engenharia Nuclear

A operação de reatores nucleares é um sistema altamente complexo, pois é composto de milhares de componentes e sensores, que a todo momento é necessário serem monitorados e controlados. Antes de uma usina nuclear entrar em operação é necessário passar por diversos testes, apresentar redundâncias de sistemas de segurança e comprovar que ela estará apta se ocorrer algum tipo de desvio na operação por conta de situações anormais que poderiam levar a sérios acidentes. Toda as decisões, com relação à monitoração e identificação de eventos anormais é papel da equipe que está presente na sala de controle, os operadores, mesmo que submetidos a amplos treinamentos, essa equipe pode falhar na realização das suas tarefas. Ao longo dos anos, foi proposta a utilização de algoritmos de inteligência artificial em sistemas de suporte à operação baseados em teorias evolutivas e em como espécies se reproduzem na natureza. Neste projeto, o algoritmo utilizado é baseado na reprodução de algumas espécies de cucos, que mostram características parasitárias usando o voo de Lévy, permitindo que o algoritmo encontre rapidamente boas soluções. Neste trabalho, o algoritmo de otimização cuco foi usado para identificar três acidentes postulados para a usina nuclear brasileira Angra 2 e também avaliar a operação normal da planta. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, dado que foram capazes de encontrar o resultado ótimo para quaisquer dos testes realizados e apresentaram uma rápida convergência numérica.

Palavras Chave— Classificação de Acidentes, Algoritmos Evolucionários, Otimização com Cuco, Voo de Lévy

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

NUCLEAR PLANT ACCIDENT IDENTIFICATION PROBLEM OPTIMIZED BY
CUCKOO ALGORITHM

Douglas dos Santos

September/2019

Advisor: Andressa dos Santos Nicolau

Course: Nuclear Engineering

The operation of nuclear reactors is a highly complex system, because it is composed of thousands of components and sensors, which must be monitored and controlled at all times. Before a nuclear power plant become operational it is necessary for it to go through several tests, present redundancy of the security systems and prove that it is able if any kind of deviation in the operation occurs due to abnormal situations which could lead to serious accidents. All the decisions concerning monitoring and identification of abnormal events is the role of the team that is present in the control room, the operators. Even when subjected to extensive training, this team may fail in accomplishing their tasks. Through the years it was proposed the utilization of artificial intelligence algorithms in operation support systems based on evolutionary theories and in how species reproduce. In this project, the utilised algorithm is based on the reproduction of some cuckoo's species, which shows parasitics characteristics using the Lévy flights, allowing the algorithm to quickly find good solutions. In this work, the cuckoo optimization algorithm was used to identify three postulated accidents to the Brazilian nuclear power plant Angra 2 and also to evaluate the normal operation of the plant. The obtained results showed to be satisfactory, given that they were able to find the optimal result to any of the performed tests and presented a quick numerical convergence.

Keywords— Nuclear Transient Identification, Evolutionary Algorithms, Cuckoo Optimization Algorithm (COA), Lévy Flight

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
2 Os Acidentes Industriais	4
2.1 Histórico de Acidentes Industriais	4
2.2 Centrais Nucleares e Acidentes de Base de Projeto	7
2.2.1 Usina Nuclear de Angra 2	8
2.2.2 Perda de Refrigeração do Reator (LOCA)	11
2.2.3 Ruptura de Tubos do Gerador de Vapor (SGTR)	12
2.2.4 Perda de Alimentação Elétrica (Blackout)	13
3 Algoritmo de Otimização Cuco	15
3.1 Algoritmos de Otimização	15
3.2 Algoritmo de otimização COA - <i>Cuckoo Optimization Algorithm</i>	16
3.2.1 Geração do Espaço de Busca	18
3.3 Voo de Lévy	20
3.4 Cuco Aplicado a Funções de Teste	22
3.4.1 Função Schaffer	23
3.4.2 Função Michalewicz	24
3.4.3 Função Esfera	24
3.4.4 Função Rastringin	25
3.4.5 Resultados dos Testes	26
4 Cuco Aplicado ao Problema de Identificação de Acidentes	31
4.1 Modelo de Identificação de Acidentes Proposto	31
4.2 Variáveis de Estados	32
4.3 Modelagem do COA	38
4.4 Testes realizados	39
4.4.1 Testes com a Quantidades de Ninhos	40
4.4.2 Teste com a Fração de Ninhos Descartados	41
4.4.3 Teste com a Mudança de Sementes	43

4.4.4	Testes com as Melhores Combinações	45
4.4.5	Testes do Vetor Protótipo com Independência no Tempo	47
4.5	Comparação do COA com Outros Algoritmos na Otimização de Identificação de Acidentes da Usina Nuclear Angra 2	50
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	51
5.1	Conclusões	51
5.2	Trabalhos Futuros	52
	Referências Bibliográficas	53

Lista de Figuras

2.1	Diagrama Simplificado da Usina Angra 2 [1]	9
3.1	Fluxograma do Funcionamento do Algoritmo Cuco	19
3.2	Voo de Lévy com 50 passos consecutivos partindo da origem [2]	22
3.3	Pseudocódigo do COA	23
3.4	Função Schaffer [3]	23
3.5	Função Michalewicz [4]	24
3.6	Função Esfera [5]	25
3.7	Função Rastrigin [6]	25
3.8	Melhor Resultado para Função Schaffer.	27
3.9	Melhor Resultado para Função Michalewicz.	28
3.10	Melhores Resultados para Função Esfera.	29
3.11	Melhores Resultados para Função Rastrigin.	30
4.1	Exemplo do Processo de Classificação [7]	32
4.2	Evolução das Variáveis de Estado (1)	34
4.3	Evolução das Variáveis de Estado (2)	35
4.4	Evolução das Variáveis de Estado (3)	36
4.5	Evolução das Variáveis de Estado (4)	37
4.6	Evolução das Variáveis de Estado (5)	38
4.7	Convergência do COA no Teste com Melhor Resultado.	47
4.8	Representação do Vetor Obtido para Variável Vazão de Vapor com $t = 10s$	48
4.9	Representação do Vetor Obtido para Variável Vazão de Vapor com $t = 30s$	48
4.10	Representação do Vetor Obtido para Variável Potência Nuclear com $t = 10s$	49
4.11	Representação do Vetor Obtido para Variável Potência Nuclear com $t = 30s$	49

Lista de Tabelas

3.1	Resultados Encontrados	26
4.1	Variáveis de Estado	33
4.2	Vetor de Máximos e Mínimos	39
4.3	Teste na Quantidade de Ninhos por Cuco	40
4.4	Vetor do Melhor Resultado para o Teste de Ninhos	41
4.5	Teste na Fração de Ninhos Descartados	42
4.6	Vetor do Melhor Resultado para o Teste da Fração de Ninhos Descartados	43
4.7	Teste com Mudança de Sementes	44
4.8	Vetor do Melhor Resultado para o Teste da Mudança de Semente	44
4.9	Resultado do Teste com os Melhores Parâmetros	45
4.10	Vetor do Resultado com os Melhores Parâmetros	46
4.11	Comparação do COA com os algoritmos QEA, GA e PSO	50
4.12	Comparação da Convergência do COA com os algoritmos QEA, GA e PSO	50

Capítulo 1

Introdução

A sociedade atual possui uma total dependência da energia elétrica, ela é utilizada em todos os afazeres do dia-a-dia, para locomoção utilizando o metrô, para alimentação com fornos elétricos, para comunicação com seus telefones celulares entre outros. A energia é essencial para o crescimento econômico sustentável e para o bem-estar humano e pode ser produzida de fontes diferentes, no Brasil, boa parte dela é produzida por usinas hidrelétricas e 3% da matriz energética brasileira é vinda de usinas nucleares, equivalendo a 1900MW de potência elétrica [8].

A energia gerada por meios nucleares é limpa, pois é livre de emissões de carbono, comparada a fontes não renováveis, mitigando então os impactos climáticos ao planeta e diminuindo a emissão de gases de efeito estufa. Hoje, mais de 400 usinas de potência nucleares estão em operação e por volta de 50 outras estão em construção, fornecendo cerca de 11% da eletricidade no planeta.

No Brasil, atualmente há duas usinas nucleares em operação e uma em construção em Angra dos Reis no estado do Rio de Janeiro. Uma usina nuclear consiste de um sistema complexo, composto de dezenas de milhares de componentes e subsistemas, que devem ser monitorados e controlados; qualquer variação de estado na planta dificulta a tomada de decisão por parte dos operadores presentes na sala de controle e a maior parte das decisões, em casos de eventos anômalos, é tomada por seres humanos, que podem errar. Os operadores estão a todo momento atentos, diagnosticando e tomando decisões corretivas baseadas nas leituras fornecidas por instrumentos presentes na sala de controle.

Antes de tornar-se operador de uma planta nuclear, anos de treinamento e estudos são necessários, mas mesmo com tanto treinamento, ainda existe a possibilidade de cometer erros nas tarefas de diagnóstico e tomada de decisão. Dada essa possibilidade, sistemas de suporte à operação foram desenvolvidos para auxiliar os operadores, buscando antecipar possíveis falhas, principalmente em situações críticas da planta, onde são apresentados muitos alarmes aos operadores, como no caso de acidentes e, assim, evitando

acontecimentos como os vividos em Three Mile Island nos Estados Unidos em 1979.

Muitos desses sistemas utilizam técnicas de Inteligência Artificial, tais como: sistemas especialistas, redes neurais e algoritmos baseados em teorias evolutivas, como os algoritmos genéticos [9], e outros que se baseiam no comportamento de animais em busca de alimento, como otimização por enxame de partículas [10] e colônia de formigas [11], e também de inspiração quântica [12], como algoritmo evolucionário quântico, vêm sendo utilizadas para orientar os operadores nas tomadas de decisão e possibilitando a identificação e previsão, em tempo real, dos estados de operação da planta. Podem-se citar trabalhos como [13], [14], [15], [16] e [17]. Essas técnicas possuem uma abordagem de busca de resultados, não necessitando de continuidade no espaço e da existência de derivadas.

Neste trabalho, o algoritmo COA (*Cuckoo Optimization Algorithm*) é utilizado para a otimização do problema de identificação de acidentes de base de projeto postulados para a usina nuclear Angra 2. O COA, assim como os outros algoritmos de otimização baseados em teorias evolutivas, possui uma população inicial que coloca seus ninhos no espaço de busca e aqueles que melhor se adaptam tendem a sobreviver, enquanto os outros, ou buscam um novo ninho, ou morrem no processo. Onde cada ninho possui apenas um ovo, e sua posição no espaço de busca, é considerada uma solução para o problema avaliado.

O método proposto neste projeto, tem como objetivo encontrar a melhor posição para os vetores protótipos de cada estado possível (SGTR, Blackout ou Normal) da usina nuclear Angra 2, maximizando, em um dado instante de tempo, o número de classificações corretas. Pois uma amostra, de um determinado evento anômalo, possui a menor distância euclidiana entre o seu vetor gerador do que de qualquer outro vetor gerado.

Para apresentar o método proposto, o trabalho foi dividido em cinco capítulos com a seguinte divisão:

O Capítulo 2 descreve o problema de identificação de acidentes, um breve histórico de acidentes em plantas nucleares e não-nucleares, e os acidentes de base de projeto para reatores do tipo PWR, abordados neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma breve descrição sobre algoritmos de otimização e uma descrição do algoritmo cuco e sua aplicação em funções de teste da literatura, a fim de verificar a convergência do algoritmo proposto.

No Capítulo 4, é apresentado o método proposto e os principais resultados obtidos na identificação de três acidentes de base de projeto postulados para a usina nuclear Angra 2, aplicando o algoritmo Cuco.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do método proposto e as possíveis sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Os Acidentes Industriais

Nesse capítulo serão apresentados históricos de acidentes industriais, não só nucleares, mas também de outras plantas industriais, de maneira a mostrar que qualquer usina, pode sofrer acidentes. Após isso, haverá uma descrição mais detalhada de análise de acidentes em usinas nucleares, descrevendo o que são transientes operacionais, acidentes de base de projeto e transientes antecipados com falha no desligamento e ao final um detalhamento com relação a três acidentes abordados neste trabalho: LOCA, SGTR e Blackout.

2.1 Histórico de Acidentes Industriais

Não só plantas de potências nucleares estão sujeitas a sofrer acidentes, qualquer usina, desde produção de açúcar à geração de energia, pode sofrer acidente de pequenas proporções até sérios acidentes. Os acidentes industriais ocorridos na história da sociedade contribuíram de forma significativa para despertar a atenção das autoridades governamentais, da indústria e da sociedade como um todo no sentido de buscar mecanismos para a prevenção desses eventos que comprometem a segurança das pessoas e do meio ambiente.

Poucos acidentes industriais podem igualar a severidade do desastre de Seveso de 1976 [18]. Apesar dos problemas de saúde a longo prazo e riscos ambientais resultantes, tanques de armazenagem na indústria química Industrie Chimiche Meda Società Azionaria (ICMESA) romperam, liberando vários quilogramas de TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina) - uma forma de dioxina causadora de câncer - em uma área residencial. A planta não era considerada uma ameaça para a população que morava ao redor, tudo isso mudou, no entanto, na tarde de sábado aproximadamente às 12h37. Quando a temperatura dentro de um dos tanques da usina atingiu um nível crítico, uma válvula de liberação de pressão foi aberta e cerca de seis toneladas métricas de gás tóxico foram emitidas da instalação. A equipe de manutenção ouviu um som assobiando e uma nuvem de vapor foi vista saindo de uma abertura no telhado. Uma densa nuvem branca, de considerável altitude, se afastava do local. O lançamento durou cerca de vinte minutos. Nos dias que se seguiram à divulgação, houve muita confusão devido à falta

de comunicação entre a empresa e as autoridades para lidar com esse tipo de situação ([19]).

Three Mile Island (TMI) [20], em março de 1979, foi o acidente mais grave na história operacional de uma usina nuclear comercial dos EUA. A unidade TMI-1 estava parada para recarga, enquanto a unidade TMI-2 operava normalmente com 97% de potência total. O acidente teve início às 04h da manhã de quarta-feira, 28 de março de 1979, quando a planta sofreu uma falha secundária mecânica ou elétrica, que impediu que as bombas principais de água de alimentação de TMI-2 fornecessem água para o gerador de vapor, fazendo com que o turbogerador e o próprio reator fossem desligados, resultando em um aumento de pressão no sistema primário do reator, que fez com que a válvula de alívio localizada no topo de pressurizador fosse aberta. Após a queda da pressão, a válvula deveria ter sido fechada, mas continuou aberta, porém os sistemas de instrumentação da sala de controle indicavam que a mesma tinha sido fechada. Os operadores da sala de controle desconheciam que a água de resfriamento do reator estava evaporando e sendo liberada pela válvula. Os alarmes dos painéis advertiam e os alarmes da usina tocavam, no entanto os operadores não sabiam que havia perda de refrigerante no núcleo, os sensores presentes forneciam informações inadequadas impossibilitando a identificação. Em operações normais, o vaso está sempre cheio de água, com isso não era necessário um medidor de nível dentro dele. A válvula aberta reduziu tanto a pressão do primário que as bombas de refrigeração ao tentar fornecer água ao núcleo, vibraram de tal maneira que desligaram. A água de resfriamento de emergência bombeada para o sistema primário começou a encher por completo o pressurizador, resultando em uma estagnação do fluxo de água. Sem refrigeração, o nível de água do núcleo caiu, resultando em um superaquecimento. O acidente causou pequenas emissões radioativas que, mesmo não produzindo efeitos detectáveis à saúde do público, resultou em consequências que comprometeram toda a usina e fez com que a segurança de plantas nucleares fosse revista e modificada, principalmente em relação ao papel do operador da sala de controle e à exigência de introduzir sistemas computadorizados na sala de controle.

Bhopal é conhecida por seus registros históricos, lagos artificiais e vegetação, mas acima de tudo, a cidade é lembrada em todo o mundo como um dos piores acidentes industriais da história [21]. Tudo começou na noite de 2 de dezembro de 1984, o gás venenoso que vazou da fábrica da Union Carbide India Ltd. (UCIL) na capital de Madhya Pradesh, Bhopal, a substância química, gás isocianato de metila (MIC) que ali era armazenada, transformou a cidade em uma imensa câmara de gás, matando milhares de pessoas diretamente. O vazamento de gás foi relatado após a meia-noite do dia 2 de dezembro. Os ventos da madrugada carregavam o gás venenoso que vazava da fábrica para o resto da cidade, matando pessoas, tanto acordadas quanto adormecidas. Estima-se que cerca de 40 toneladas do gás e outras substâncias químicas vazaram; esse gás é extremamente tóxico e, se sua concentração no ar atingir 21 ppm, pode causar morte por inalação em minutos, não há um número exato, mas estima-se que o vazamento ocorrido foi centenas de vezes maior que

o esperado, matando as pessoas em instantes. A estrutura do prédio também não foi capaz de aguentar a pressão gerada com a expansão dos gases e rompeu liberando o gás venenoso.

Toda ação e tomada de decisão errada feita por operadores da sala de controle em uma planta de potência nuclear pode levar a danos catastróficos e o acidente de Chernobyl [22] é o um exemplo de como implicações humanas, sociais e culturais podem levar a consequências extremas. No dia 26 de abril de 1986, a unidade 4 passaria por um teste em um dispositivo de segurança instalado no gerador elétrico, o reator operava com metade da sua potência, 1600 MWt, e o teste exigia que a potência fosse reduzida para 700MWt. O distribuidor de energia de Kiev exigiu que a usina continuasse a manter a produção de energia sem reduções por conta de uma demanda de eletricidade na zona industrial. O teste foi retomado por volta das 23h daquele mesmo dia, mas às 00h houve uma troca de turnos de operadores. Operadores que desconheciam o teste, foram chamados para dar continuidade ao mesmo. Cabe ressaltar que para realização do teste, o sistema de proteção do reator foi desligado. Durante a descida de potência, aconteceu algo não previsto no teste, fazendo com que a potência do reator caísse para apenas 30MWt. Diferente de usinas de potência normal, uma usina nuclear a baixa potência não é capaz de fazer uma subida de potência repentina, por conta da concentração de venenos, absorvedores de nêutrons, presentes no núcleo. Após muitas tentativas a equipe da sala de controle tentava recuperar a potência necessária para completar o teste. Mesmo com o reator a 200MWt os operadores decidem continuar com o teste, que necessitava 700MWt, quando o teste é iniciado, a potência cresce de forma exponencial no reator, fazendo com que os operadores ativassem o SCRAM do reator, o sistema de desligamento de emergência. Diferente de outros reatores o reator de Chernobyl era do tipo RBMK [23], ele possuía uma fração de vazio positiva, isto significa que se bolhas de vapor se formam na água no refrigerante, acelerando a reação nuclear e levando à supercriticalidade do reator mais rapidamente, podendo se tornar instável. O real problema do projeto do reator eram as pontas das barras de controle, que eram feitas de grafite e os extensores, a região final das barras, eram ocas e preenchidas de água, enquanto o resto dela era feita de uma mistura de boro e carbono, quando inseridas as pontas das barras de controle deslocavam uma quantidade significativa de água para o núcleo, aumentando, assim, a taxa de fissão, causando o efeito contrário do objetivo das barras de controle, ou seja, causando um aumento repentino de potência ao invés de uma diminuição [24].

A Piper Alpha era uma plataforma de produção de petróleo no Mar do Norte, operada pela Occidental Petroleum Limited em parceria com a Texaco [25]. Começou a sua produção em 1976, mas em 6 de julho de 1988 foi o local do desastre marítimo mais letal do mundo. Uma explosão e incêndios resultantes destruíram por completo boa parte da plataforma, matando 167 pessoas, incluindo dois *tripulantes* de um navio de resgate. Apenas 61 trabalhadores escaparam e 30 corpos nunca foram recuperados. Tudo começou com o vazamento de hidrocarbonetos leves na área de bombas. De acordo com

as investigações, os trabalhadores realizaram uma manutenção na bomba na unidade de produção de gás. Eles removeram a válvula de alívio da linha de descarga da bomba, porém não completaram o serviço naquele turno. A informação da manutenção deste equipamento crítico não foi adequadamente comunicada para o turno seguinte. Quando a bomba primária, que estava em funcionamento, saiu de operação, os trabalhadores acionaram a bomba reserva, porém desconheciam que a válvula de alívio dessa bomba estava em manutenção. Ao colocar a bomba reserva em serviço, quase que imediatamente, o condensado de gás natural foi liberado, produzindo uma nuvem de gás inflamável que ao encontrar uma fonte de ignição iniciou o desastre. Os incêndios dos poços e das linhas de petróleo e gás, todos rompidos, um a um, produziram chamas com uma altura de cerca de 200m e um pico de consumo de energia de aproximadamente 100GW. Foram necessárias mais de três semanas para que os incêndios se extinguissem. Os restos da Piper Alpha foram jogados ao mar em 28 de março de 1989.

Nota-se então que, na maioria dos acidentes citados anteriormente, aconteceram por falhas humanas em conjunto com um mau monitoramento da situação corrente da planta e que deveriam ser controladas. Logo, toda chance de monitorar e prever variações nas principais variáveis de processo poderia facilitar o entendimento da situação por parte dos operadores e auxiliar na tomada de decisão, evitando acidentes, perda de produção e demandas.

2.2 Centrais Nucleares e Acidentes de Base de Projeto

Uma central nuclear consiste em um grande número de sistemas e componentes inter-relacionados. A própria complexidade da usina dificulta a contemplação de todas as possíveis combinações de falhas e eventos que podem comprometer a segurança da usina. Todos os componentes ali presentes estão sujeitos a falha, para evitá-las os componentes utilizados devem ser projetados com margens de segurança suficientes, ou seja, devem possuir valores críticos acima daqueles que serão fornecidos em uma operação normal da central. Por exemplo, dados nominais para as taxas de calor e as tensões mecânicas são escolhidos de modo que as temperaturas e as deformações estejam bem abaixo dos valores críticos [26].

Para um funcionamento eficaz, as usinas devem a todo momento estar sendo monitoradas, todos os seus milhares de componentes, fornecendo informações aos operadores que mostrem o estado atual da usina. Com isso, um grande número de sistemas de instrumentação são instalados e os operadores têm o papel de acompanhar o monitoramento de um grande número de variáveis que envolvem diferentes processos e estados da planta. Todas as atividades, identificação e diagnóstico de anomalias, como falhas nos processos, degradação de componentes e desvios de parâmetros de controle, torna-se complexo devido

à grande quantidade de informações vindas dos instrumentos de medição e alarmes da planta [27].

Os operadores são submetidos a um longo treinamento para ter conhecimento de como operar a planta, mesmo assim ações tomadas de forma incorreta por conta de um diagnóstico falho podem acarretar danos à segurança da usina, podendo levar a acidentes como o de TMI. Tarefas como essa são conhecidos como Problema de Identificação e Diagnóstico de eventos anormais e/ou transientes, mesmo sendo estudados há décadas, até o momento não há uma solução definitiva para esse tipo de problema. Para auxiliar no diagnóstico do estado de uma planta nuclear, alguns métodos como o de classificação de dados são utilizados.

A classificação de dados está presente em diversos problemas reais, como: reconhecer padrões, diferenciar espécies de plantas, classificar tumores que podem ser benignos ou malignos, dentre outros problemas reais [28]. Basicamente, um problema de classificação consiste em determinar um padrão ou rótulo no objeto estudado, baseando-se em um conjunto de atributos a ser classificado. Na área nuclear, a identificação de acidentes se baseia em, dados de simulações de acidentes de base de projeto postulados, criar um conjunto de padrões que possam determinar se a usina pode ou não estar em alguma dessas situações postuladas.

2.2.1 Usina Nuclear de Angra 2

A segunda usina nuclear brasileira começou a operar comercialmente em 2001. Com potência de 1.350 MWe (3.771 MWt), conta com um reator de água pressurizada (PWR) de 4 circuitos térmicos independentes com tecnologia alemã da Siemens/KWU, o núcleo de Angra 2 é composto de 193 elementos combustíveis, onde cada elemento contém 236 varetas combustíveis com urânio enriquecido [29].

A Figura 2.1, apresenta um diagrama simplificado dos circuitos presentes na usina Angra 2, pode-se notar que o circuito primário possui, conectados ao núcleo do reator (1), quatro geradores de vapor (2), seguidos de uma bomba de refrigeração (3) em cada; ligado a uma das linhas do gerador de vapor, há um pressurizador (18), com o papel de estabilizar a pressão das linhas que levam água para o núcleo. Simplificando o circuito secundário, nota-se a existência de duas turbinas de vapor (4) após a saída de vapor dos geradores, a saída das turbinas está conectada ao condensador (7), com papel de condensar a água de saída das turbinas e retornar ao gerador de vapor com auxílio da bomba de condensado principal (8).

Desde o projeto de um reator nuclear, como os presentes na cidade de Angra dos Reis no estado do Rio de Janeiro, é necessário incorporar requisitos e critérios de segurança que visam garantir o confinamento dos produtos de fissão de tal forma que, mesmo em

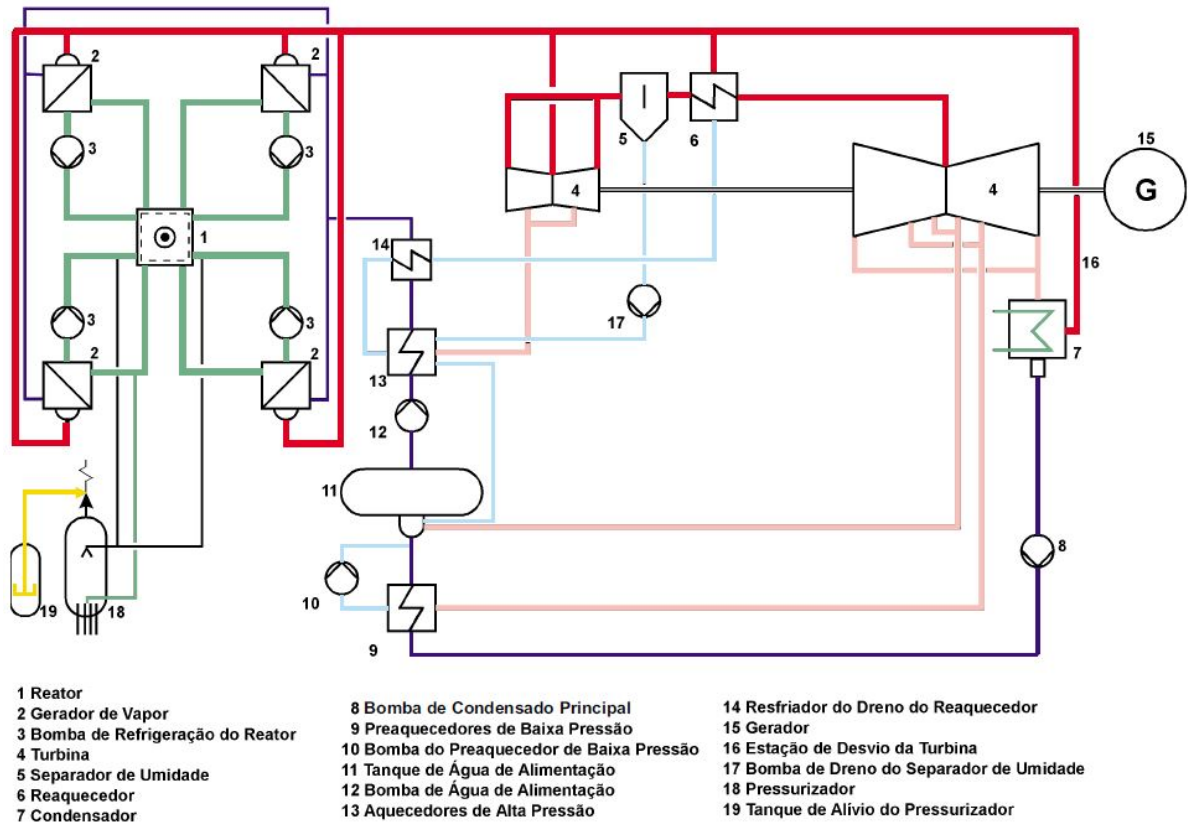


Figura 2.1: Diagrama Simplificado da Usina Angra 2 [1]

caso de acidente, as consequências para o meio ambiente, trabalhadores e da população do entorno sejam as mínimas possíveis. Os critérios necessários no projeto são relativos à ocorrências de eventos externos, como abalos sísmicos, eventos internos como rupturas de tubulações e condições transitórias desfavoráveis. São exigências de projeto a investigação de possíveis acidentes oriundos de eventos internos é de extrema importância para a regulação e certificação de uma planta de potência nuclear.

Uma das categorias de eventos que são postulados em uma usina nuclear são os acidentes de base de projeto (DBA), que são condições de acidentes estabelecidos em projeto, no qual os danos ao combustível e a liberação de materiais radioativos são mantidos dentro de limites autorizados. De acordo com [30], os acidentes podem ser da seguinte forma:

- Acidentes de origem interna ou externa;
- Acidentes de área (incêndios, inundações internas);
- Acidentes de origem natural;
- Acidentes de origem humana (explosão de um tanque perto da planta, sabotagem, etc.).

Podem ser categorizados como eventos de acidentes de base projeto, de acordo com [31]:

- Abertura inadvertida de todas as válvulas de "bypass" do Sistema de Vapor Principal;
- Perda de refrigeração do reator, resultante de rupturas na tubulação do primário (LOCA);
- Ruptura de tubos de gerador de vapor (SGTR);
- Ruptura das linhas de vapor;
- Isolamento da linha de vapor principal;
- Ruptura da linha de alimentação principal;
- Abertura inadvertida de uma válvula de alívio do gerador de vapor.

Esses acidentes são definidos por meio de análises determinísticas onde métodos determinísticos são aplicados e por análises probabilísticas com o uso de considerações probabilísticas com o intuito de projetar e verificar todos os sistemas da planta, particularmente os de segurança.

De acordo com [31], transientes operacionais são quando os sistemas de controle são suficientes para o desligamento rápido do reator, mantendo a integridade das barreiras de proteção, com componentes funcionando em limites permitidos em operação normal, evitando a liberação de radioatividade para o meio ambiente.

Alguns exemplos de eventos que caracterizam transientes operacionais são:

- Abertura indevida de uma válvula de *bypass* do Sistema de Vapor Principal;
- Desligamento da turbina (*trip* da Turbina);
- Isolamento de uma válvula de isolamento do Sistema de Vapor Principal;
- Perda de água de alimentação devido à falha de uma bomba de alimentação;
- Perda de água de alimentação devido à falha de todas as bombas de alimentação;
- Desligamento de uma bomba de refrigeração do reator;
- Desligamento de todas as bombas de refrigeração do reator;
- Retirada descontrolada do banco de barras de controle a partir de uma condição subcrítico;
- Retirada descontrolada do banco de barras de controle em operação normal;
- Partida de uma bomba de refrigeração inativa em um nível de potência incorreto;
- Atuação inadvertida do sistema de injeção de segurança durante a operação normal;

- Diluição descontrolada de boro;
- Abertura inadvertida da válvula de alívio de segurança do pressurizador;
- Perda de alimentação elétrica para operação de equipamentos auxiliares (Blackout).

Outra categoria de ocorrência de eventos inadequados em uma usina são os transientes antecipados com falha no desligamento rápido do reator (ATWS), que ocorre quando um desligamento do reator é necessário durante um transiente, mas o sistema de *scram* do reator não funciona e as barras de controle não são inseridas no núcleo, possivelmente devido à falha do sistema de controle ou acionamento, ou uma falha do sistema de monitoramento de proteção e segurança.

Um ATWS, em grande parte dos casos, conduz a uma não remoção do calor produzido no núcleo, elevando, então, a temperatura e a pressão no circuito primário do reator. Com isso, há a atuação das válvulas de segurança, reduzindo a pressão e resultando em perda de refrigerante do reator, a evaporação parcial do refrigerante acarreta a formação de bolhas, piorando, então, a moderação dos nêutrons e, conseqüentemente levando a uma inserção negativa de reatividade, ocasionando o desligamento do reator.

Este trabalho aborda especificamente três acidentes de base projeto postulados para a usina nuclear Angra 2, escolhidos para poder comparar com outros trabalhos já presentes na literatura, buscando avaliar como o método proposto consegue determinar quais dos possíveis acidentes está acontecendo em uma usina do tipo PWR, mais especificamente para a planta nuclear de Angra 2. Um transiente operacional será avaliado, sendo ele referente à perda de alimentação da planta, *Blackout* e outros dois acidentes de base de projeto também serão analisados, são eles, a perda de refrigeração do núcleo, *LOCA*, e a ruptura dos tubos do gerador de vapor, *SGTR*. Além disso, o modelo proposto busca determinar desvios do estado de operação normal da usina.

2.2.2 Perda de Refrigeração do Reator (LOCA)

A sigla, em inglês, significa "*Loss Of Coolant Accident*", em resumo é uma dos tipos de acidentes com perda de refrigerante, considerando rupturas grandes, médios e/ou pequenas separadamente, fazendo a vazão de refrigerante diminuir com o tempo, devido ao vazamento ali presente, resultando em um descontrole da temperatura do núcleo, acarretando em superaquecimentos as componentes ali presentes que, em situações extremas, levam a um derretimento do núcleo [30]. Um LOCA pode ser classificado em pequeno (SBLOCA), médio (MBLOCA) ou grandes (LBLOCA).

De acordo com [32] os eventos iniciadores de um LOCA são classificados em seis grupos:

- Rupturas grandes de tubos, de aproximadamente 3-6 pés de diâmetro equivalente;

- Rupturas intermediárias de tubos, de aproximadamente 2-6 polegadas de diâmetro equivalente;
- Rupturas pequenas de tubos, de aproximadamente 0,5-2 polegadas de diâmetro equivalente;
- Rupturas no vaso do reator;
- Rupturas no gerador de vapor;
- Rupturas nas tubulações que fazem interface com sistema de refrigeração do reator.

Um SBLOCA é caracterizado por rupturas que variam de 3/8 de polegadas a 2 polegadas de diâmetro equivalente. De acordo com [33] o sistema de resfriamento é depressurizado lentamente e os sensores do reator são geralmente acionados por conta de baixa pressão. No entanto, o núcleo permanece por um longo tempo a uma pressão relativamente alta e os sistemas de segurança não injetam refrigerante.

Um MBLOCA é uma ruptura que varia de 2 a 6 polegadas diâmetro equivalente. Na fase inicial do acidente, a pressão do primário é mais alta que a pressão de corte para acionamento das bombas de refrigerante de emergência e, assim, elas não são acionadas, mas, mesmo assim, o núcleo continua perdendo refrigerante e dificulta a retirada de calor do núcleo [34].

Já um LBLOCA inclui rupturas nas tubulações maiores que 6 polegadas de diâmetro equivalente que são suficientemente grandes para causar uma depressurização no vaso e faz com que os sistemas de segurança do reator injetem refrigerante no núcleo [35]. Esse tipo acidente pode causar danos severos ao núcleo de não houver ações de contingência na recuperação do refrigerante do reator, como o acionamento de sistemas de refrigeração auxiliares..

2.2.3 Ruptura de Tubos do Gerador de Vapor (SGTR)

O "*Steam Generator Tube Rupture*" é referente à ruptura de uma das linhas principais de vapor, resultado de uma ruptura repentina de alguma das linhas de saída do gerador de vapor. Esse evento é bastante grave, considerando que um vazamento do primário para o secundário resulta em um vazamento de um refrigerante radioativo para o lado isolado do gerador de vapor.

As consequências desse acidente afetam tanto o circuito primário quanto o secundário [1]; no primário, nota-se uma queda na temperatura, resultando em um aumento de reatividade do núcleo, seguido de um acréscimo no fluxo de nêutrons e possivelmente um superaquecimento nos componentes do primário. No secundário, há um aumento de pressão no local onde houve o rompimento e produtos de fissão oriundos do primário

tendem a vazar pelo local da quebra.

De acordo com [36], a sequência de eventos de um SGTR em um PWR se dá por:

- Os alarmes de baixa pressão do pressurizador são acionados e então os aquecedores são ligados inserindo calor no refrigerante, a fim de manter a pressão no circuito;
- No lado secundário, o fluxo de água diminui, mas a inserção de água vinda do primário faz com que o nível do gerador de vapor aumente;
- O monitor de radiação do condensador identifica um aumento de radiação na linha de vapor, vinda do gerador de vapor;
- Ocorre *trip* na turbina, gerando um aumento de pressão no lado secundário, resultando na abertura das válvulas de alívio, descarregando vapor nos acumuladores.

2.2.4 Perda de Alimentação Elétrica (Blackout)

O *Blackout* é resultado da perda total de energia elétrica, impactando então a perda repentina e rápida de potência dos equipamentos auxiliares da usina, dentre eles, as bombas de refrigeração do reator, podendo levar a um superaquecimento do núcleo.

De acordo com [37], estima-se que os eventos resultando da perda de energia elétrica correspondem a 51,4% das situações de dano potencial ao núcleo do reator. Com a ocorrência desse acidente, a usina entra em modo de resfriamento de emergência, com sua energia elétrica sendo fornecida por geradores diesel. Nesse modo de operação, as bombas principais são desligadas, levando a um aumento de pressão no secundário e conseqüentemente iniciando a atuação das válvulas de alívio do gerador de vapor, liberando vapor para a atmosfera, até que a energia elétrica da usina seja restaurada [1].

Enquanto a planta está em operação, a energia cedida para os sistemas de segurança e controle são fornecidas pelo gerador elétrico principal do reator, mas quando a planta não está em operação a energia elétrica é fornecida por fontes externas e além disso, toda usina nuclear possui normalmente fontes de carga locais como geradores diesel [38]. Ao perder todas as fontes de energia externa e ocorrer um *trip* no gerador principal, os geradores diesel são acionados e toda energia da usina é fornecida por eles, por definição, é quando ocorre o Blackout.

A preocupação com o Blackout se baseia na experiência operacional acumulada, principalmente com relação a confiabilidade das fontes de alimentação de corrente alternada. Várias plantas operacionais sofreram uma perda total de energia elétrica externa e são esperadas mais ocorrências [39]. Em alguns casos, as fontes de alimentação de emergência redundantes não estavam disponíveis e por esse motivo houve uma perda total de energia,

que ocorreu por um curto período de tempo e, por este motivo, não houve consequências graves.

Capítulo 3

Algoritmo de Otimização Cuco

Neste capítulo, serão apresentados, inicialmente, noções sobre algoritmos de otimização, como sua forma de funcionamento e teorias nas quais foram baseados. Será apresentado também o modo com que o pássaro cuco sobrevive na natureza e, em seguida, será mostrado como funciona a implantação de um algoritmo baseado nos cucos e testes em funções de teste contínuas da literatura para a avaliação do algoritmo.

3.1 Algoritmos de Otimização

Otimização é um processo para tornar alguma coisa melhor, ou seja, é o processo de ajustar as entradas características de um dispositivo, processo matemático ou experimento para encontrar o resultado mínimo ou máximo de um problema. As entradas consistem de variáveis, onde a função ou processo a ser otimizado é representada por uma função avaliação (função *fitness*) e, o resultado é o valor da função fitness [40].

Existem diferentes métodos de otimização. Alguns desses métodos, conhecidos como meta-heurísticos, são inspirados em processos naturais chamados de algoritmos evolutivos; eles possuem como qualquer espécie da natureza, uma população de indivíduos, noções para se adaptar a mudanças, ciclos de vida com nascimento, crescimento e morte e possuem também noções de como aprender com as gerações passadas, que evoluem buscando soluções para obter o mínimo ou máximo global de uma função objetivo.

Os algoritmos evolutivos, são mecanismos de busca computacional baseados na evolução biológica e adaptação de espécies de animais. Tais modelos computacionais surgiram de estudos como o de [41] de evolução das espécies, que apresenta um apanhado de resultados de modificações e adaptação por meio de seleção natural, onde o mais apto sobrevive e fazem parte da área da computação conhecida como inteligência artificial.

Esses algoritmos buscam tratar estruturas de objetos abstratos de uma população, muitos deles baseados nessa vertente evolutiva foram criados, o mais famoso é o

algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*) proposto por [9], que usa operadores inspirados na variação genética e pela seleção natural.

Outro exemplo de algoritmo de otimização é o enxame de partículas (PSO - *Particle Swarm Optimzation*) que foi desenvolvido por [10] que é modelado pelo movimento de um bando de pássaros ou de um cardume de peixes quando em busca de alimento. Seguindo a mesma filosofia, pode-se citar também a otimização por colônias de formigas (ACS - *Ant Colony System*), proposto por [11] que é inspirado pelo comportamento das formigas em busca de alimento depositando feromônio no caminho por onde passam. Além desses, podemos citar o algoritmo de busca Cuco (COA - *Cuckoo Optimization Algorithm*) proposto por [42] que é inspirado no comportamento de uma família de aves chamada Cuco. A base deste algoritmo é a busca de ninhos para a criação dos filhotes de cucos.

Segundo [43], as principais vantagens de utilizar esses tipos de algoritmos de otimização são:

- São robustos em relação a mudanças dinâmicas, métodos tradicionais de otimização não são robustos a mudanças dinâmicas no ambiente e eles exigem uma reinicialização completa para fornecer uma solução;
- Possuem uma ampla aplicabilidade em diferentes tipos de problemas; eles podem ser aplicados a quaisquer problemas que possam ser formulados como otimização de uma função fitness;
- Hibridização com outros métodos, esses algoritmos podem ser combinados com métodos tradicionais de otimização e até mesmo com outros métodos evolutivos;
- São capazes de resolver problemas sem soluções por métodos tradicionais e sem expertise humana.

Devido as suas características os algoritmos evolucionários têm sido aplicados a problemas complexos de diferentes áreas do conhecimento, podem-se citar [44], [45], [46], [47], [48], [49] e [50]. Na engenharia nuclear apresentam resultados de destaque quando aplicados a problemas como: otimização da recarga do combustível nuclear [7], ao problema de identificação de acidentes [27], otimização da malha de metodologias de campo de vento de sistemas de monitoração [51], otimização de estruturas da vareta do elemento combustível [52], entre outros [15], [13], [53] e [54].

3.2 Algoritmo de otimização COA - *Cuckoo Optimization Algorithm*

Muitas espécies de pássaros possuem a mesma abordagem de reprodução e criação dos seus filhotes. Diferente dos mamíferos, que são capazes de carregar suas crias em seus

corpos enquanto crescem, os pássaros colocam ovos, que servem como uma incubadora com uma casca rígida e forte, em ninhos fixos.

O tamanho do ovo gera dificuldades para a fêmea das espécies carregar mais do que um único ovo de cada vez, exigindo uma maior energia para o transporte. Com isso, a fêmea então escolhe pontos fixos no alto das árvores para depositar seus ovos, mas encontrar um lugar para colocar e chocar seus ovos com segurança até o momento da independência dos filhotes é um desafio que as aves têm resolvido de formas extremamente inteligentes. Muitas aves constroem ninhos isolados e discretos, escondidos no interior da vegetação para evitar serem detectados por predadores.

Há também espécies que dispensam o modo de vida de ninhos fixos e recorrem à inteligência de usar ninhos de outros pássaros para a criação dos seus filhotes, eles são conhecidos como parasitas de ninhada. O cuco é o "parasita de ninhada" mais conhecido do mundo. Sua estratégia de reprodução envolve furtividade e velocidade. A fêmea da espécie se dirige ao ninho de um possível "hospedeiro" e retira alguns dos ovos já existentes ali e coloca um dos seus ovos, tudo isso acontece em menos de dez segundos [55].

Algumas espécies conseguem diferenciar os seus ovos dos ovos do "parasita", podendo jogar fora o ovo estranho ali depositado ou até mesmo abandonando completamente o ninho ali presente e o construí-lo em outro local [56].

Estudos realizados por [42] propuseram um algoritmo de otimização baseado no comportamento natural dos cucos, e depois aperfeiçoado por [43], chamado, *Cuckoo Optimization Algorithm* (COA). Similarmente a outros métodos evolutivos, o COA começa com uma população inicial. A população de cuco, em diferentes sociedades, é de dois tipos: cucos maduros e ovos de cuco. Os cucos maduros põem ovos em alguns ninhos de outras aves e se esses ovos não forem descobertos eles crescem e se tornam um cuco maduro.

O esforço para sobrevivência dos ovos de cuco constitui a base do algoritmo. Durante a competição de sobrevivência, alguns dos cucos, ou seus ovos, morrem. As sociedades sobreviventes do cuco migram para um ambiente melhor e começam a se reproduzir e pôr ovos. As características ambientais e a migração dos grupos dos cucos os levam a convergir e encontrar o melhor ambiente para reprodução. Esse melhor ambiente é o máximo global da função *fitness* do problema.

Antes de descrever o algoritmo como um todo, precisamos definir algumas regras já propostas por [42] na criação do método de busca:

- Cada ninho hospedeiro só pode conter um ovo de cuco por vez e os ninhos são escolhidos aleatoriamente;
- O ninho com a melhor função objetivo deve continuar nas próximas gerações;

- Uma fração de ninhos são descartados com uma probabilidade $p_a \in [0, 1]$, em busca de novos ninhos no espaço.

Por convenção e simplificação, cada ovo de cuco representa uma solução para o problema, a qualidade ou adequação a uma solução pode ser simplesmente proporcional ao valor da função objetivo. O objetivo principal é gerar ovos com soluções potencialmente melhores para substituir as soluções que não apresentam bons resultados. Neste trabalho, cada ninho possui apenas um ovo, logo todo ninho é uma solução para o problema em questão.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma do funcionamento simplificado de como o algoritmo proposto atua em qualquer tipo de problema. Um cuco é iniciado, o mesmo deposita seus ovos em ninhos de aves hospedeiras, aqueles que têm melhor desempenho em se camuflar em meio aos outros membros do ninho têm o melhor desempenho e podem crescer fortes e voar em busca de comida. Os ovos detectados, pelos pássaros hospedeiros, são descartados ou abandonados no ninho, estão sujeitos a possuir um pior desempenho para o crescimento [43].

3.2.1 Geração do Espaço de Busca

Problemas de otimização resolvidos por algoritmos genéticos necessitam de um cromossomo, um vetor de valores binários que é composto pelas soluções do problema. No cuco, esse vetor de soluções é conhecido como ninho, ou habitat, onde esse vetor possui dimensão igual à dimensão do espaço de busca. Em um problema N-dimensional, teríamos um vetor representando a posição do ninho nesse espaço de tamanho N, ou seja, uma possível solução do problema. O ninho então é definido pela Eq. (3.1), onde cada componente do vetor é um número real.

$$Ninho = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N] \quad (3.1)$$

onde x_i é a coordenada i de um ninho específico no espaço de busca, cada ninho possui apenas um ovo, e sua posição no espaço de busca, é considerada uma solução para o problema.

O desempenho de um determinado ninho é medido avaliando a função objetivo f_O , que pode ser definida pela Eq. (3.2).

$$f_O(Ninho) = f_O(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (3.2)$$

O algoritmo proposto busca sempre minimizar os custos da função objetivo, ou seja, um melhor desempenho significa que o valor da função objetivo deve ser menor. Então,

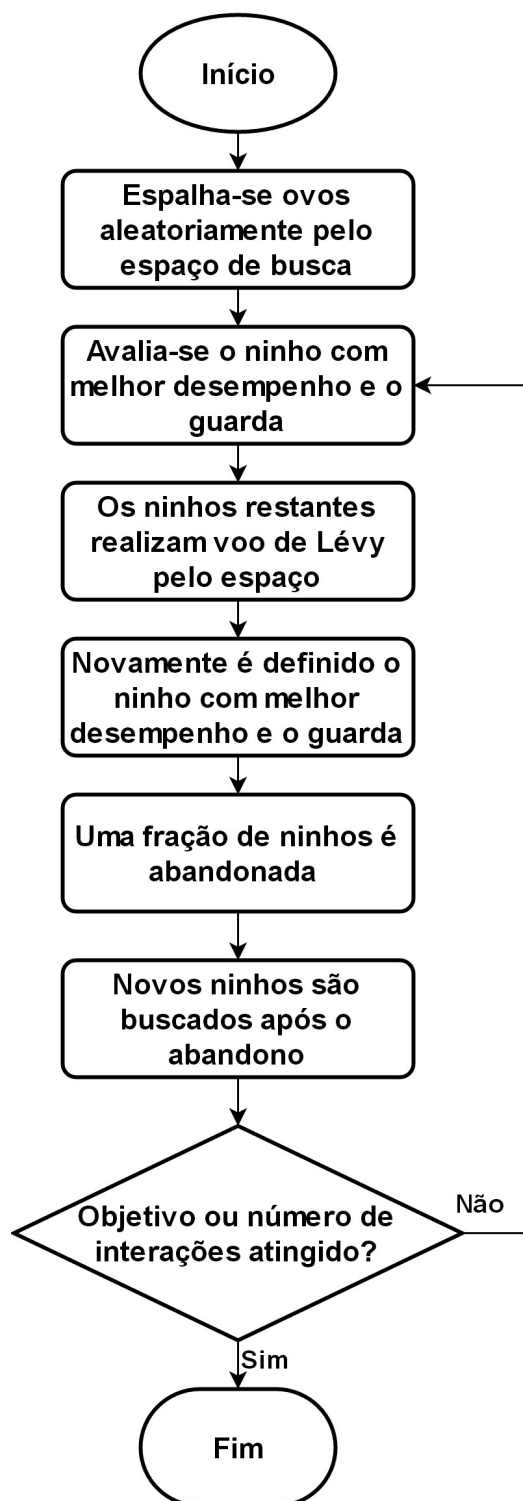


Figura 3.1: Fluxograma do Funcionamento do Algoritmo Cucu

para problemas de maximização, é adotada uma função "custo" (f_C), definida pela Eq. (3.3).

$$\begin{aligned} f_C(Ninho) &= f_C(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \\ &= -f_O(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para iniciar o algoritmo de otimização, uma matriz de ninhos com dimensão $N_{\text{ninhas}} \times N$ é gerada. Ao gerar estas soluções, é então escolhido um cuco i em um tempo t , as novas soluções são obtidas realizando o voo de Lévy, apresentado na Eq. (3.4).

$$Ninho_i^{(t+1)} = Ninho_i^{(t)} + \alpha \times \text{Lévy} \quad (3.4)$$

onde, Lévy é o passo da distribuição calculado pela Eq. (3.14) e $\alpha > 0$ é apenas um multiplicador de escala, que depende do problema em questão, na maioria dos casos podemos usar $\alpha = 1$ [42].

3.3 Voo de Lévy

Na natureza, muitos animais buscam alimento de forma aleatória, ou quase que aleatória; estudos de [57] mostram que as moscas-das-frutas ou *Drosophila melanogaster* exploram os arredores usando uma série de trajetórias pontuais e em escala. De forma geral, o voo de Lévy é um salto aleatório cujo comprimento do passo é extraído da distribuição de Lévy, aplicado para simular o voo do cuco no COA, que pode ser simplificada em uma lei de potência $L(s) \sim u^{-\lambda}$, onde $1 < \lambda \leq 3$ [2].

A distribuição de Lévy é definida pela Eq. (3.5).

$$L(s, \gamma, \mu) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \exp\left[-\frac{\gamma}{2(s-\mu)}\right] \frac{1}{(s-\mu)^{3/2}}, & 0 < \mu < s < \infty \\ 0 & \text{C.C.,} \end{cases} \quad (3.5)$$

onde $\mu > 0$ é o passo mínimo possível e γ é um fator de escala dependente do problema. Fazendo $s \rightarrow \infty$, obtemos a Eq. (3.6), que é um caso especial de generalização da distribuição de Lévy.

$$L(s, \gamma, \mu) \approx \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \frac{1}{s^{3/2}} \quad (3.6)$$

De forma geral, a distribuição de Lévy pode ser definida com uma transformada de Fourier na forma apresentada na eq. 3.7.

$$F(k) = \exp[-\alpha|k|^\beta], \quad 0 < \beta \leq 2, \quad (3.7)$$

onde α é um parâmetro de escala. A inversa da Eq. (3.7) não pode ser obtida analiticamente, logo é necessário estudar alguns casos especiais. O primeiro é quando $\beta = 2$, caso em que obtemos a Eq. (3.8), que possui como função inversa uma distribuição Gaussiana [58].

$$F(k) = \exp[-\alpha k^2] \quad (3.8)$$

Outro caso especial é quando $\beta = 1$, obtemos a Eq. (3.9), que corresponde a uma distribuição de Cauchy [59], como a da Eq. (3.10).

$$F(k) = \exp[-\alpha|k|] \quad (3.9)$$

$$p(x, \gamma, \mu) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{\gamma^2 + (x - \mu)^2}, \quad (3.10)$$

onde μ é um parâmetro de localização e γ é um fator de escala para controle da distribuição.

Para o caso geral apresentado na Eq. (3.7), o cálculo da integral inversa é definida na Eq. (3.11).

$$L(s) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos ks \exp[-\alpha|k|] dk \quad (3.11)$$

Quando é feito com que $s \rightarrow \infty$, obtêm-se a Eq. (3.12).

$$L(s) \rightarrow \frac{\alpha\beta\Gamma(\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\pi|s|^{1+\beta}}, \quad s \rightarrow \infty, \quad (3.12)$$

onde $\Gamma(z)$ é a função gama definida pela Eq. (3.13), nos casos de $z = n$, onde n é um número inteiro, fazemos $\Gamma(n) = (n - 1)!$.

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \exp(-t) dt \quad (3.13)$$

O voo de Lévy se resume na geração de números aleatórios e em escolher uma direção aleatória e gerar, também aleatoriamente, o passo a ser dado. A Figura 3.2 apresenta um caminho característico escolhido por um voo aleatório com cinquenta passos consecutivos em um espaço bidimensional. Há diversas maneiras de reproduzir o voo, uma das mais eficientes foi proposto por [60], que se baseia em uma distribuição simétrica, ou seja, os passos dados podem ser tanto positivos quanto negativos ao redor de um ponto no espaço.

O comprimento do passo s pode ser calculado pela Eq. (3.14), onde u e v são modelados por uma distribuição normal, com $u \sim N(0, \sigma_u^2)$ e $v \sim N(0, \sigma_v^2)$,

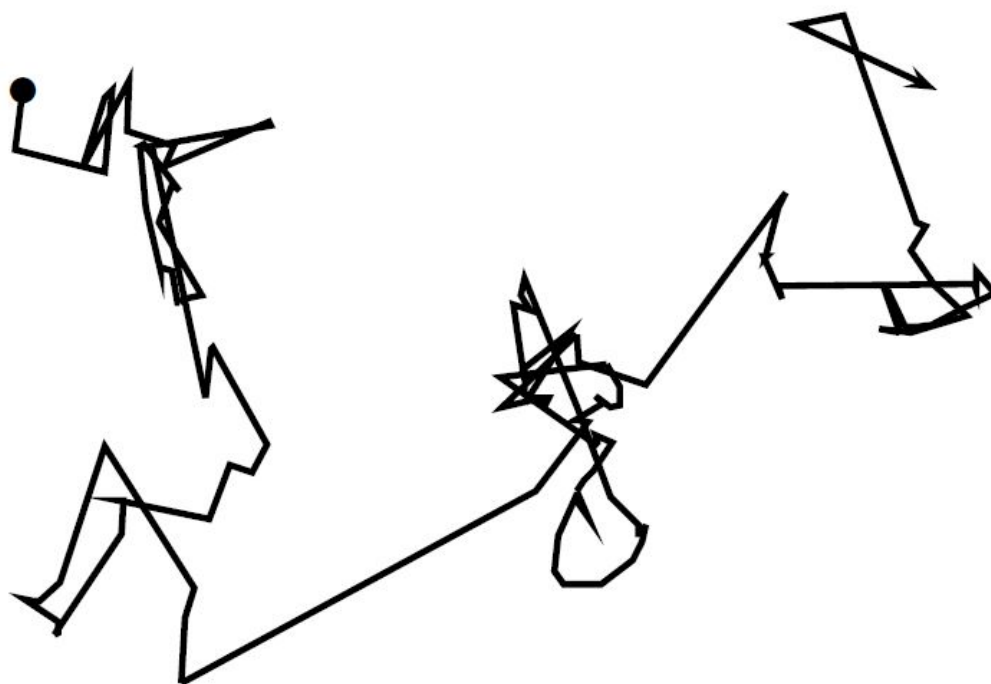


Figura 3.2: Voo de Lévy com 50 passos consecutivos partindo da origem [2]

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (3.14)$$

com

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin \pi\beta/2}{\Gamma[(1 + \beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \sigma_v = 1 \quad (3.15)$$

Estudos mostram que os voos de Lévy podem maximizar a eficiência das pesquisas de recursos em ambientes incertos. De fato, muitos animais, como macacos e albatrozes, usam os mesmos padrões para conseguir se alimentar. A Figura 3.3 apresenta o pseudocódigo de funcionamento no algoritmo.

3.4 Cuco Aplicado a Funções de Teste

Para avaliar o potencial de otimização do COA, um algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem Python proposta por [61], e testado em quatro funções multimodais conhecidas na literatura. São elas, Schaffer [3], Michalewicz [4], Esfera [5] e Rastringin [6], muito utilizadas na literatura, para testes de convergência de algoritmos.

```

Início:
  Função objetivo:  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ ;
  Gerar a população inicial:
    Para  $N$  ninhos, gerar  $x_j$ , com coordenadas aleatórias;
    Guardar  $x_j$  em  $X$ ;
  Avaliar a função objetivo para cada  $x_j$  em  $X$ ;
  Definir  $x_{best}$ ;
While ( $t < \text{Gerações máximas}$ ) ou ( $\text{Critério de parada atendido}$ ):
  Voo de Lévy é realizado pelos ninhos diferentes do  $x_{best}$ ;
  Para cada  $x_j$  em  $X$ :
    Avaliar a função objetivo para cada  $x_j$  em  $X$ ;
    If ( $f(x_j) < f(x_{best})$ ):
       $x_{best} = x_j$ ;
    end
  Descartar um fração de ninhos ( $p_0$ ) em  $X$ ;
  Gerar novos ninhos com coordenadas aleatórias em  $X$ ,
  para os ninhos que foram descartados;
  Para cada  $x_j$  em  $X$ :
    Avaliar a função objetivo para cada  $x_j$  em  $X$ ;
    If ( $f(x_j) < f(x_{best})$ ):
       $x_{best} = x_j$ ;
    end If
end While
  Pós processamento e visualização dos resultados;
Fim

```

Figura 3.3: Pseudocódigo do COA

3.4.1 Função Schaffer

Schaffer é uma função bidimensional que apresenta muitos mínimos locais com um mínimo global localizado na origem, $x = (x_1, x_2) = (0.0, 0.0)$. Sua forma analítica é definida na Eq. (3.16) e sua representação gráfica é mostrada na Figura 3.4.

$$f(x_1, x_2) = 0,5 + \frac{\text{sen}^2(\sqrt{x_1 + x_2^2}) - 0,5}{(1 + 0,001(x_1^2 + x_2^2))^2} \quad (3.16)$$

Neste trabalho, foram realizados dez testes com a função Schaffer bidimensional, com espaço de busca limitado entre $x \in [-100, 100]$.

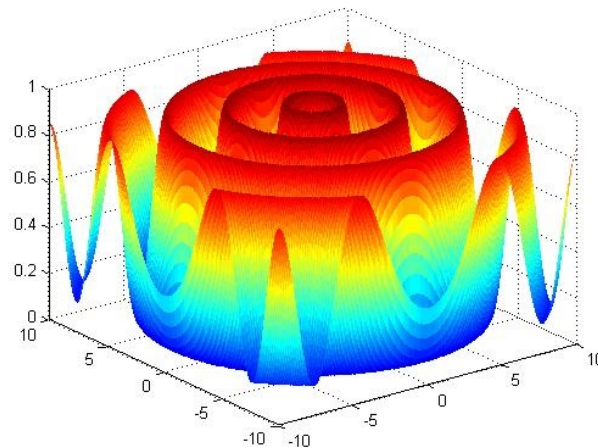


Figura 3.4: Função Schaffer [3]

3.4.2 Função Michalewicz

Outra função muito usada na literatura para testes de implantação é a Michalewicz, uma função bidimensional, com mínimo global localizado aproximadamente no ponto $x \approx (2.20319, 1.57049)$, com valor da função, $f(x) \approx -1.8013$. A eq. 3.17, apresenta a função, assim como a sua forma mostrada na Figura 3.5.

$$f(x_1, x_2) = -\sin(x_1) \sin^{2m} \left(\frac{x_1^2}{\pi} \right) - \sin(x_2) \sin^{2m} \left(\frac{2x_2^2}{\pi} \right) \quad (3.17)$$

Assim como na função Schaffer, foram realizados dez testes com a função Michaelwicz, com espaço de busca limitado entre $x \in [-100, 100]$.

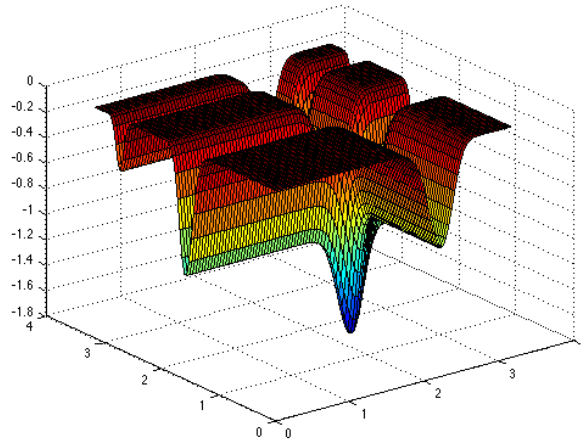


Figura 3.5: Função Michalewicz [4]

3.4.3 Função Esfera

A função Esfera é uma função contínua em todo o seu domínio, convexa e simétrica. Por não possuir restrições quanto ao número de variáveis consideradas, sua complexidade aumenta ao passo que o número de parâmetros considerados (n) aumenta, ou seja, se a sua dimensão aumenta, mais demorado fica o tempo de cálculo necessário para obter a solução. Sua representação analítica é dada pela Eq. (3.18) e sua forma é apresentada na Figura 3.6. A função esfera possui um mínimo global localizado na origem, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) = (0.0, 0.0, \dots, 0.0)$, com o valor da função $f(x) = 0.0$.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3.18)$$

Neste trabalho, foram realizados testes em funções esferas de duas dimensões diferentes, o primeiro teste com $n = 10$ e o segundo com $n = 30$, com espaço de busca limitado entre $x \in [-100, 100]$.

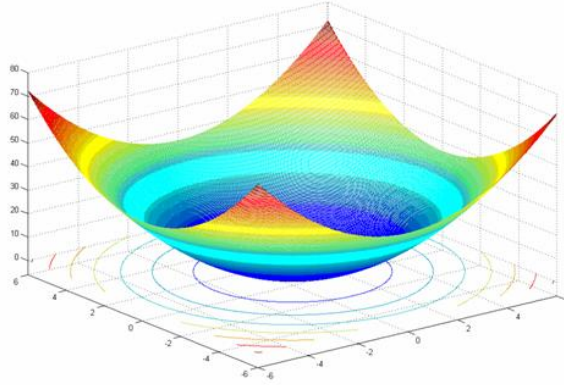


Figura 3.6: Função Esfera [5]

3.4.4 Função Rastrigin

A função Rastrigin é baseada na função Esfera com a adição de um termo cossenoidal, produzindo muitos mínimos locais em todo o espaço, tornando então essa função não-linear e multimodal. Assim como a função Esfera, o aumento da dimensão da Eq. (3.19) torna a solução do problema bem mais complicada. A representação gráfica da função pode ser observada na Figura 3.7.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10) \quad (3.19)$$

Assim como na função Esfera, foram realizados testes com duas dimensões diferentes, o primeiro teste com $n = 10$ e o segundo com $n = 30$, com espaço de busca limitado entre $x \in [-100, 100]$.

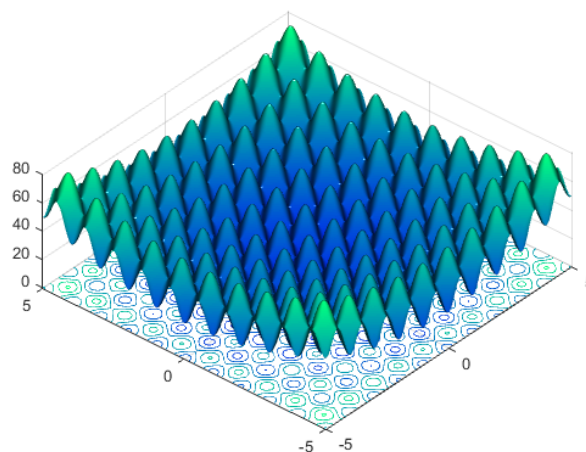


Figura 3.7: Função Rastrigin [6]

3.4.5 Resultados dos Testes

Todos os resultados foram gerados considerando um número total de 15 ninhos, com $p_a = 0,2$ e número total de gerações igual a 5000.

Na Tabela 3.1, podemos observar os resultados obtidos, onde Dim é a dimensão da função, nesse caso $Dim = 2$, $Gmax$ é o número máximo de gerações, $Gbest$ a geração no qual o melhor valor para função objetivo foi encontrado e $Desv.Pad.$ é o desvio padrão referente aos dez testes feitos.

Tabela 3.1: Resultados Encontrados

Função	Dim	Gmax	Gbest	Melhor	Média	Desv.Pad.
Schaffer	2	5000	290	$0,0 \cdot 10^0$	$0,0 \cdot 10^0$	$0,0 \cdot 10^0$
Michalewicz	2	5000	19	$-1,8 \cdot 10^0$	$-1,8 \cdot 10^0$	$0,0 \cdot 10^0$
Esfera	10	5000	53	$1,1 \cdot 10^{-161}$	$6,1 \cdot 10^{-159}$	$6,3 \cdot 10^{-160}$
	30	5000	4987	$8,2 \cdot 10^{-40}$	$2,9 \cdot 10^{-38}$	$5,0 \cdot 10^{-38}$
Rastrigin	10	5000	2807	$0,0 \cdot 10^0$	$9,0 \cdot 10^{-1}$	$7,3 \cdot 10^{-1}$
	30	5000	4247	$1,3 \cdot 10^1$	$3,1 \cdot 10^1$	$2,4 \cdot 10^1$

Observa-se, na Tabela (3.1), que o COA obteve resultados satisfatórios nos problemas de otimização das funções usadas, encontrando o resultado ótimo, no caso das funções Schaffer, Michaelwicz e a Rastrigin de décima ordem. Nos casos das funções Esfera, tanto de ordem dez quanto de ordem trinta, e na função Rastrigin de ordem trinta. Podemos observar uma proximidade do melhor resultado no caso da Esfera de ordem dez, considerando que a ordem de grandeza do resultado é muito pequena. É notado que a única função que ficou longe da convergência do resultado ótimo foi a função Rastrigin de ordem trinta que apresentou uma ordem de grandeza muito elevada em relação às outras funções, o que comprova a sua complexidade de encontrar um mínimo global e a necessidade de adaptação dos parâmetros do cuco.

As Figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 apresentam os gráficos referentes aos resultados apresentados na Tabela 3.1 e mostram o comportamento da solução ótima encontrada.

Podemos observar na Figura 3.8 que a busca cuco converge para um valor intermediário, próximo ao resultado ótimo, e vinha se mantendo com esse resultado até próximo da interação 250, mas por conta do abandono dos ninhos, referente à probabilidade p_a , que funciona como uma exploração do espaço busca, o algoritmo pode então encontrar o resultado ótimo na interação 290.

Na Figura 3.9 podemos observar um caso de convergência rápida do algoritmo COA, pois antes da décima interação um resultado próximo ao mínimo já foi encontrando sem

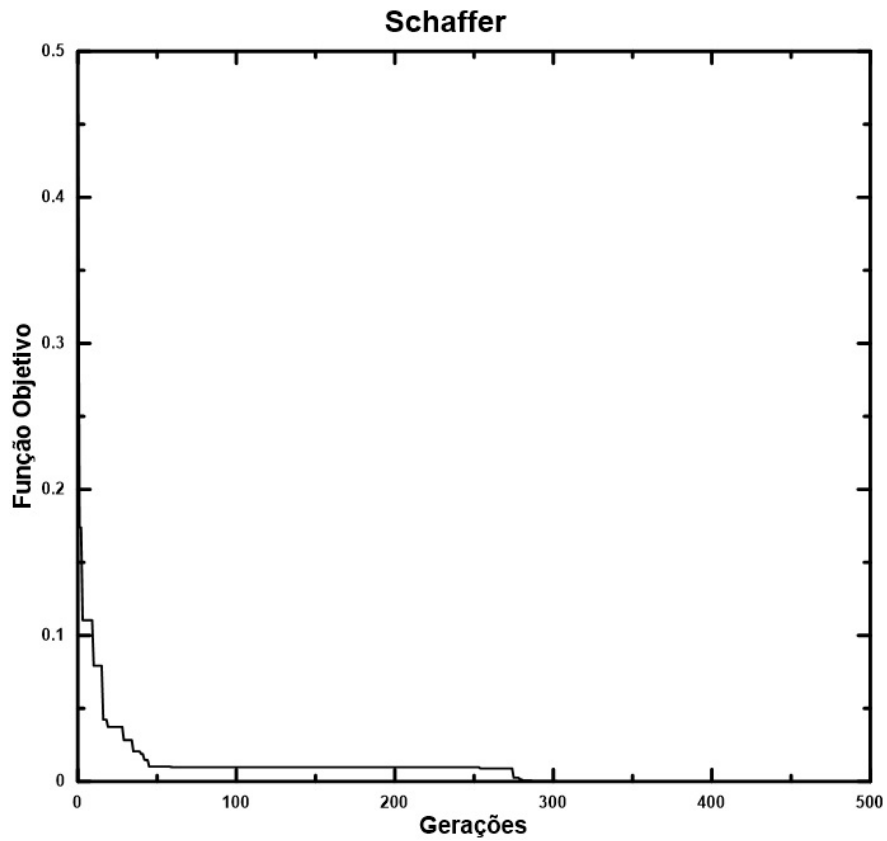


Figura 3.8: Melhor Resultado para Função Schaffer.

grandes dificuldades.

Nota-se, também, nos casos apresentados na Figura 3.11, referentes à função de Rastrigin, diferentemente das outras funções sua convergência é mais demorada, no caso da função de ordem dez, a convergência se dá próximo à geração 2000. Para o caso de ordem trinta, mesmo executando o algoritmo até a última geração proposta o resultado obtido fica longe, em ordem de grandeza, do valor ótimo. Neste caso, um ajuste nos parâmetros do COA poderia ser uma forma de verificar o comportamento do algoritmo, o que não foi feito neste trabalho, devido ao fato do COA ter mostrado resultados satisfatórios nas outras funções testadas.

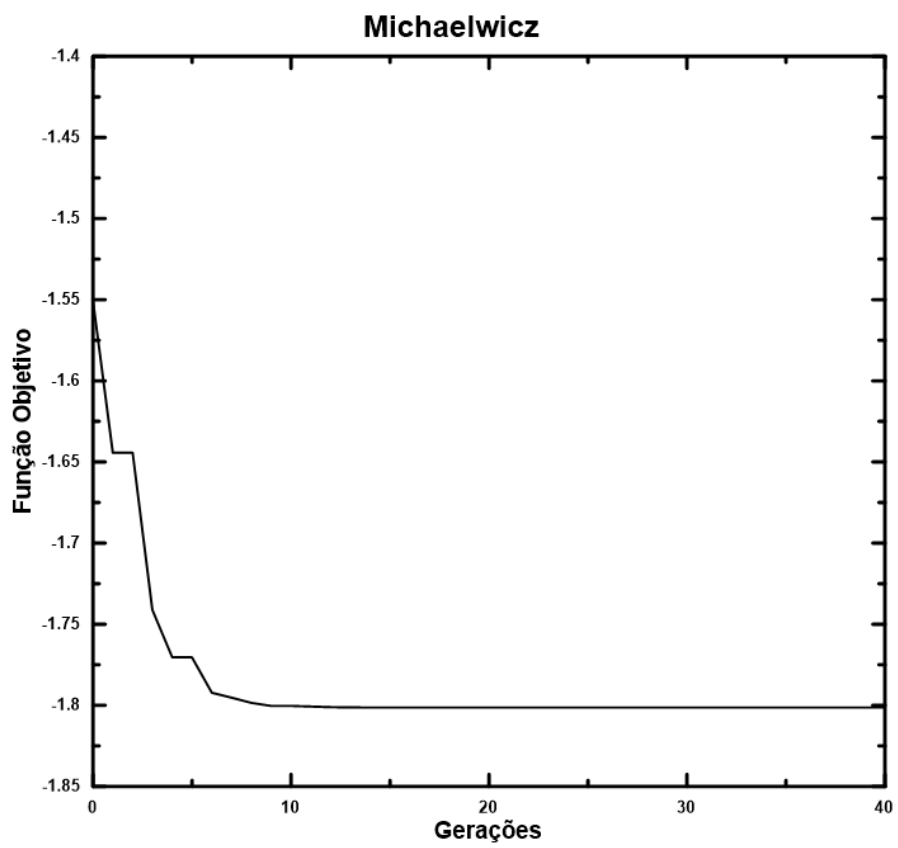


Figura 3.9: Melhor Resultado para Função Michalewicz.

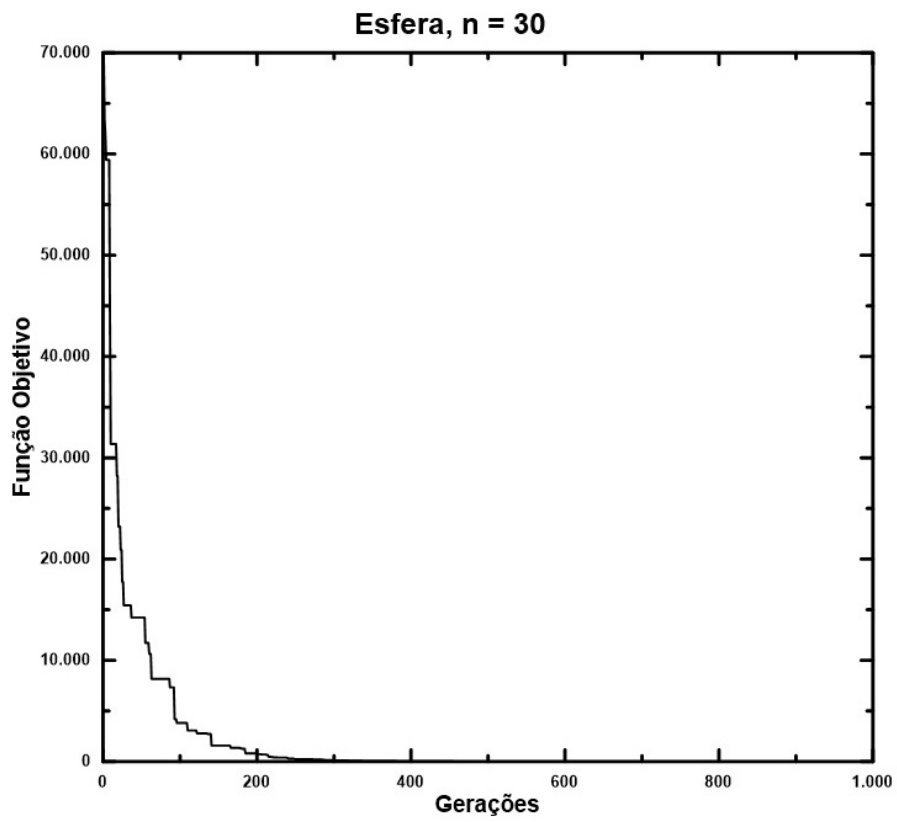
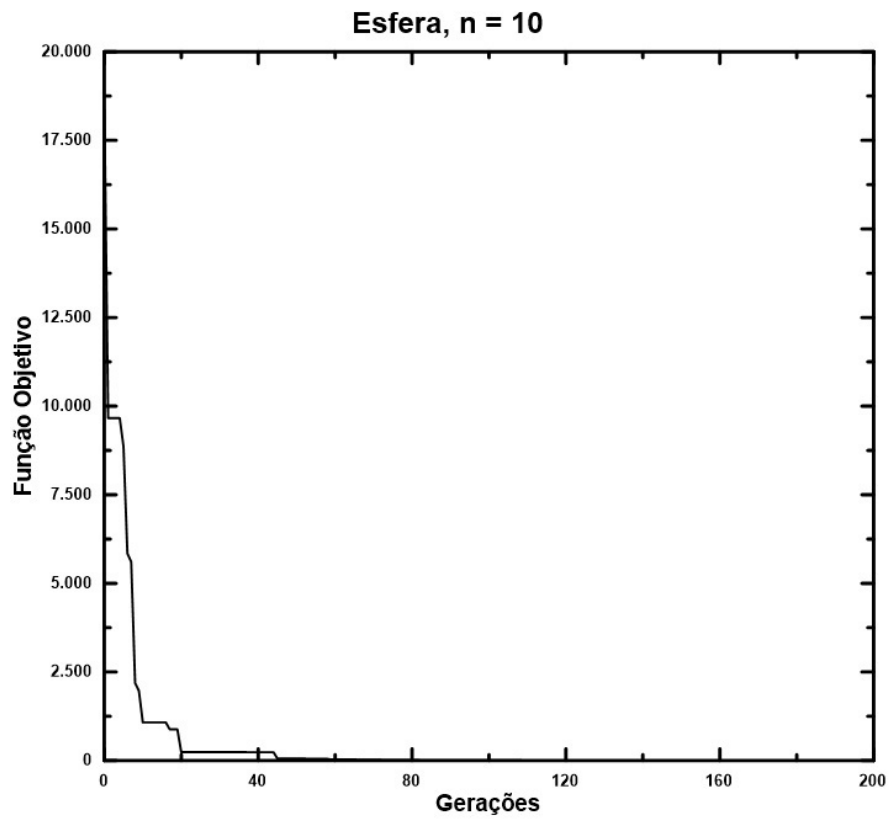


Figura 3.10: Melhores Resultados para Função Esfera.

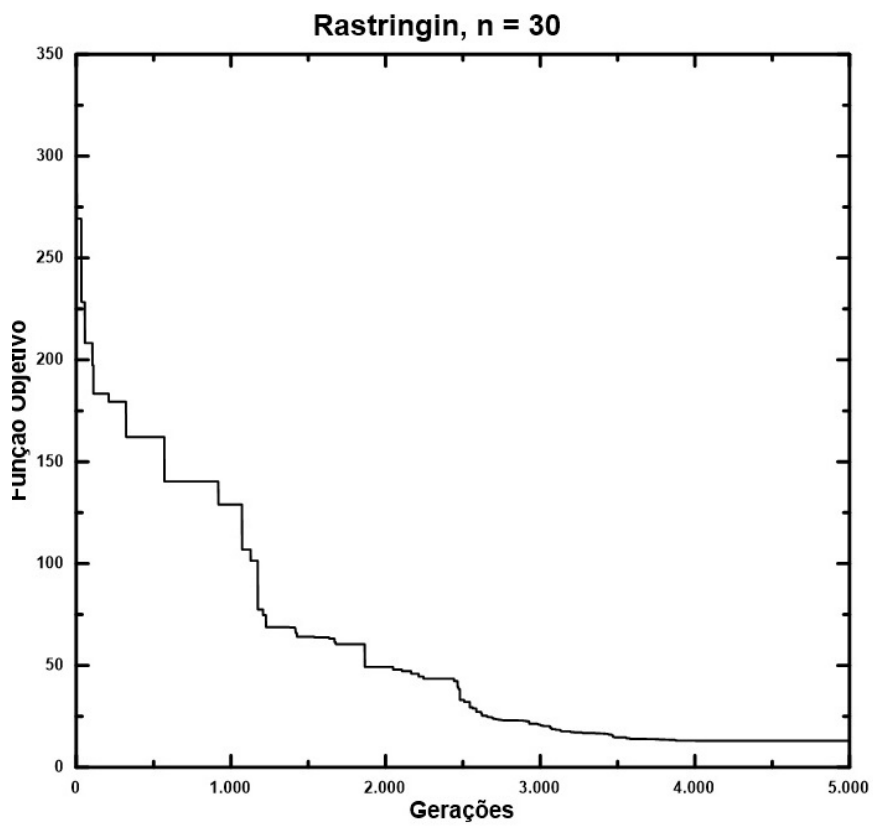
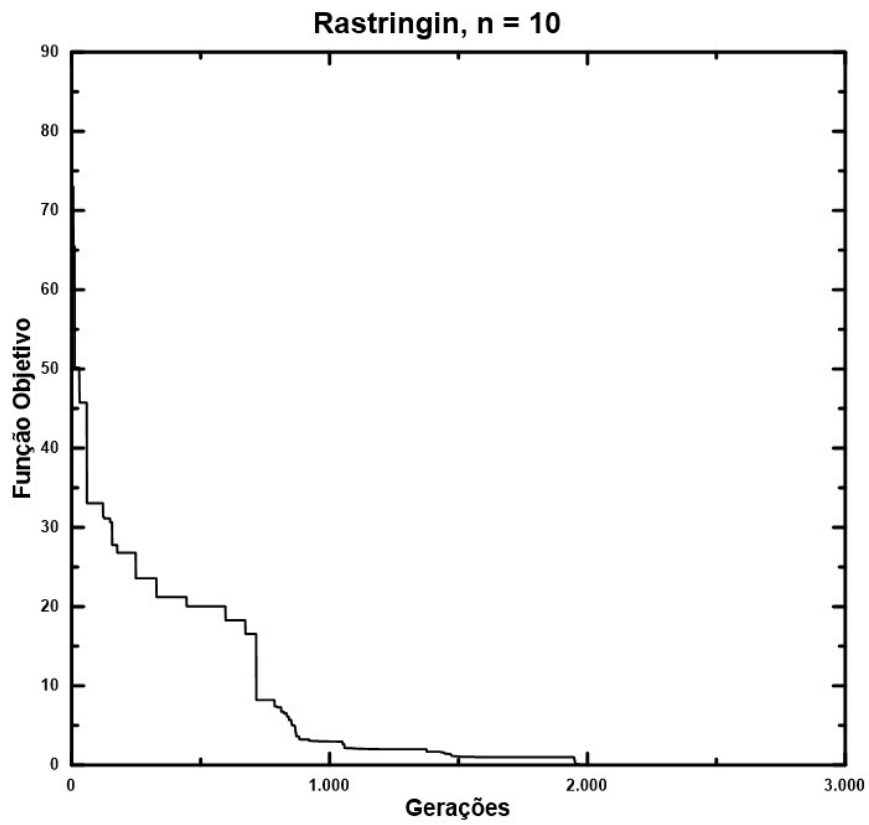


Figura 3.11: Melhores Resultados para Função Rastringin.

Capítulo 4

Cuco Aplicado ao Problema de Identificação de Acidentes

Neste capítulo, será apresentado o modelo de classificação proposto, avaliando 4 estados, sendo eles, NORMAL, LOCA, SGTR e Blackout. Em seguida, os resultados obtidos com o modelo proposto.

4.1 Modelo de Identificação de Acidentes Proposto

O modelo de classificação proposto se baseia na distância euclidiana entre o vetor de variáveis do evento anômalo, em um instante t , e o vetor centroide das variáveis dos acidentes/transientes de base projeto selecionado, assim a menor distância indica qual a atual condição da planta em relação aos eventos avaliados. Cada vetor encontrado pelo modelo, é considerado aquele que melhor representa os estados que estão sendo avaliados. Com isso, toda amostra de um estado avaliado estará sempre mais próxima espacialmente do vetor gerador de um estado específico, tendo assim uma semelhança entre a amostra e o vetor. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de classificação. O modelo original deste modo de classificação foi proposto por [62], que foi capaz de classificar condições de acidentes de base projeto, postulados para usina nuclear Angra 2.

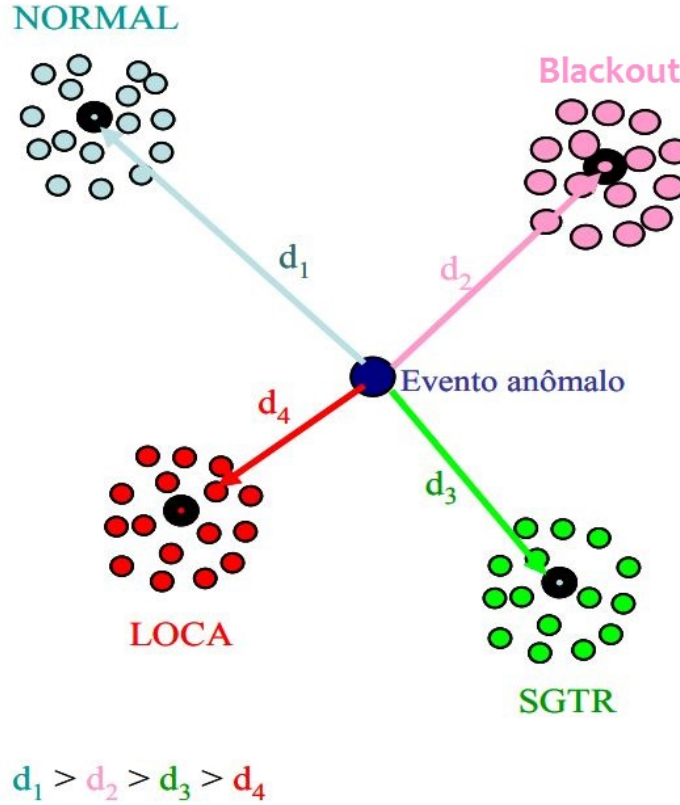


Figura 4.1: Exemplo do Processo de Classificação [7]

Para otimização do problema, foi utilizado o algoritmo COA que tem a tarefa de encontrar a melhor posição para os vetores protótipos de cada estado possível da planta (SGTR, Blackout ou Normal), fazendo com que o número de classificações corretas seja sempre a maior possível. Sendo assim, esses vetores característicos gerados pelo COA são considerados equivalentes aos vetores de Voronoi [63], dado que, aquele vetor que melhor representa um evento, possui sua posição espacial mais próxima de um evento específico do que qualquer outro vetor gerador.

4.2 Variáveis de Estados

Todos os eventos abordados nesse trabalho fazem parte de uma análise de acidentes postulados para a usina nuclear Angra 2 presentes no Relatório Final de Análise de Acidentes (FSAR). A Tabela 4.1 apresenta o conjunto de variáveis utilizadas para a caracterização de cada evento estudado.

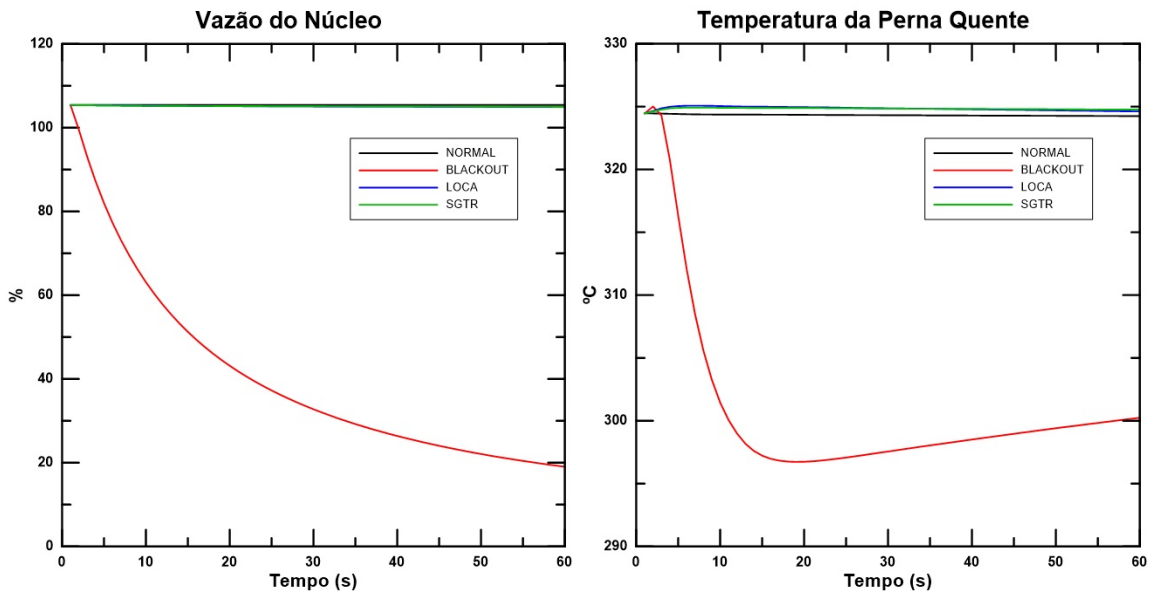
A simulação da variação temporal de cada variável foi realizada por [64], as amostras temporais possuem 61 segundos, onde os primeiros segundos correspondem ao *trip* do reator.

Como apresentado na Tabela 4.1, cada evolução dos acidentes a serem estudados está sendo apresentada graficamente nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, apresentando, então, o

comportamento temporal das 17 variáveis com cada um dos 4 estados possíveis da planta a serem estudados.

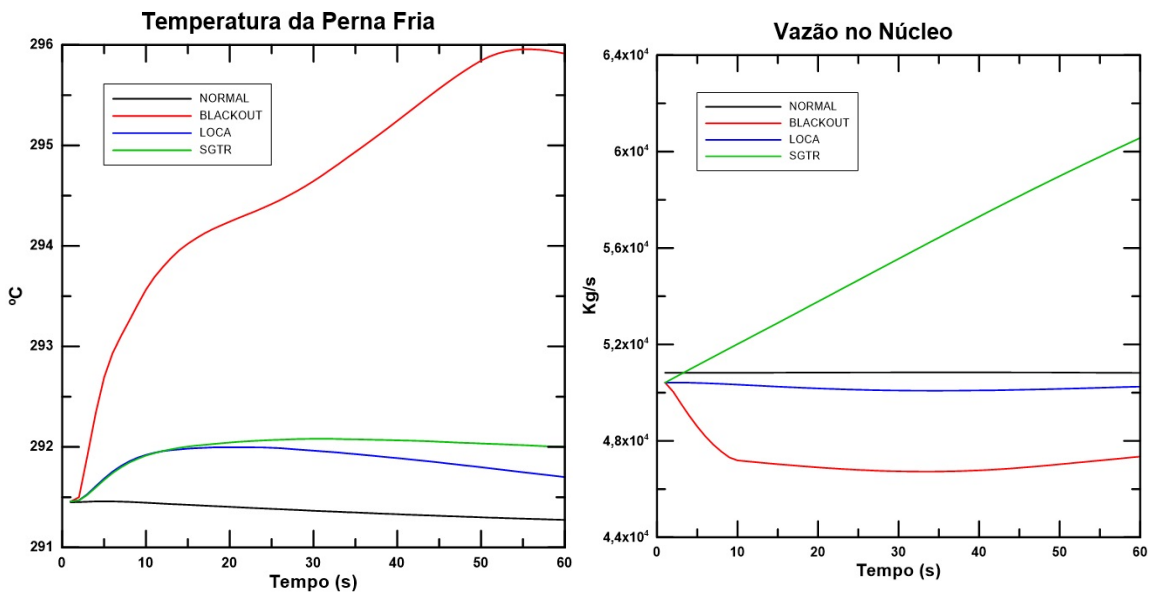
Tabela 4.1: Variáveis de Estado

Variável	Nome da Variável (Unidade)
01	Vazão do Núcleo (%)
02	Temperatura da Perna Quente (°C)
03	Temperatura da Perna Fria (°C)
04	Vazão no Núcleo (Kg/s)
05	Nível no Gerador de Vapor - Faixa Larga (%)
06	Nível no Gerador de Vapor - Faixa Estreita (%)
07	Pressão no Gerador de Vapor (MPa)
08	Vazão de Água de Alimentação (Kg/s)
09	Vazão de Vapor (Kg/s)
10	Vazão de Ruptura (Kg/s)
11	Vazão no Circuito Primário (Kg/s)
12	Tempo (s)
13	Pressão no Sistema Primário (MPa)
14	Potência Térmica (%)
15	Potência Nuclear (%)
16	Margem de Sub-Resfriamento (°C)
17	Nível do Pressurizador (%)
18	Temperatura Média no Primário (°C)



(a) Vazão do Núcleo

(b) Temperatura da Perna Quente



(c) Temperatura da Perna Fria

(d) Vazão no Núcleo

Figura 4.2: Evolução das Variáveis de Estado (1)

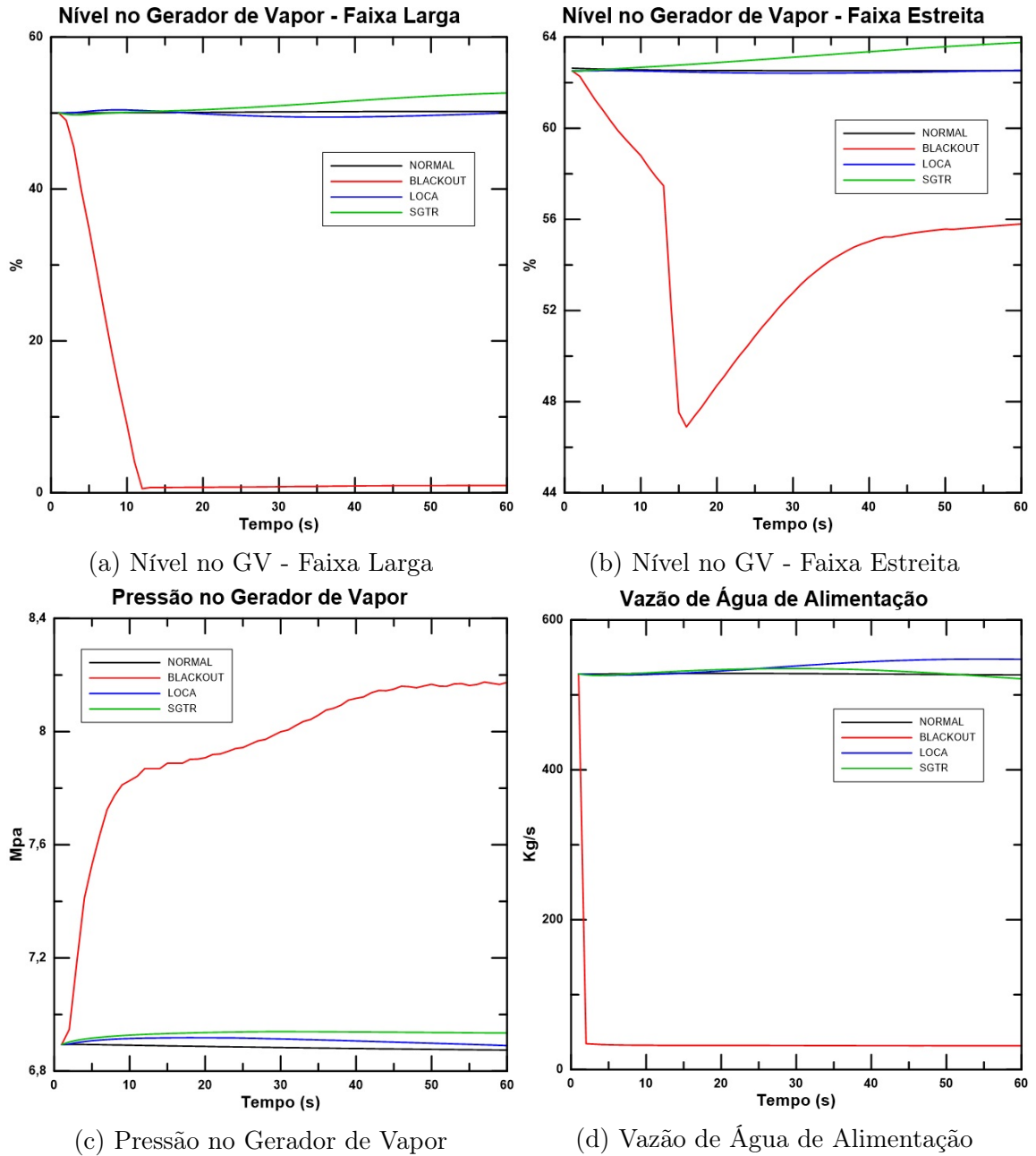


Figura 4.3: Evolução das Variáveis de Estado (2)

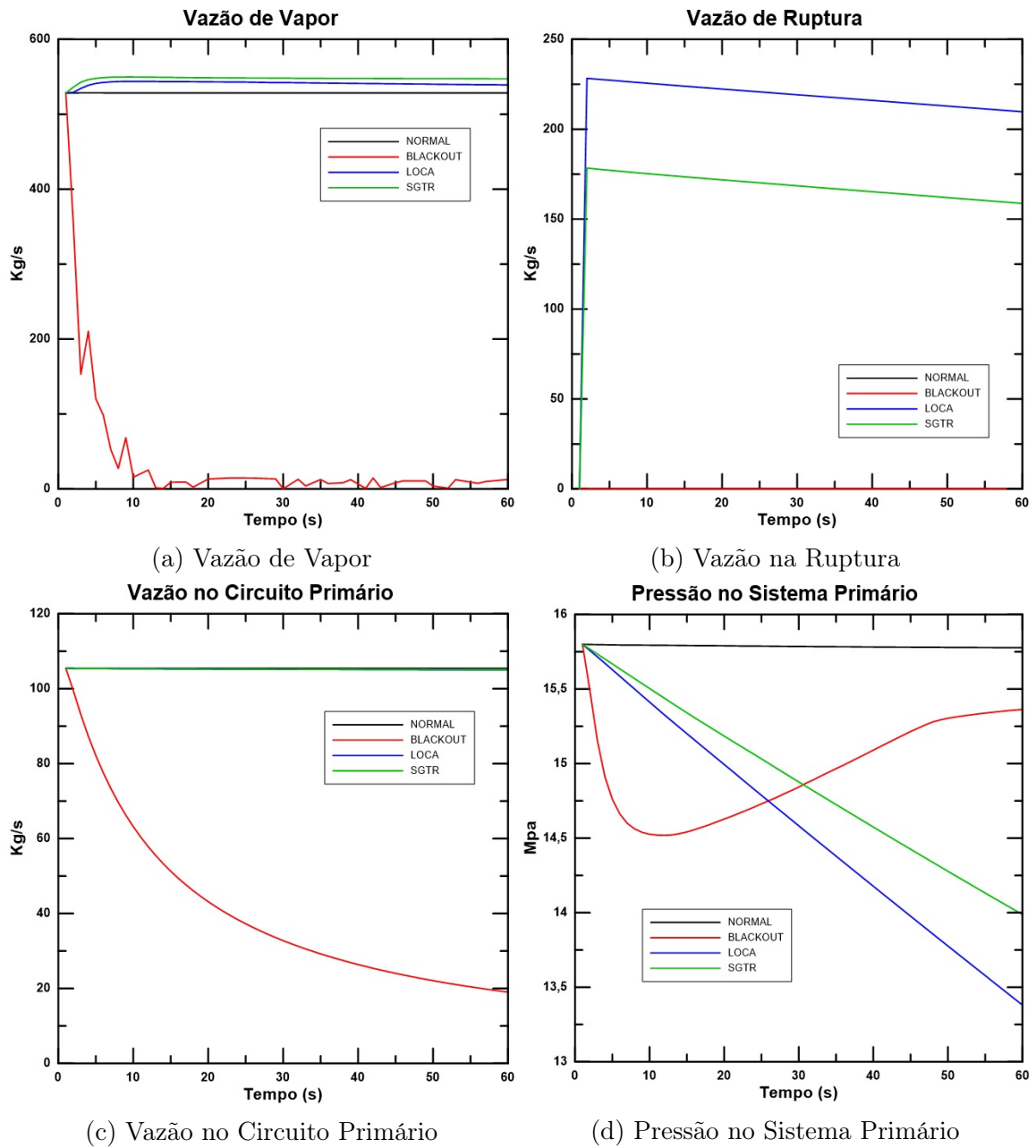
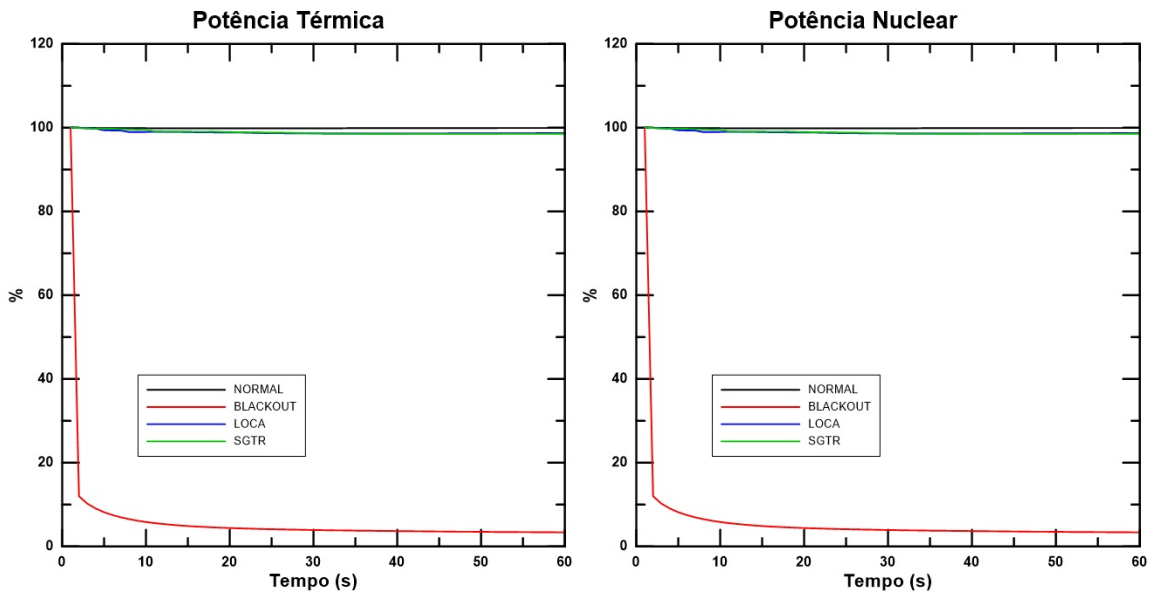


Figura 4.4: Evolução das Variáveis de Estado (3)



(a) Potência Térmica

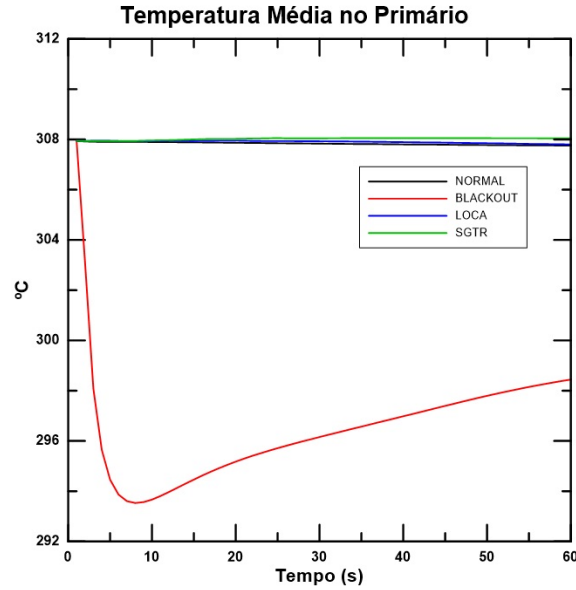
(b) Potência Nuclear



(c) Margem de Sub-Resfriamento

(d) Nível do Pressurizador

Figura 4.5: Evolução das Variáveis de Estado (4)



(a) Temperatura Média no Primário

Figura 4.6: Evolução das Variáveis de Estado (5)

Observa-se, então, pelas Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, que para algumas das variáveis como a vazão do núcleo, temperatura da perna quente, nível no gerador de vapor (faixa larga e faixa estreita), pressão no gerador de vapor, vazão de água de alimentação, vazão de vapor, vazão no circuito primário, potência térmica, potência nuclear e temperatura média no primário, que os acidentes de LOCA e de SGTR possuem comportamentos semelhantes entre si, o que dificulta a identificação por parte do operador de um possível acidente. Já para temperatura da perna fria, vazão no núcleo, vazão na ruptura, pressão no sistema primário, margem de sub-resfriamento e nível do pressurizador, os acidentes de LOCA e de SGTR não possuem comportamentos semelhantes ao da operação normal.

4.3 Modelagem do COA

Neste trabalho, o algoritmo COA foi modelado utilizando um cuco com ninhos que inicialmente foram espalhados aleatoriamente pelo espaço de busca limitado pelo problema em questão, realizando Voos de Lévy, com parâmetro $\beta = 3/2$, proposto por [42], utilizado nas Eqs. (3.14) e (3.15) e com uma fração de ninhos descartadas fixa ($p_a = 0,20$, dado que descartar uma grande quantidade de ninhos, torna o algoritmo totalmente aleatório).

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (3.14)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin \pi\beta/2}{\Gamma[(1 + \beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \sigma_v = 1 \quad (3.15)$$

Cada ninho era considerado uma possível solução para o problema, a função objetivo utilizada possuía o propósito de aumentar o número de classificações corretas. Para este trabalho, eram 236 classificações, um total de três acidentes e um estado de operação normal, cada um com 59 instantes de tempo, levando em conta o descarte dos dois primeiros instantes de tempo para os 4 estados da planta analisados.

Para ponderar as classificações e facilitar a avaliação da função objetivo dado que as variáveis analisadas possuem ordens de grandeza diferentes, foi necessário um pré-tratamento do conjunto de dados, normalizando os valores no intervalo $[0, 1]$, descrito na Equação (4.1).

$$N(x) = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.1)$$

onde, $N(x)$ é o valor normalizado da variável x , $\min(x)$ é o menor valor do conjunto de dados para uma determinada variável e $\max(x)$ é o maior valor.

Os máximos e mínimos utilizados para cada variável do problema, exceto a variável tempo, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Vetor de Máximos e Mínimos

Máximos	1.05389e+02 3.25075e+02 2.95957e+02 6.05665e+04 5.26484e+01
	6.37625e+01 8.17532e+00 5.47827e+02 5.49693e+02 2.28309e+02
	1.05392e+02 1.57668e+01 9.99453e+01 9.99448e+01 4.43995e+01
	5.86520e+01 3.08054e+02
Mínimos	1.90263e+01 2.96727e+02 2.91468e+02 4.67235e+04 5.52878e-01
	4.68936e+01 6.89052e+00 3.18100e+01 -1.04109e+01 0.00000e+00
	1.90316e+01 1.33803e+01 3.35883e+00 3.35883e+00 8.85101e+00
	2.61071e+01 2.93531e+02

4.4 Testes realizados

Nesta seção, cada interação computacional é chamada de geração, cada teste possui variação de parâmetros primordiais (número de ninhos, fração de ninhos descartados p_a e a semente geradora de números aleatórios) para o funcionamento do algoritmo com o objetivo de avaliar como cada modificação de parâmetros influencia o número de gerações necessárias para atingir o objetivo de obter o maior número de classificações corretas. Inicialmente, o cuco espalha uma quantidade fixa de ninhos pelo espaço de busca, após

isso é calculada a *fitness* de cada ninho, o ninho que tem melhor performance é escolhido como "melhor atual". Depois, os cucos dos outros ninhos realizam o voo de Lévy em busca de novos ninhos, nesse processo alguns dos ninhos são descartados e "nasce" aleatoriamente em outro local do espaço de busca. Novamente a função objetivo é avaliada para cada ninho colocado no espaço e um novo "melhor atual" é escolhido. Os testes realizados foram feitos com 4 estados possíveis (LOCA, SGTR, Blackout e Normal), com 59 instantes de tempo, desconsiderando os dois primeiros instantes de tempo, dos 61 simulados na literatura.

4.4.1 Testes com a Quantidades de Ninhos

Todos os testes realizados para a quantidade de ninhos foram realizados com uma fração de ninhos descartados fixa de $p_a = 0,20$ e com uma semente aleatória fixa para todos os dez ensaios realizados.

A Tabela 4.3 mostra os resultados do teste variando a quantidade de ninhos por cuco, entre os valores de 05 ninhos até 50 ninhos.

Tabela 4.3: Teste na Quantidade de Ninhos por Cuco

Número de Ninhos	Número de Acertos	Geração do Maior Acerto	Tempo Necessário (s)
05	236	20	02,53
10	236	14	05,80
15	236	21	09,40
20	236	12	08,20
25	236	11	09,64
30	236	09	09,09
35	236	11	13,13
40	236	04	06,15
45	236	06	09,08
50	236	07	11,74

Observa-se que o COA foi capaz de alcançar o melhor resultado (236 classificações corretas, 4 estados possíveis com 59 instantes de tempo), para qualquer quantidade de ninhos. Nota-se também que o número de ninhos que possui o menor esforço computacional (04 gerações) é o que possui 40 ninhos por cuco. O número de avaliações é um importante parâmetro a ser avaliado em algoritmos de otimização.

Tabela 4.4: Vetor do Melhor Resultado para o Teste de Ninhos

Condição de Operação	Vetor Encontrado
LOCA	0.21139985 0.15960251 0.34909918 0.23018557 0.87487529 0.00000000 0.92534175 0.90439611 0.15319248 1.00000000 0.91117571 1.00000000 0.56411688 0.77472232 0.82201801 0.00000000 0.96529011
SGTR	0.00272844 1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.76665249 0.06170404 0.88624873 0.00000000 0.67538567 0.00000000 0.70260907 0.25482449 0.00000000 0.64573138 1.00000000 0.64500362 1.00000000
Blackout	0.71766629 0.10075943 0.77578122 1.00000000 0.00000000 0.00000000 0.92655131 1.00000000 1.00000000 0.74167646 1.00000000 0.80607777 0.75894895 0.98167056 0.00000000 0.6662671 0.00000000
NORMAL	1.00000000 0.56059347 0.42239342 0.00000000 0.19879698 1.00000000 0.00000000 0.82933274 1.00000000 0.06234363 0.66140789 0.69098761 0.53525022 0.47793031 0.41761257 0.37954662 1.00000000

Na Tabela 4.4, podem-se observar os vetores encontrados, cada valor representado no vetor corresponde ao valor que melhor descreve o estado de uma das variáveis monitoradas. Esse vetor foi obtido pelo teste que teve a melhor performance, para cada estado da planta, lembrando que esses vetores foram os que alcançaram o número máximo de classificações em um menor número de avaliações.

4.4.2 Teste com a Fração de Ninhos Descartados

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para o teste de variação da fração de ninhos descartados (p_a), variando o seu valor de 0,05 até 0,50.

Tabela 4.5: Teste na Fração de Ninhos Descartados

p_a	Número de Acertos	Geração do Maior Acerto	Tempo Necessário (s)
0,05	236	17	06,04
0,10	236	06	02,11
0,15	236	19	05,84
0,20	236	07	02,03
0,25	236	09	02,79
0,30	236	13	04,19
0,35	236	12	03,76
0,40	236	09	03,43
0,45	236	09	02,40
0,50	236	09	02,27

Nota-se que o COA foi capaz de alcançar o melhor resultado em todos os testes realizados. Avaliando os resultados obtidos a fração descartada que teve a menor interação computacional (06 gerações) foi ao que possui $p_a = 0,10$. Os testes foram realizados com 20 ninhos e uma semente aleatória fixa.

A Tabela 4.6 apresenta os vetores encontrados para cada estado da planta no teste em que o custo computacional foi o menor.

Tabela 4.6: Vetor do Melhor Resultado para o Teste da Fração de Ninhos Descartados

Condição de Operação	Vetor Encontrado
LOCA	0.69145197 0.84548760 1.00000000 0.52123171 0.35780548 0.26830811 0.00000000 0.97443960 0.00000000 1.00000000 0.00172131 0.32054554 1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.46802895 0.94252326
SGTR	0.24771149 0.52415039 1.00000000 0.00000000 0.67208818 0.01296576 0.87853637 0.07539074 0.00000000 0.19714795 0.51027750 0.95599937 0.3123942 0.9907474 0.76587806 0.02157705 0.15303557
Blackout	0.77333263 0.58621015 0.00000000 1.00000000 0.03565972 0.88589921 0.46362654 1.00000000 0.91392858 0.67579670 0.87078646 0.00000000 0.87388893 1.00000000 1.00000000 0.00271638 0.00000000
NORMAL	0.00000000 1.00000000 1.00000000 0.16698566 1.00000000 0.99334618 0.12090348 1.00000000 1.00000000 0.15314337 0.8225376 0.90975993 0.07465164 1.00000000 1.00000000 0.62909231 0.76950052

4.4.3 Teste com a Mudança de Sementes

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para os testes variando a semente aleatória geradora de números do algoritmo, os valores escolhidos variaram no intervalo $[0, 9]$. Nota-se então que há uma independência da semente geradora e que para qualquer valor, comprovando a robustez do algoritmo, a função objetivo é capaz de encontrar o maior número de classificações corretas.

Tabela 4.7: Teste com Mudança de Sementes

Semente	Número de Acertos	Geração do Maior Acerto	Tempo Necessário (s)
00	236	14	04,81
01	236	16	04,26
02	236	22	05,26
03	236	18	04,53
04	236	09	02,36
05	236	22	05,49
06	236	26	06,03
07	236	11	03,37
08	236	18	04,60
09	236	15	04,21

Na Tabela 4.8, pode-se observar os vetores encontrados para a semente aleatória que teve o melhor desempenho computacional em comparação com as outras.

Tabela 4.8: Vetor do Melhor Resultado para o Teste da Mudança de Semente

Condição de Operação	Vetor Encontrado
LOCA	1.00000000 0.77912138 0.59178990 0.1960032 1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.98175319 1.00000000 1.00000000 0.87398416 0.53922128 0.00000000 0.9962999 0.22553894 0.01736606 1.00000000
SGTR	0.00000000 1.00000000 0.48822806 0.76019982 0.47967156 0.21131579 0.41637517 1.00000000 1.00000000 0.20905429 0.07878174 0.26604844 0.40329788 0.32642139 0.69462376 1.00000000 0.00000000
Blackout	0.67654136 0.85511366 0.47785493 0.97142385 0.93193007 0.00000000 0.79055006 0.22052157 0.81705831 0.51250260 0.34781157 0.55843653 0.63889016 0.90261945 0.00000000 1.00000000 0.63317869
NORMAL	0.39460083 0.5450508 0.00000000 0.0307129 0.55380689 0.60968627 0.25681359 1.00000000 0.7037901 0.10798814 0.9336537 0.33962566 1.00000000 0.22865082 0.25408130 1.00000000 0.27779024

4.4.4 Testes com as Melhores Combinações

Após realizar os testes anteriores, um teste com os melhores parâmetros foi feito, buscando obter melhores resultados combinando aqueles com melhor performance. Na Tabela 4.9 é apresentado o resultado final que comprova que ao utilizar os parâmetros que tiveram melhor desempenho anterior, o algoritmo é capaz de encontrar o maior número de classificações e um tempo computacional relativamente baixo em relação aos testes realizados anteriormente com outros parâmetros.

Tabela 4.9: Resultado do Teste com os Melhores Parâmetros

Número de Ninhos	p_a	Número de Acertos	Geração do Maior Acerto	Geração Média dos Acertos
40	0,10	236	09	13

Mesmo combinando os melhores parâmetros utilizados anteriormente, utilizando 40 ninhos e $p_a = 0,10$, obtendo o melhor resultado após 09 gerações, o algoritmo não foi capaz de diminuir o menor tempo computacional obtido pelo teste feito com os 20 ninhos, $p_a = 0,10$, obtido no teste de variação da fração de ninhos descartados.

Observa-se também na Tabela 4.10 o vetor encontrado que melhor representa cada estado da planta, utilizando os parâmetros com melhor desempenho nos testes.

Tabela 4.10: Vetor do Resultado com os Melhores Parâmetros

Condição de Operação	Vetor Encontrado
LOCA	1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.05659241 1.00000000 0.00000000 0.00000000 1.00000000 0.74860035 1.00000000 0.86402708 0.56119583 0.89779461 0.47690731 0.00000000 0.00000000 0.29289077
SGTR	1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.91653183 0.01355257 1.00000000 1.00000000 1.00000000 0.00000000 0.00000000 0.89050339 0.99875131 0.00000000 0.58677817 0.98627252 0.00000000 0.00000000
Blackout	1.00000000 1.00000000 0.00000000 1.00000000 0.05521436 0.38868414 0.15876422 1.00000000 0.51074156 0.85259317 0.00000000 1.00000000 1.00000000 0.06862222 1.00000000 0.00000000 0.96040201
NORMAL	0.57231645 0.61225250 0.00000000 0.97101367 0.74287292 0.54518620 0.00000000 0.00000000 1.00000000 0.00000000 1.00000000 0.95682900 1.00000000 1.00000000 1.00000000 1.00000000 0.77036022

Na Figura 4.7, se encontra o gráfico de convergência do COA, para o teste que teve o melhor desempenho, ou seja, o menor número de interações computacionais. Nota-se a convergência do algoritmo para o melhor resultado (236) acontece logo na 6ª geração. Na média o algoritmo, torna-se robusto, pois é capaz de obter, em média, bons resultados em poucas gerações, independente da semente usada.

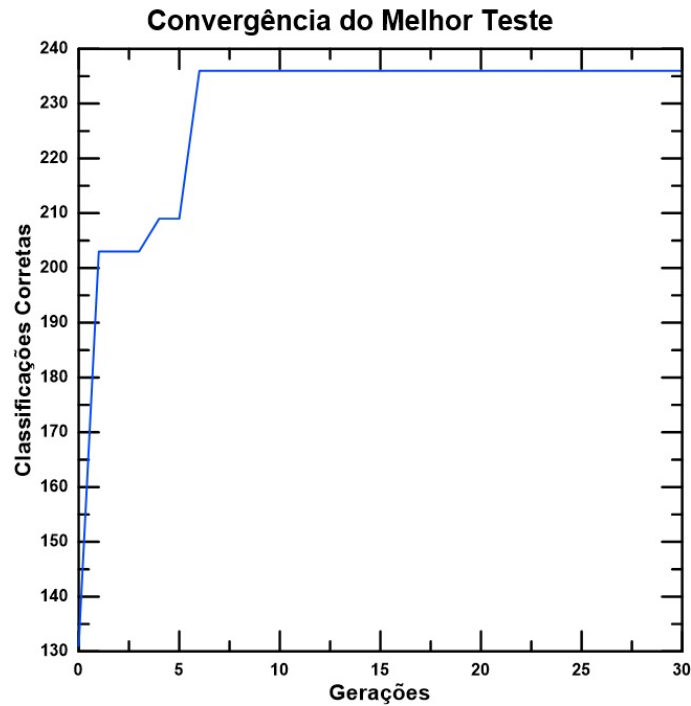


Figura 4.7: Convergência do COA no Teste com Melhor Resultado.

4.4.5 Testes do Vetor Protótipo com Independência no Tempo

O seguinte teste foi realizado para demonstrar que o modelo proposto, possui total independência com a variável temporal. Nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, encontram-se os vetores protótipos encontrados pelo COA, no eixo das abscissas se encontra o instante de tempo da simulação e no eixo das ordenadas o valor da variável normalizada entre [0,1]. Foram escolhidas duas variáveis de estado para comprovar que os vetores gerados para qualquer instante de tempo e para qualquer variável de estado monitorada, são os mesmos, possuindo o número máximo de classificações corretas.

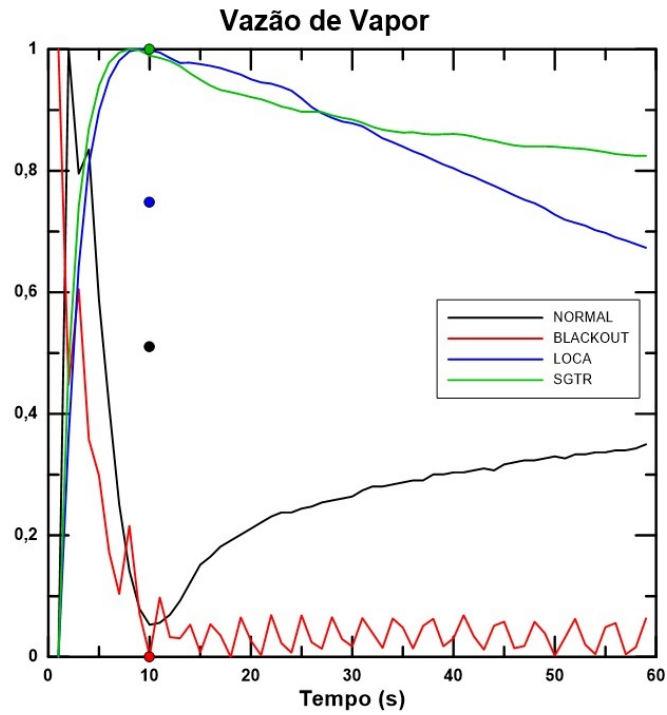


Figura 4.8: Representação do Vetor Obtido para Variável Vazão de Vapor com $t = 10s$.

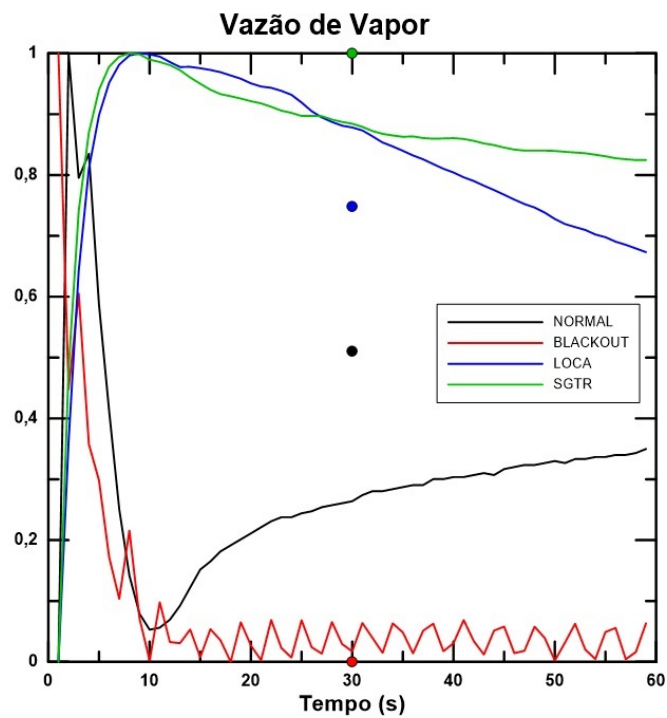


Figura 4.9: Representação do Vetor Obtido para Variável Vazão de Vapor com $t = 30s$.

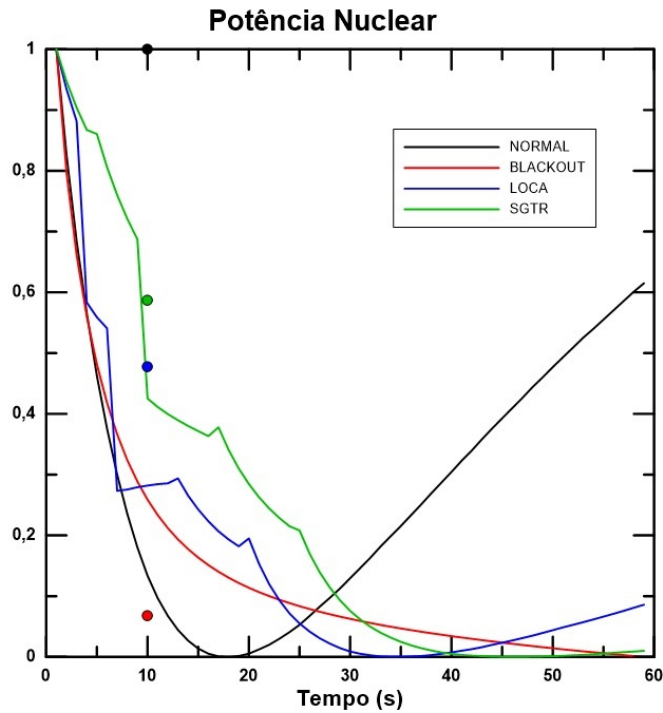


Figura 4.10: Representação do Vetor Obtido para Variável Potência Nuclear com $t = 10s$.

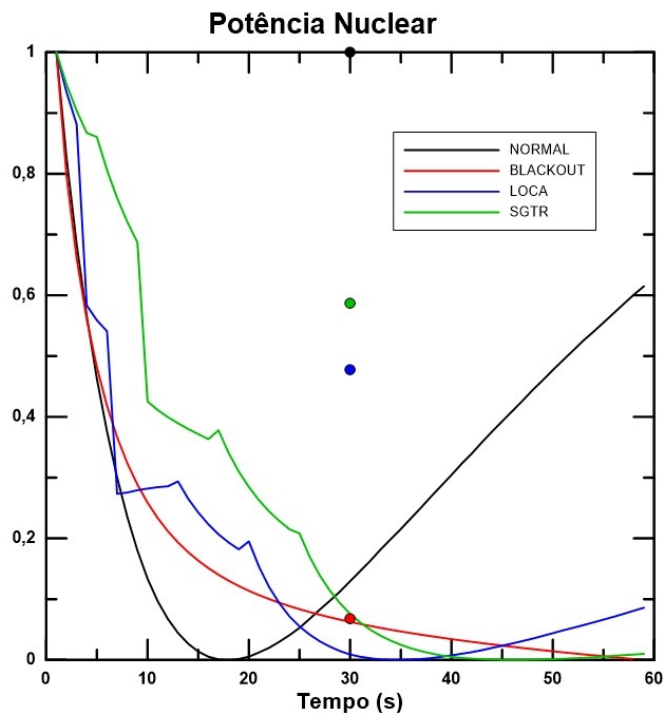


Figura 4.11: Representação do Vetor Obtido para Variável Potência Nuclear com $t = 30s$.

As Figuras 4.8 e 4.9 são referentes à variável de estado 09 - Vazão de Vapor, em dois instantes de tempo diferentes, $t = 10s$ e $t = 30s$, onde os pontos pretos são referentes ao estado Normal de operação, os pontos vermelhos ao estado do acidente de Blackout,

os pontos azuis para o estado de LOCA e os pontos verdes para o estado de SGTR. Já as Figuras 4.10 e 4.11 são referentes a variável de estado 15 - Potência Nuclear, seguindo a mesma lógica anterior.

4.5 Comparação do COA com Outros Algoritmos na Otimização de Identificação de Acidentes da Usina Nuclear Angra 2

Os resultados do COA foram comparados com aqueles já obtidos por trabalhos anteriores utilizando outros algoritmos como GA, PSO e QEA ([65], [62] e [27]) para o problema de identificação de acidentes/transientes de uma usina nuclear PWR como Angra 2.

Na Tabela 4.11, encontram-se os resultados em porcentagem de classificações corretas do conjunto de transientes/acidentes estudados anteriormente pela literatura. Pode-se observar que os resultados obtidos pelo COA são compatíveis e até mesmo superiores em relação a taxa de acertos. Com isso, o COA se mostra mais robusto, em comparação com os demais, dado que a solução encontrada globalmente é sempre a melhor.

Tabela 4.11: Comparação do COA com os algoritmos QEA, GA e PSO

Taxa de Classificações Corretas	COA	QEA	GA	PSO
Maior Taxa	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Menor Taxa	100,00%	86,89%	1,64%	8,47%

Pode-se observar também, na Tabela 4.12, que para comparado aos outros algoritmos presentes na literatura, o COA possui uma convergência, na média, mais rápida quando comparados com outros algoritmos da literatura.

Tabela 4.12: Comparação da Convergência do COA com os algoritmos QEA, GA e PSO

Taxa de Classificações Corretas	Menor Geração Encontrada	Geração Média dos Acertos	Geração Encontrada QEA	Geração Encontrada GA	Geração Encontrada PSO
100%	06	13	[400-1000]	-	[8-20]

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de um estudo da performance do algoritmo de otimização baseado nos pássaros cuco como ferramenta de identificação de acidentes de base projeto, transientes operacionais e operação normal da planta nuclear de potência Angra 2, que poderia ser usado para qualquer diagnóstico de eventos anômalos em usinas nucleares.

A ferramenta utilizada para obter os resultados desse trabalho foi a linguagem de programação Python, utilizando o algoritmo COA. O algoritmo foi testado em funções multimodais já utilizadas na literatura, Schaffer, Michalewicz, Esfera e Rastringin, de modo a avaliar a convergência do algoritmo.

Quando aplicado ao problema de identificação de acidentes, o COA se mostrou apto para encontrar a melhor posição dos centroides que representam cada um dos estados possíveis da planta, que são acidentes/transientes de base de projeto e estado de operação normal simulados para a usina nuclear Angra 2, atingindo o seu objetivo de maximizar o número de classificações corretas com menor esforço computacional, encontrando resultados na sexta geração do algoritmo.

Os testes realizados com o algoritmo proposto se mostraram satisfatórios, dado que apresentaram melhoras com a variação dos parâmetros necessários do algoritmo. Variando a quantidade de ninhos por cuco foi possível observar que com um número de 40 ninhos o algoritmo obteve o melhor desempenho computacional, com a variação da fração de ninhos descartados nota-se que aquela que possui o maior desempenho é $p_a = 0,10$ e foi possível comprovar a independência da semente geradora de números aleatórios.

Quando comparado com outros algoritmos o COA se destaca com relação ao número de acertos, visto que, para qualquer teste realizado o número de classificações corretas é

sempre o máximo, diferente dos resultados obtidos pela literatura utilizando o GA, PSO ou QEA. Comprando a velocidade de convergência do COA em relação aos outros algoritmos, ele se destaca, pois obtém o número máximo de classificações em poucas interações, levando em conta que a velocidade de convergência é muito importante na solução de problemas complexos, como o de identificação de transientes/acidentes.

5.2 Trabalhos Futuros

Para melhor os resultados obtidos pelo modelo de identificação de acidente proposto neste projeto, ficam as sugestões de aplicar o modelo para um número maior de acidentes/transientes possíveis da planta e com maior número de variáveis monitoradas.

E desenvolver um novo modelo em conjunto com outros modelos de otimização, que seja capaz de identificar quais são as variáveis que melhor classificam um determinado acidente/transiente.

Referências Bibliográficas

- [1] ELETRONUCLEAR. *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis*. 1987.
- [2] YANG, X. S. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press, 2010.
- [3] SCHAFFER, J. D. *Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms (artificial intelligence, optimization, adaptation, pattern recognition)*. Tese de Doutorado, Vanderbilt University, 1984.
- [4] BINGHAM, D. “Michalewicz Function”. 2017. Disponível em: <<https://www.sfu.ca/~ssurjano/michal.html>>.
- [5] DIXON, L. C. W., SZEGO, G. P. “The global optimization problem: an introduction”, *Towards global optimization 2*, pp. 1–15, 1978.
- [6] RASTRIGIN, L. *Systems of extremal control*. Mir, Moscow, 1974.
- [7] NICOLAU, A. D. S. *Algoritmo Evolucionário de Inspiração Quântica Aplicado na Otimização de Problemas da Engenharia Nuclear*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2014.
- [8] EPE. “Matriz Energética e Elétrica”. 2019. Disponível em: <epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.
- [9] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Professional, 1989.
- [10] KENNEDY, J., EBERHART, R. “Particle Swarm Optimization”. In: *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948, 1995.
- [11] DORIGO, M., GAMBARDELLA, L. M. “Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, pp. 53–66, 1997.
- [12] HAN, K. H., KIM, J. H. “Quantum-inspired evolutionary for a class of combinatorial optimization”, *IEEE Service Center*, pp. 580–593, 2002.
- [13] PINHEIRO, V. H. C., SCHIRRU, R. “Genetic programming applied to the identification of accidents of a PWR nuclear power plant”, *Annals Of Nuclear Energy* 124, pp. 335–341, 2019.

- [14] NICOLAU, A. D. S., SCHIRRU, R. “A New Methodology For Diagnosis System With ‘Don’T Know’ Response For Nuclear Power Plant”, *Annals Of Nuclear Energy* 100, pp. 91–97, 2017.
- [15] NICOLAU, A. D. S., SCHIRRU, R., DE MOURA MENESES, A. A. “Quantum evolutionary algorithm applied to transient identification of a nuclear power plant”, *Progress in Nuclear Energy* 53, pp. 86–91, 2011.
- [16] NICOLAU, A. D. S., SCHIRRU, R. “Study of the Quantum Evolutionary Algorithm Parameters Applied to Transient Identification”, *International Journal of Applied Mathematics and Informatics* 4, pp. 33–40, 2010.
- [17] SCHIRRU, R., PEREIRA, C. M. N. A. “A Real Time Artificially Intelligent Monitoring System for Nuclear Power Plants Operators Support”, *Real-Time Systems* 27, pp. 71–83, 2004.
- [18] HSE. “Icmesa chemical company, Seveso, Italy. 10th July 1976”. 2019. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/caseseveso76.htm>>.
- [19] LALLANILLA, M. “Briefing: The Seveso Disaster”. 2019. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/briefing-the-seveso-disaster-1708806>>.
- [20] NRC. “Backgrounder on the Three Mile Island Accident”. 2018. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>>.
- [21] DUTTA, P. K. “Bhopal gas tragedy: What had happened this day 33 years ago that killed thousands?” 2017. Disponível em: <<https://www.indiatoday.in/india/story/bhopal-gas-tragedy-what-had-happened-this-day-33-years-ago-that-killed-thousands->
- [22] NRC. “Backgrounder on Chernobyl Nuclear Power Plant Accident”. 2018. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html>>.
- [23] IAEA. *RBMK Nuclear Power Plantas: Generic Safety Issues*. 1996.
- [24] MALKO, M. V. *The Chernobyl Reactor: Design Features and Reasons for Accident*. 2002.
- [25] DINIZ, A. “Aprendendo com a Experiência – Relembrando o Acidente de Piper Alpha”. 2017. Disponível em: <<https://www.rsem.com.br/aprendendo-com-a-experiencia-relembrando-o-acidente-de-piper-alpha/>>.
- [26] PERSHAGEN, B. *Light Water Reactor Safety*. Pergamon Press, 1989.
- [27] NICOLAU, A. D. S. *Computação Quântica e Inteligência de Enxames Aplicadas na Identificação de Acidentes de uma Usina Nuclear PWR*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2010.

- [28] AGGARWAL, C. C. *Data classification: algorithms and applications*. USA: CRC Press, 2014.
- [29] ELETRONUCLEAR. “Informações de Angra 2”. 2019. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Informacoes-de-Angra-2.aspx>.
- [30] PETRANGELI, G. *Nuclear Safety*. Butterworth-Heinemann, 2006.
- [31] MOL, A. C. D. A. *Um Sistema de Identificação de Transientes com Inclusão de Ruídos e Indicação de Eventos Desconhecidos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2002.
- [32] NRC. *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*. WASH-1400, 1975.
- [33] AKSAN, N. “International Standard Problems and Small Break Loss-Of-Coolant Accident (SBLOCA)”, *Science and Technology of Nuclear Installations*, pp. 1–22, 2008.
- [34] DONG HYUN LEE, HO-GON LIM, H. Y. Y., JEONG, J. J. “Improvement of The Loca Psa Model Using a Best-Estimate Thermal-Hydraulic Analysis”, *Nuclear Engineering and Technology*, pp. 541–546, 2014.
- [35] YU YU, X. L., NIU, F. “Large LOCA accident analysis for AP1000 under earthquake”, *Annals of Nuclear Energy*, pp. 142–147, 2015.
- [36] NRC. *Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19*. 2011.
- [37] AMINOV, R. Z., YURIN, V. E. “Nuclear Power Plants Safety Improvement Based on Hydrogen Technologies”, *Nuclear Energy and Technology*, pp. 77–81, 2015.
- [38] IAEA. *Safety Aspects of Station Blackout at Nuclear Power Plants*. 1985.
- [39] NRC. *Evaluation of Station Blackout Accidents at Nuclear Power Plants (NUREG-1032)*. 1988.
- [40] HAUPT, R., HAUPT, S. *Practical Genetic Algorithms*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [41] DARWIN, C. R. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, 1985.
- [42] YANG, X., DEB, S. “Cuckoo Search via Lévy Flights”. In: *Proceeding of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)*, pp. 210–214, 2009.
- [43] RAJABIOUN, R. “Cuckoo Optimization Algorithm”, *Applied Soft Computing*, pp. 5508–5518, 2011.

- [44] ZILONG, G., SUN'AN, W., JIAN, Z. “A novel immune evolutionary algorithm incorporating chaos optimization”, *Pattern Recognition Letters* 27, pp. 2–8, 2006.
- [45] CHELLABOINA, V., RANGA, M. “Reduced order optimal control using genetic algorithms”. In: *American Control Conference*, p. 1407–1412, 2005.
- [46] FOGEL, D. “An evolutionary approach to the traveling salesman problem”, *Biological Cybernetics* 60, p. 139–144, 2004.
- [47] JOHNSTON, R., CARTWRIGHT, H. *Applications of Evolutionary Computation in Chemistry*. Springer-Verlag, 2004.
- [48] WU, C. C., LAI, K. C., SUNA, R. Y. “GA-based job scheduling strategies for fault tolerant grid systems”. In: *IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference*, p. 27–32, 2008.
- [49] VAROL, H., BINGUL, Z. “A new PID tuning technique using ant algorithm”. In: *IEEE American Control Conference*, p. 2154–2159, 2004.
- [50] BALACI, H., VALENZUELA, J. “Scheduling electric power generators using particle swarm optimization combined with Lagrangian relaxation method”, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 14, p. 411–421, 2004.
- [51] SERRÃO, B. P. *Modelo de Dispersão Atmosférica para acidente nuclear na região de base naval de itaguaí com otimização do campo de vento utilizando inteligência de enxames*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2018.
- [52] LEITE, V. C. *Otimização por enxame de partículas aplicado á estrutura mecânica da mola da grade espaçadora do elemento combustível de um reator nuclear*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2017.
- [53] AUGUSTO, J. P. C., NICOLAU, A. D. S., SCHIRRU, R. “PSO with Dynamic Topology and Random Keys method applied to Nuclear Reactor Reload”, *Progress in Nuclear Energy (New Series)* 83, pp. 191–196, 2015.
- [54] NICOLAU, A. D. S., SCHIRRU, R., LIMA, A. M. M. D. “Nuclear reactor reload using Quantum Inspired Algorithm”, *Progress in Nuclear Energy (New Series)* 55, pp. 40–48, 2012.
- [55] DAVIES, G. H. “The Life Style of Birds, Parenthood”. Disponível em: <<http://www.pbs.org/lifeofbirds/home/index.html>>.
- [56] PAYNE, R. B. *The Cuckoos*. Oxford University Press, 2005.
- [57] REYNOLDS, A. M., FRYE, M. A. “Free-Flight Odor Tracking in Drosophila Is Consistent with an Optimal Intermittent Scale-Free Search”, *PLoS ONE*, 2007.
- [58] DE MOIVRE, A. *The Doctrine of Changes*. W. Pearson, 1718.

- [59] FELLER, W. *An introduction to probability theory and its applications*. Wiley, 1966.
- [60] MANTEGNA, R. N. “Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Levy stable stochastic processes”, *Physical Review E*, pp. 4677–4683, 1994.
- [61] VAN ROSSUM, G. “Python Software Foundation”. 1991. Disponível em: <<https://www.python.org/>>.
- [62] MEDEIROS, J. A. C. C. *Exames de Partículas como Ferramenta de Otimização em Problemas Complexos da Engenharia Nuclear*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2005.
- [63] HAYKIN, S. *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*. Macmillan College Publishing Company, 1994.
- [64] ALVARENGA, M. A. B. *Diagnóstico do Desligamento de uma Reator Nuclear Através de Técnicas Avançada de Inteligência Artificial*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1997.
- [65] ALMEIDA, J. C. S. *Método de Identificação de Transientes com Abordagem Possilística, Otimizado por Algoritmo Genético*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2001.