ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO FÍSICA DE UMA BASE NAVAL HIPOTÉTICA COM MATERIAL NUCLEAR

Thiago Eduardo Brito Santos

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

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Rio de Janeiro

Dezembro de 2024

ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO FÍSICA DE UMA BASE NAVAL HIPOTÉTICA COM MATERIAL NUCLEAR

Thiago Eduardo Brito Santos

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

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Aprovada por: Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
Prof. Antonio Carlos Marques Alvim
Prof. Daniel Artur Pinheiro Palma

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2024

Santos, Thiago Eduardo Brito

Análise de Risco de Um Sistema de Proteção Física de uma Base Naval Hipotética com Material Nuclear / Thiago Eduardo Brito Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIII, 125 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 108-111.

1. Análise de Segurança. 2. Sistema de Proteção Física. 3. Análise de Sequência do Adversário. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais e avô,
cujos exemplos de perseverança e dedicação
refletem na pessoa que sou hoje. Seus
ensinamentos e apoio incondicional
foram essenciais para a realização
desta conquista.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Josenir Brito, apoio incondicional e incentivo constante ao longo de toda esta jornada. Sua força e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse atingir meus objetivos.

Ao meu pai, Raimundo Santos, por seu exemplo de dedicação e perseverança, e por seu apoio constante ao longo desta jornada. Seu incentivo e orientação foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios e alcançar esta conquista.

À minha esposa, Thais Tavares, agradeço profundamente por seu amor, carinho, amizade e, sobretudo, pela compreensão durante esses dois anos em que estivemos distantes devido à realização deste curso.

A meus irmãos, Gabriel, Thales, Paulo e Peterson dos quais pude estar mais próximo nesse período em que estive morando no Rio de Janeiro e pela amizade durante toda essa jornada.

Ao Professor Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pelas orientações, aulas, reuniões e pela excelência com a qual se dedica à sua profissão ao longo de sua carreira no magistério numa instituição de ensino federal renomada.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade a mim concedida da realização deste curso de mestrado agregando conhecimentos que em breve serão devolvidos à instituição na aplicação do desenvolvimento das atividades.

Aos professores do corpo docente da COPPE pelo conhecimento transmitido durante os cursos ministrados.

A todos que, embora não citados nominalmente, compreenderam e contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

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

ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO FÍSICA DE UMA BASE NAVAL HIPOTÉTICA COM MATERIAL NUCLEAR

Thiago Eduardo Brito Santos

Dezembro/2024

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

A proteção física contra o roubo de materiais radioativos em instalações nucleares é uma questão importante para a segurança global. O acesso indevido a esses materiais por quaisquer indivíduos constitui uma ameaça, tanto pela possibilidade de serem utilizados na produção de armas nucleares quanto pelo risco de exposição a perigos radiológicos.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma Base Naval Hipotética equipada com material nuclear proveniente dos combustíveis de navios. A partir disso, foi proposto um projeto de Sistema de Proteção Física (SPF) para garantir a segurança da instalação. O sistema desenvolvido foi baseado em três premissas fundamentais no campo da segurança física: detecção, atraso e resposta, que visam mitigar ameaças contra o material nuclear. Posteriormente, foi realizada uma avaliação do SPF utilizando a metodologia de análise do diagrama de sequência do adversário, associada a uma análise de neutralização, com o objetivo de determinar a eficácia do sistema proposto. Os resultados iniciais mostraram uma baixa efetividade no SPF, revelando a demanda de melhorias nas barreiras físicas e tempo da Força de Reação da planta nuclear. Além disso, o método empregado neste estudo possui natureza ampla e pode ser aplicado à outras instalações consideradas sensíveis.

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

RISK ANALYSIS OF THE PHYSICAL PROTECTION SYSTEM OF A HYPOTHETICAL NAVAL BASE WITH NUCLEAR MATERIAL

Thiago Eduardo Brito Santos

December/2024

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
Department: Nuclear Engineering

Physical protection against theft of radioactive materials from nuclear facilities is an important issue for global security. Unauthorized access to these materials by any individual poses a threat, both due to the possibility of their use in the production of nuclear weapons and due to the risk of exposure to radiological hazards.

This paper presents the development of a hypothetical naval base equipped with nuclear material from ship fuel. Based on this, a Physical Protection System (PPS) project was proposed to ensure the security of the facility. The system developed was based on three fundamental premises in the field of physical security: detection, delay and response, which aim to mitigate threats against nuclear material. Subsequently, an evaluation of the PPS was carried out using the adversary sequence diagram analysis methodology, associated with a neutralization analysis, with the objective of determining the effectiveness of the proposed system. Initial results showed low effectiveness in the PPS, revealing the need for improvements in the physical barriers and the Reaction Force time of the nuclear plant. Furthermore, the method used in this study is broad and applicable to other facilities considered sensitive.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS x
LISTA DE TABELAS xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xiii
1 Introdução 1
1.1 Safety x Security 2
1.2 Objetivo do trabalho 3
1.3 Motivação 4
1.4 Organização do trabalho 5
2 Fundamentação teórica 6
2.1 Determinação dos objetivos da SPF 8
2.1.1 Caracterização da instalação 8
2.1.2 Identificação de ameaças 8
2.1.3 Identificação de alvos 13
2.2 Projeto do Sistema de Proteção Física – Funções do SPF 15
2.2.1 Detecção 16
2.2.2 Atraso 18
2.2.3 Resposta 19
2.3 Análise do Sistema de Proteção Física 20
2.3.1 Modelos Computacionais 21
2.3.2 Diagrama de Sequência do Adversário (DSA) 24
2.3.3 Análise de Risco 26
2.3.4 O Ponto de Detecção Crítico (PDC) 30
2.4 Cultura de segurança nuclear 32
3 METODOLOGIA 34
3.1 Desenvolvimento do trabalho 34
3.2 Modelo EASI 35
3.3 Modelo de Neutralização 38
4 Definição de objetivos do SPF da BNH 42
4.1 Caracterização da BNH 42
4.1.1 Estaleiro de Construção e Manutenção (EsCoMa) 44
4.1.2 Complexo de Manutenção Especializada (CME) 45
4.1.3 Prédio da Segurança 46

4.1.4 Prédio administrativo 47
4.1.5 Prédio de escritórios técnicos 47
4.1.6 Guaritas 48
4.2 Definição de Ameaças para a BNH 48
4.3 Ameaça Base de Projeto 49
4.4 Identificação de Alvos da BNH 50
4.4.1 Áreas de Segurança da BNH 51
5 Projeto do SPF da BNH 54
5.1 Sistemas de detecção de intrusão da BNH 54
5.1.1 Medidas de proteção 54
5.1.2 Controle de Acesso à BNH 56
5.2 Sistemas de retardo da BNH 58
5.3 Sistema de resposta - Força de Reação da BNH 59
5.3.1 Organização do serviço 59
5.3.2 Postos do Serviço 60
5.3.3 Dinâmica da Força de Reação 61
6 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DO SPF da BNH 66
6.1 Diagrama de Sequência do Adversário (DSA) da BNH 66
6.2 Análise de múltiplos caminhos 79
6.3 Análise dos resultados 82
6.3.1 Análise da Probabilidade de Interrupção (P_I) 82
6.3.2 Análise da Probabilidade de Neutralização (P_N) 99
6.3.3 Estimativa de risco 102
7 Conclusões e Recomendações 104
Referências Bibliográficas 108
Anexo A 112
Anexo B 118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de processo de projeto do Sistema de Proteção Física (adaptado de GARCIA, 2008) 7
Figura 2 – Caminho percorrido pelo adversário até o alvo. 19
Figura 3 – Diagrama esquemático de um Diagrama de Sequência do Adversário 25
Figura 4 – Escala INES de acidentes e incidentes (IAEA, 2019b) 28
Figura 5 – Diagrama esquemático da interrupção da ação do adversário pelo SPF 31
Figura 6 – Planilha para cálculo da probabilidade de neutralização P_N. 40
Figura 7 – Planta esquemática da Base Naval Hipotética 43
Figura 8 – Definição das áreas de segurança da Base Naval Hipotética 52
Figura 9 – Definição das áreas de segurança do CME 53
Figura 10 – Detalhe da área de segurança relativa ao prédio do CME 53
Figura 11 – Medidas de proteção da BNH: CFTV, sensores infravermelho, sensor acústico e torres de vigilância 56
Figura 12 – Diagrama de Sequência do Adversário da BNH 67
Figura 13 – Distâncias laterais, frontal e posterior de caminhada do adversário 74
Figura 14 – Quantidade de caminhos possíveis de roubos de material nuclear da BNH 80
Figura 15 – Exemplo de Probabilidade de Interrupção para um caminho da BNH (adaptado de (GARCIA, 2008)) 83
Figura 16 – Probabilidade de interrupção dos caminhos do adversário – cenário 1 85
Figura 17 – Frequência das Probabilidades de Interrupção - cenário 1 86
Figura 18 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 2 87
Figura 19 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 2 87
Figura 20 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 2 88
Figura 21 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 3 90
Figura 22 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 3 90
Figura 23 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 3 91
Figura 24 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 4 93
Figura 25 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 4 93
Figura 26 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 4 94

Figura 27 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 5 96
Figura 28 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 5 96
Figura 29 – Frequência das Probabilidades de Interrupção compreendidos entre 0,9 e 1 – cenário 5 97
Figura 30 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 5 97
Figura 31 – Probabilidade de neutralização para o cenário A 101
Figura 32 – Probabilidade de neutralização para o cenário B. 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ameaça Base de Projeto da Base Naval Hipotética 50
Tabela 2 – Exemplo de serviço de quarto para o posto de guarita 60
Tabela 3 – Divisão de serviço para segurança da BNH 60
Tabela 4 – Tempo de translado da Força de Reação: situação 1 e situação 2 63
Tabela 5 – Tempo de translado da Força de Reação: situação 3 63
Tabela 6 – Parâmetros de resposta da Força de Reação 64
Tabela 7 – Identificações utilizadas no DSA da BNH 67
Tabela 8 – Proposta inicial de barreiras físicas e Probabilidades de Detecção das medidas de proteção 70
Tabela 9 – Ferramentas e tempos de atraso das barreiras físicas 72
Tabela 10 – Distâncias médias dos limites da BNH até CME 74
Tabela 11 – Velocidades médias para diferentes tipos de corrida 75
Tabela 12 – Velocidades para o cenário de invasão e fuga 75
Tabela 13 – Tempos médios de invasão e fuga do adversário 76
Tabela 14 – Barreiras, medidas de proteção e ferramentas do adversário 77
Tabela 15 – Quantidade de caminhos possíveis de roubo de material nuclear da BNH 81
Tabela 16 – Parâmetros para a P1AP referentes ao cenário 3 89
Tabela 17 – Parâmetros para a P1AP e P3PR referentes ao cenário 4 92
Tabela 18 – Parâmetros para a P1AP, P3PR e P4SC referentes ao cenário 5 95
Tabela 19 – Compilação da frequência da Probabilidade de Interrupção por cenário .. 98
Tabela 20 – Características do adversário 99
Tabela 21 – Tempo de adversário para o menor valor de PI para os caminhos do cenário 5 100
Tabela 22 – Menor tempo do adversário para os caminhos do cenário 5 100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
BNH	Base Naval Hipotética
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
CME	Complexo de Manutenção Especializada
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CVC	Centro de Vigilância e Controle
DSA	Diagrama de Sequência do Adversário
EASI	*Estimate of Adversary Sequence Interruption* (Estimativa de Interrupção da Sequência do Adversário)
FR	Força de Reação
IAEA	*International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica)
INES	Escala Internacional de Eventos Nucleares
P_A	Probabilidade de avaliação precisa de um alarme
P_C	Probabilidade de comunicação entre os guardas
PDC	Ponto de Detecção Crítico
P_I	Probabilidade de interrupção do adversário
PIN	*Personal Identification Number* (Número de Identificação Pessoal)
P_S	Probabilidade de detecção do sensor de atividades anormais
P_T	Probabilidade de transmissão de um alarme
SNL	*Sandia National Laboratories*
SPF	Sistema de Proteção Física

1 INTRODUÇÃO

A segurança nuclear é um tópico de grande complexidade e importância no mundo, pois abrange uma série de aspectos vitais relativas à proteção das pessoas contra os riscos associados à energia nuclear e à manipulação de materiais radioativos. Este campo de estudo e prática abrange várias medidas e protocolos elaborados visando a prevenção dos acidentes nucleares, a salvaguarda das instalações atômicas, a redução da pegada ecológica[1], a minimização de impactos na saúde pública, a minimização dos riscos associados à produção, ao armazenamento e ao transporte de material radioativo, bem como a mitigação dos perigos provenientes da proliferação de armas nucleares (ZAKARIYA, KAHN, 2015).

O desenvolvimento da energia nuclear, embora tenha proporcionado benefícios significativos à geração de eletricidade e em diversas áreas da medicina e indústria, também trouxe consigo desafios e preocupações relacionadas à segurança. As principais ocorrências históricas mais emblemáticas, como o acidente de *Three Mile Island*, em 1979, nos Estados Unidos, os desastres em Chernobyl, em 1986, na extinta União Soviética (atual território ucraniano) e em Fukushima, em 2011, no Japão alertaram para os perigos inerentes à operação de usinas nucleares e ressaltaram a necessidade urgente de aprimorar os protocolos de segurança.

A segurança nuclear não se limita apenas à prevenção de acidentes em usinas nucleares, ela abrange também a proteção contra roubo, contrabando e uso indevido de materiais radioativos para a produção de armas nucleares. Além disso, a gestão responsável de resíduos nucleares, a aplicação de tecnologias avançadas de monitoramento, a implantação de regulamentações rigorosas e a cooperação internacional são elementos fundamentais para garantir um ambiente seguro e controlado no âmbito nuclear.

Em um mundo onde a energia nuclear continua a ser uma fonte crucial para suprir a demanda energética e onde a pesquisa e o desenvolvimento nesse campo avançam

---

A pegada ecológica é um método utilizado para mensurar a demanda humana sobre o capital natural, ou seja, a quantidade de recursos naturais necessária para sustentar uma população ou uma economia (ECOLOGICAL FOOTPRINT, 2024), (WACKERNAGEL, LIN, *et al.*, 2019). Esse conceito monitora essa demanda por meio de um sistema de contabilidade ecológica, que compara a área biologicamente produtiva usada para consumo com a biocapacidade disponível, ou seja, a área produtiva capaz de regenerar os recursos demandados pela humanidade. Em síntese, a pegada ecológica quantifica o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente.

constantemente, a discussão e a implementação de estratégias que promovam a segurança nuclear tornam-se imperativas para preservar a segurança global e o bem-estar das gerações presentes e futuras.

1.1 Safety x Security

No âmbito nuclear, as palavras *"safety"* e "*security*" traduzidas para o português, ambas representam a palavra “segurança”, no entanto, se faz necessário adicionar outros vocábulos para assegurar o significado real que estas palavras exprimem na língua inglesa. Elas representam conceitos distintos, mas igualmente importantes para garantir o funcionamento seguro e protegido das instalações nucleares, bem como para prevenir incidentes e ameaças.

O termo *nuclear safety*, muitas das vezes mencionado apenas pela palavra *safety*, pode ser traduzido para o português por “segurança nuclear”, esta por sua vez é definida pela AIEA como a obtenção de condições operacionais adequadas, prevenção de acidentes ou mitigação das consequências de acidentes, resultando na proteção dos trabalhadores, do público e do meio ambiente de riscos de radiação (IAEA, 2022).

O conceito de segurança nuclear envolve medidas para prevenir falhas, vazamentos radioativos, explosões ou outros incidentes que possam resultar em danos à saúde pública, ao meio ambiente ou à infraestrutura. A segurança nuclear abrange também aspectos técnicos, protocolos de manutenção, procedimentos operacionais, treinamento de pessoal e a manutenção de equipamentos para garantir que a operação das instalações nucleares seja a mais segura possível.

Em contrapartida, a palavra *security* pode traduzida para o português por “segurança física”, que por sua vez é definida pela AIEA como a prevenção, detecção e resposta a roubo, sabotagem, acesso não autorizado, transferência ilegal ou outros atos maliciosos envolvendo materiais nucleares, outras substâncias radioativas ou suas instalações associadas, (IAEA, 2022).

Por outro lado, a "proteção" nuclear, muitas vezes referida como segurança física ou segurança contra atos maliciosos, está relacionada à proteção contra ameaças intencionais, como terrorismo, roubo, sabotagem ou acesso não autorizado a materiais nucleares ou instalações. A segurança nuclear visa impedir o acesso não autorizado a

materiais radioativos, prevenir o uso indevido de tecnologia nuclear para fabricar armas ou atos terroristas que possam resultar em danos catastróficos.

Desta forma, a segurança física de instalações nucleares é um conjunto de medidas e estratégias projetadas para proteger fisicamente essas instalações, assim como os materiais radioativos sensíveis que elas estocam, contra acesso não autorizado, sabotagem, roubo ou qualquer outra atividade ilícita que possa comprometer a segurança nuclear. Além disso, a segurança física das instalações nucleares também se estende à proteção de informações confidenciais e tecnologias sensíveis associadas à produção, armazenamento e transporte de material nuclear.

Em síntese, a segurança nuclear (*safety)* está mais associada à prevenção de acidentes e à proteção da saúde pública e ambiental, enquanto a segurança física (*security*) diz respeito à defesa contra ameaças deliberadas e intencionais, garantindo que os materiais e instalações nucleares estejam protegidos contra atividades ilícitas ou maliciosas. Ambos os princípios, *safety* e *security*, são fundamentais para garantir um ambiente nuclear seguro, protegido e controlado.

1.2 Objetivo do trabalho

Este trabalho apresenta como principal objetivo a realização de uma análise de risco de um Sistema de Proteção Física (SPF) de uma base naval hipotética com navios de propulsão nuclear e, portanto, dotada de instalações que armazenam material nuclear, visando avaliar a vulnerabilidade da base naval com interesse principalmente na segurança física (*security*).

Para tanto, o trabalho visa realizar o modelo de uma base naval hipotética, considerando a disposição dos prédios com material nuclear e seu sistema preliminar de proteção física. Serão, então, postulados cenários de invasão com o intuito de subtrair material nuclear da instalação de modo a averiguar a eficácia do sistema de proteção física conforme os requisitos impostos pelas normas brasileiras da CNEN e internacional da AIEA, propondo as melhorias necessárias.

Ressalta-se que a base naval, assim como os cenários postulados são considerados de forma completamente hipotética, porém plausíveis com a realidade e demandas atinentes do setor nuclear relacionados à segurança física.

1.3 Motivação

A proteção física contra o roubo de material radioativo em instalações nucleares é uma preocupação crítica para a segurança global. O acesso não autorizado a materiais nucleares por indivíduos mal-intencionados ou grupos representa um sério risco de segurança, tanto em termos de potencial para o uso dos materiais na fabricação de armas nucleares quanto em termos da exposição a perigos radiológicos.

Os principais riscos e consequências de subtração de materiais radioativos estão relacionados principalmente às seguintes causas:

- Proliferação nuclear: o roubo de material radioativo pode levar à proliferação de armas nucleares ou à fabricação de dispositivos radiológicos improvisados, aumentando as ameaças à segurança global;
- Terrorismo e atos maliciosos: o uso de materiais nucleares em atos terroristas poderia resultar em consequências catastróficas, causando danos humanos, ambientais e econômicos irreparáveis; e
- Exposição à radiação: o manuseio inadequado de materiais radioativos por pessoas não treinadas pode resultar em exposição à radiação, colocando em risco a saúde pública e o meio ambiente.

A não implantação de medidas eficazes de proteção física pode gerar consequências devastadoras. O roubo de material radioativo poderia resultar em eventos de segurança internacional de alto impacto, com efeitos a longo prazo na estabilidade geopolítica, na saúde pública e no meio ambiente.

Portanto, investir em medidas de segurança robustas, atualização de tecnologias de monitoramento e vigilância, além de capacitação contínua dos profissionais de segurança são ações cruciais para prevenir o roubo de materiais radioativos em instalações nucleares e minimizar os riscos associados a atos maliciosos envolvendo esses materiais.

Ainda que o uso de fontes radioativas para fins maliciosos seja incomum, não é impossível. Deste modo, pode-se observar a preocupação mundial com tais eventos, sendo necessária a disseminação de uma cultura de segurança. Esse assunto é de tamanha relevância que os planos de segurança física precisam ser citados nos Relatórios de Análise de Segurança de uma instalação nuclear e apresentados em detalhes em outros

relatórios confidenciais, mantidos fora do alcance público, de modo a preservar a integridade dos planos de segurança (IAEA, 2021a).

Por esse motivo, este trabalho visa calcular o risco de um evento de furto material nuclear ou radioativo com o intuito de aprimorar o sistema de proteção física da Base Naval Hipotética, aumentando a eficiência de detecção do intruso, e consequente mitigação destes eventos.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulo conforme descrito a baixo.

O Capítulo 2 apresenta uma breve fundamentação teórica sobre a concepção de um sistema de proteção física de uma instalação nuclear. São apresentados os principais conceitos empregados para o desenvolvimento do presente trabalho.

A metodologia de desenvolvimento do trabalho, bem como o ferramental computacional utilizado são apresentados no Capítulo 3.

Os Capítulos 4, 5 e 6 trazem efetivamente o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 é destinado a apresentar os objetivos do sistema de proteção física da Base Naval Hipotética, apresentando a descrição da base, definição das principais ameaças e identificação dos alvos. No Capítulo 5, o SPF preliminar da BNH é descrito, mostrando a definição das áreas de segurança da BNH, os sistemas de detecção e retardo incorporados e a Força de Reação para resposta a eventuais ameaças. Por fim, no Capítulo 6, os resultados das análises do SPF são apresentados, mostrando os valores encontrados para as Probabilidades de Interrupção (P_I), Neutralização (P_N) e Eficácia do sistema (P_E), averiguando a compatibilidade dos resultados com os objetivos levantados para o sistema de proteção física.

Ao final, as referências bibliográficas utilizadas para realização do trabalho são apresentadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de projeto do SPF consiste em várias etapas bem definidas de forma a sistematizar as etapas de definição e requisitos do SPF e, assim, garantir que o projeto seja eficaz para a devida proteção da instalação De acordo com o apresentado por GARCIA (2008), o processo de projeto pode ser descrito conforme visto na Figura 1.

Desse modo, o processo se inicia com a primeira etapa de determinação dos objetivos do SPF, na qual é fundamental a definição dos requisitos de projeto, bem como os objetivos a serem alcançados pelo SPF. Com essa etapa concluída, dá-se início à segunda etapa com a elaboração de um SPF preliminar, ou a análise de um já existente, para averiguar a adequação deste com os critérios levantados na primeira etapa. Por fim, a terceira etapa consiste em uma avaliação sistemática do SPF por meio do emprego de várias técnicas e métodos que auxiliem o projetista a garantir que os objetivos de segurança estabelecidos sejam atingidos. Uma pequena revisão sobre cada parte do processo é realizada abaixo para um melhor entendimento do trabalho, entretanto, mais detalhes sobre cada parte do processo podem ser consultados em GARCIA (2008).

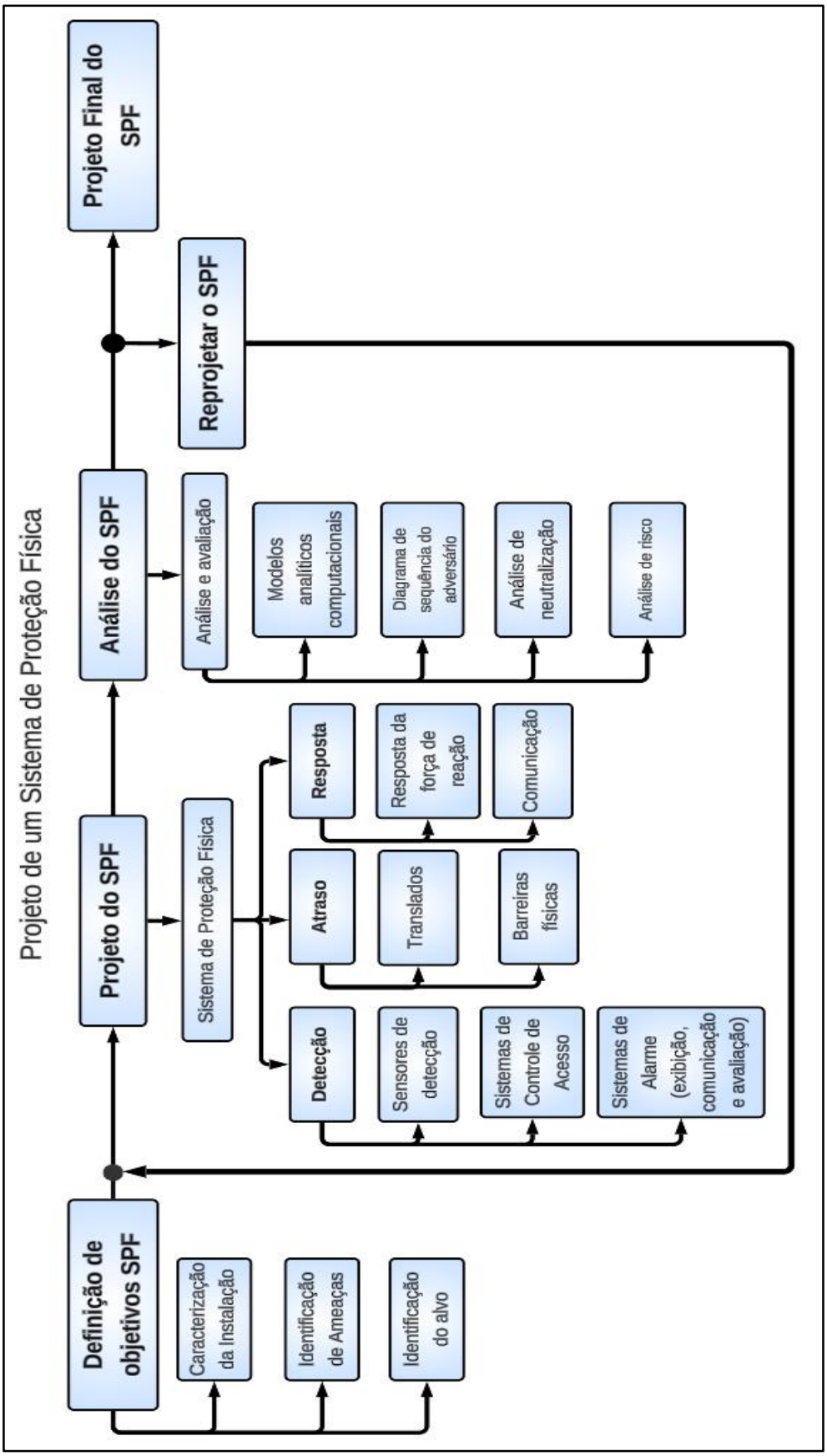


Figura 1 – Fluxograma de processo de projeto do Sistema de Proteção Física (adaptado de GARCIA, 2008)

2.1 Determinação dos objetivos da SPF

2.1.1 Caracterização da instalação

Antes de propor qualquer sistema de segurança para uma instalação é fundamental que se compreenda bem o que está sendo protegido e todo o ambiente ao redor, bem como o nível de proteção necessário. Esta etapa é crucial no projeto do SPF para garantir que não ocorra uma proteção demasiada em uma área que dela não necessite, aumentando os custos do SPF, ou uma proteção aquém do necessário para uma área vital da instalação, podendo acarretar em uma invasão e subtração de material nuclear (IAEA, 2012). Portanto, se faz necessário que esta etapa seja realizada com bastante cuidado para que os objetivos do SPF sejam cumpridos ao final.

Para se realizar a caracterização, ou seja, a descrição detalhada da instalação, é preciso que várias informações de diversos aspectos do local sejam levantadas e analisadas. Dentre as informações necessárias estão as condições físicas da instalação, a operação, políticas e procedimentos internos, requisitos reguladores, questões legais, considerações de segurança nuclear e objetivos e metas corporativas.

Conforme requerido pela norma CNEN NN 2.01 (CNEN, 2019a), é necessário delimitar com barreiras físicas com crescente graus de proteção física as áreas vigiada, protegida, interna e vital. Sendo assim, um passo importante na caracterização da instalação cujo SPF será realizado ou avaliado é a definição da classificação de cada área conforme preconizado na norma. Além disso, aspectos geográficos do local, bem como as possibilidades de acesso à instalação precisam, também, ser descritos.

2.1.2 Identificação de ameaças

Para garantir a segurança física de uma instalação é necessário compreender contra o que se pretende proteger essa instalação. Define-se ameaça como um indivíduo ou grupo com intenção, motivação e capacidade (recursos técnicos, tecnológicos, financeiros, materiais e humanos) para cometer um ato maléfico contra materiais ou instalações nucleares (IAEA, 2022). Portanto, o SPF deve ser concebido para proteger contra essas ameaças.

Desde simples vândalos, até ambientalistas extremistas, terroristas, sabotadores, espiões industriais é importante prever como a ameaça seria perpetrada para prever meios

de evitá-la (CHEIKH EL WELY, CHETAINE, 2021). Entretanto, não é viável projetar um sistema de proteção que seja capaz de combater todas as ameaças existentes. Por isso, a definição das ameaças que serão levadas em consideração no projeto entra como parte da definição dos objetivos do SPF.

Desse modo, definir as ameaças a serem consideradas no projeto é fundamental para a construção do SPF. Conforme proposto por (GARCIA, 2008), a definição das ameaças consiste em três etapas básicas:

1. Listar a informação necessária para definir a ameaça: nesta parte se decide que tipo de informação é necessária para caracterizar uma ameaça à instalação. Uma lista de informações sobre os adversários deve conter a motivação, metas potenciais baseadas na identificação dos alvos, táticas e modos de operação, quantitativo e capacidade dos adversários. É, ainda, necessário descrever o tipo de adversário, se externo (pessoas de fora da instalação), se interno (pessoas de dentro da instalação) e se um conluio (pessoal externo agindo com o auxílio de pessoal interno);
2. Coletar informação a respeito da ameaça potencial: deve levar em consideração diversos fatores que possam fornecer detalhes da ameaça potencial. Entre eles têm-se as condições externas à instalação, como a localização geográfica se urbana ou rural, atitude da comunidade próxima, relação público em geral, reputação da instalação e, também, fatores internos como a relação com os trabalhadores, política de relações industriais e públicas. Tais informações podem ser levantadas por meio de agências de inteligência, estudos e análises criminais, organizações e entidades profissionais, literatura de acesso público e normas da administração governamental;
3. Organizar a informação de forma a torná-la usável: passo fundamental para organizar tudo o que foi coletado nos dois passos anteriores. A informação pode ser disposta, por exemplo, em tabelas fazendo uma análise qualitativa das probabilidades das motivações, ações e capacidades (p.ex. muito alta, alta, média, baixa e muito baixa) para cada ameaça levantada.

Dentro do primeiro passo de definição da ameaça, faz-se a separação entre adversário externo e interno. É importante realizar uma boa descrição dessas duas fontes de ameaças, pois as medidas de prevenção precisam ser próprias para cada caso.

Agentes externos podem incluir terroristas, criminosos ou *hackers*. As motivações que levam a uma ação contra uma instalação são de cunho ideológico, ligadas a um

sistema político ou filosófico; econômico, buscando algum ganho financeiro com o ato; e pessoal, que consideram motivações específicas do indivíduo, como um problema pessoal com algum funcionário da instalação ou doença psíquica.

Agentes internos são pessoas com conhecimento de operações ou sistemas de segurança e que tenham acesso não escoltado às instalações nucleares ou aos procedimentos e informações sensíveis. Os agentes internos podem ser passivos, onde apenas fornecem informações; ativos não violentos, que facilitam a entrada e saída, desativam alarmes e comunicações; ou, ainda, violentos ativos, que efetivamente participam de um ataque violento.

Qualquer funcionário pode representar uma potencial ameaça e, portanto, não se deve presumir que determinada pessoa estaria isenta de tentar tais ações. O que torna a proteção contra o agente interno bastante desafiadora é que ele se distingue do agente externo pelo conhecimento que possui do sistema, pelo acesso que já possui às instalações de segurança e pela oportunidade de poder escolher o melhor momento para realizar a ação.

2.1.2.1 Possíveis tipos de ameaças

- Ativistas antinucleares

Ativistas antinucleares são indivíduos ou grupos organizados que se opõem ao uso da energia nuclear devido a preocupações ambientais e de saúde pública. Esses manifestantes acreditam que as instalações nucleares representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à segurança das comunidades locais. Embora muitas vezes pacíficos, alguns grupos podem recorrer a ações diretas, como invasões de propriedades, bloqueios e atos de sabotagem, para chamar a atenção para suas causas, tal como ocorreu em diversas invasões, manifestações e atos de vandalismo contra uma base naval no Reino Unido, promovidos por grupos opositores da energia nuclear (CHAPMAN, DOWNES, *et al.*, 2017). Esses protestos podem interferir nas operações das instalações nucleares, causando atrasos e aumentando os custos operacionais. Além disso, a presença constante de manifestantes pode exigir recursos adicionais de segurança para garantir a proteção das instalações e do pessoal.

- Espionagem Industrial

A espionagem industrial em instalações nucleares envolve a coleta ilegal de informações confidenciais sobre tecnologias, processos e operações nucleares por competidores ou nações estrangeiras. Essas informações podem incluir dados sobre o projeto de reatores, procedimentos de segurança, pesquisas inovadoras e outras tecnologias sensíveis. Os espiões industriais podem empregar uma variedade de técnicas, desde a infiltração de agentes como funcionários até ataques cibernéticos para acessar sistemas e dados protegidos. O objetivo é obter vantagens tecnológicas ou econômicas, que podem resultar em perdas financeiras significativas e comprometer a competitividade da instalação nuclear. Para combater essa ameaça, é essencial implantar protocolos de segurança cibernética robustos, realizar verificações rigorosas de antecedentes de funcionários e monitorar continuamente atividades suspeitas dentro e ao redor das instalações (FASTER CAPITAL, 2024). Um exemplo notável foi o ataque do vírus *Stuxnet*, que invadiu usinas nucleares no Irã e na Índia, demonstrando a vulnerabilidade de sistemas críticos e a sofisticação de ataques cibernéticos dirigidos a instalações nucleares (ROHR, 2010).

- Crime Organizado

O crime organizado representa uma ameaça séria para as instalações nucleares, pois esses grupos buscam explorar vulnerabilidades para obter lucro ou exercer poder. Eles podem tentar roubar materiais nucleares para venda no mercado negro ou para uso em ameaças de extorsão. Além disso, podem se envolver em atividades de sabotagem para interromper operações ou chantagear autoridades. Os métodos utilizados pelo crime organizado podem incluir infiltração de pessoal, suborno, coerção e ataques físicos diretos. A presença dessas atividades criminosas pode comprometer a segurança das instalações e aumentar o risco de incidentes nucleares. Para mitigar essa ameaça, é fundamental que as instalações nucleares colaborem com agências de segurança e inteligência, implantem rigorosos controles de acesso e monitoramento contínuo, além de desenvolver programas de conscientização e treinamento para o pessoal sobre os riscos associados ao crime organizado.

- Terrorismo

O terrorismo é uma das ameaças mais graves para as instalações nucleares, pois ataques bem-sucedidos podem resultar em consequências catastróficas, incluindo a liberação de materiais radioativos, perda de vidas e pânico generalizado. Grupos terroristas podem ter como alvo essas instalações para causar destruição em massa, desestabilizar governos ou promover suas agendas ideológicas (IAEA, 2021b). Os métodos de ataque podem variar desde bombardeios, ataques armados, sabotagem interna até o uso de dispositivos explosivos improvisados (CHAPMAN, HOBBS, *et al.*, 2018). A segurança das instalações nucleares contra o terrorismo requer uma abordagem multifacetada, incluindo controles de acesso rigorosos, vigilância constante, resposta rápida a incidentes e colaboração estreita com forças de segurança e inteligência. Além disso, é vital manter a prontidão através de exercícios regulares de segurança e treinamento especializado para o pessoal em resposta a ameaças terroristas.

- Ameaças Internas

As ameaças internas são representadas por funcionários descontentes, infiltrados ou negligentes que podem comprometer a segurança das instalações nucleares. Esses indivíduos têm acesso privilegiado e conhecimento detalhado das operações, o que pode ser explorado para causar danos intencionais ou por negligência. Exemplos de ameaças internas incluem sabotagem, vazamento de informações sensíveis, e facilitação de acesso a atores externos (HOBBS, MORAN, 2015) Para mitigar essas ameaças, é essencial implantar programas rigorosos de verificação de antecedentes, monitoramento constante de atividades internas e promoção de uma cultura organizacional que valorize a segurança e o bem-estar dos funcionários. Treinamentos regulares e canais de comunicação abertos para denunciar comportamentos suspeitos também são fundamentais para prevenir incidentes internos.

- Catástrofes Naturais

Catástrofes naturais, como terremotos, tsunamis, inundações e furacões, representam ameaças significativas para a segurança de instalações nucleares. Esses eventos podem causar danos estruturais severos, interromper sistemas de resfriamento e resultar em vazamentos radioativos. A natureza imprevisível e a força devastadora dessas catástrofes exigem que as instalações nucleares sejam projetadas e mantidas com os mais altos padrões de resistência e resiliência. Portanto, é crucial investigar como as mudanças

climáticas podem afetar a segurança e as operações das usinas nucleares para estabelecer medidas de proteção e estratégias de mitigação (KIM, KWAG, *et al.*, 2024). Planos de emergência detalhados, treinamento regular de pessoal para resposta a desastres e sistemas redundantes de segurança são essenciais para minimizar os riscos associados a eventos naturais. Além disso, a avaliação contínua de vulnerabilidades e a adaptação às mudanças climáticas são cruciais para garantir a preparação e a capacidade de resposta das instalações nucleares frente a catástrofes naturais.

2.1.2.2 Ameaça Base de Projeto (ABP)

Uma estratégia para sistematizar a análise das ameaças é utilizar o conceito de Ameaça Base de Projeto (ABP). Uma ABP é a descrição quantitativa definida pelo Estado, dos atributos e características de um adversário potencial (externo ou interno) contra o qual o SPF de uma instalação nuclear é projetado e avaliado (CNEN, 2019a). Assim, é necessário um esforço do país para que sejam definidas as ameaças a serem consideradas no projeto do SPF de instalações específicas. A ABP postula parâmetros numéricos relativos aos adversários, caracterizando suas intenções, motivações e capacidades. A grande vantagem da definição de uma ABP é a sistematização do processo de definição das ameaças, garantindo uma base de projeto sólida e estável que orienta adequadamente o projetista do SPF nas tomadas de decisão durante o projeto (IAEA, 2017).

Em caso de inexistência de uma ABP consolidada, a CNEN preconiza que as estimativas de ameaças devem ser elaboradas considerando, pelo menos, os atributos e características dos adversários que indiquem sua motivação, a intenção e capacidade para realizar o ato maléfico; os adversários internos e externos; as medidas para uma abordagem gradual que considere os atos maléficos e suas possíveis consequências radiológicas e, por fim, as particularidades do entorno da instalação (CNEN, 2019a).

2.1.3 Identificação de alvos

A última fase dentro da etapa de determinação de objetivos do SPF é a identificação de alvos. Nesta fase, os ativos a serem protegidos pelo SPF (sistemas e equipamentos vitais, informações, material nuclear) são listados sem que a atratividade de tais ativos para o potencial adversário seja levada em consideração.

Para uma proteção ativa, é preciso que se defina um conjunto mínimo, mas ainda assim completo, de ativos a serem protegidos, uma vez que normalmente não é viável proteger todos os ativos em uma instalação.

Existem vários critérios a serem analisados para se determinar quais ativos precisam ser protegidos de acordo com as consequências indesejáveis que se pode ter com a subtração ou sabotagem dos ativos, entre eles destacam-se (GARCIA, 2008):

- Perda de vidas;
- Perda de material ou informação por meio de espionagem;
- Dano ambiental devido à liberação de material perigoso decorrente de roubo ou sabotagem;
- Interrupção de serviços críticos como distribuição de água, energia elétrica ou comunicações;
- Prejuízo no desempenho operacional;
- Violência nas áreas de trabalho, extorsão ou chantagem;
- Destruição das edificações;
- Prejuízos à reputação ou à imagem; e
- Imputação legal.

Dentre essas consequências, é preciso estabelecer uma ordem de acordo com a prioridade de cada empresa. Por exemplo, pode ser que a perda de vidas e dano ambiental sejam consequências inaceitáveis, enquanto que prejuízo no desempenho operacional ou na reputação sejam consequências indesejáveis. Essa classificação contribui para analisar a prioridade de proteção dos ativos selecionados.

Para instalações com material nuclear, a CNEN estabelece uma categorização, Categoria I, II e III, que varia de acordo com o tipo de material, com sua massa dele ou sua condição química ou composição (CNEN, 2019a). Por exemplo, Urânio-235 enriquecido a 20% é considerado de Categoria I se a quantidade for maior ou igual a 5 kg, Categoria II se estiver entre 1 kg e 5kg, mas já é considerado de Categoria III se a massa estiver entre 15 g e 1 kg. Para cada categoria, tem-se uma exigência a respeito da área de armazenagem desse material, sendo que materiais de Categoria I precisam ser armazenados em áreas vitais, enquanto que matérias nas Categorias II e III são

acondicionados em áreas vitais ou protegidas. A definição das áreas conforme a norma é a seguinte:

- Área Vital: área de segurança interna a uma área protegida, delimitada por estrutura física cujas paredes, teto e pisos constituem barreiras físicas, que contenha material nuclear, equipamentos, sistemas e aparelhos cuja sabotagem pode levar direta ou indiretamente à paralisação da instalação nuclear ou a um acidente nuclear com consequências radiológicas altas;
- Área protegida: área de segurança interna a uma área vigiada, mantida sob proteção, cercada por uma barreira física, um número reduzido de acessos controlados, dotada de medidas adicionais de proteção física e que contenha material nuclear de categoria I ou II, ou ainda equipamento que possa ser alvo em potencial de atos de sabotagem; e
- Área vigiada: área de segurança adjacente e exterior a uma ou mais áreas protegidas, mantida sob constante vigilância, cercada e demarcada com avisos e sinais adequados, que alertem se tratar de área de segurança com acesso controlado.

2.2 Projeto do Sistema de Proteção Física – Funções do SPF

Conhecendo-se os objetivos estabelecidos para o Sistema de Proteção Física e tendo se determinado o que se deve proteger e contra quem se deve proteger, a próxima etapa da concepção do SPF é o projeto do sistema propriamente dito.

Na primeira parte do projeto do SPF, o projetista precisa considerar medidas combinadas de proteção, como a instalação de cercas, alarmes, sensores, catracas, procedimentos operacionais, para que os objetivos estabelecidos para o SPF sejam cumpridos. Além disso, deve-se atentar para algumas diretrizes gerais de modo a tornar o SPF mais eficiente, como detectar uma ameaça o mais longe possível do alvo e posicionar mecanismos de atraso o mais próximo possível do alvo.

A primeira parte do projeto do SPF baseia-se em três pilares: detecção, atraso e resposta. Estes são conhecidos como as Funções do Sistema de Proteção Física.

O sistema necessita desempenhar as funções essenciais da proteção física por meio de um gerenciamento seguro. Isso inclui a instalação de sistemas que impeçam ou atrasem o acesso não autorizado, a detecção para os casos nos quais o acesso não

autorizado aconteça e a implantação de medidas para reduzir os impactos e restabelecer a segurança das fontes radioativas (IAEA, 2019a). Os principais parâmetros que compõem as funções básicas são os seguintes:

- **Detecção**: consiste na identificação de ações perpetradas por um adversário, seja interno ou externo, com o intuito de atingir as fontes a serem protegidas, independentemente da condução da ação, seja de maneira explícita ou dissimulada. Essa detecção pode ser realizada por meio de sensores (um alarme, por exemplo), observação humana ou outros métodos similares.
- **Atraso**: é considerado o período de tempo, após a detecção, de que um adversário precisa para remover ou sabotar o material radioativo. Várias medidas podem ser implantadas para retardar o adversário. Assim, o atraso é normalmente inserido através do uso de barreiras ou outros obstáculos físicos que devem ser penetrados ou vencidos pelo adversário, como, por exemplo, barreiras, cercas, grades, portões ou outros meios físicos;
- **Resposta**: abrange as ações realizadas após a detecção de um evento de segurança nuclear para evitar que um adversário conclua com sucesso um ato de remoção não autorizada ou sabotagem. As atividades de resposta, realizadas por uma equipe de reação, guardas, polícia, seguranças ou militares, procuram interromper e derrotar o adversário enquanto a tentativa de remoção não autorizada ou sabotagem está em andamento, a fim de evitar a sua conclusão.

Estas três funções do SPF trabalham juntas para que o objetivo de proteger os alvos seja atingido. Para que isso ocorra, é preciso garantir que o sistema detecte eficazmente um ataque levando à sua notificação, que medidas de retardo atrasem o progresso do adversário (atraso), garantindo que as forças de reação tenham tempo de resposta (resposta) suficiente para mitigar a ação do adversário.

2.2.1 Detecção

Para que haja a detecção de uma ação adversária, alguns atos são necessários como o acionamento de um sensor devido a um estímulo, envio dessa informação para o subsistema do sensor e a exibição para o sistema de monitoração e, por fim, a análise da informação proveniente do sensor por uma pessoa que julga se o alarme acionado é uma ocorrência válida ou não. Vale ressaltar que a análise de uma pessoa é fundamental para

o processo de detecção, pois não se considera a existência da detecção se não houver a análise.

Parte importante do sistema de detecção é o controle de acesso de pessoal. O controle é responsável por permitir acesso ao pessoal autorizado e detectar tentativas de entrada de pessoal e material não autorizado. Um sistema de controle de acesso eficaz deve possuir as seguintes características: permitir o acesso seguro de pessoas e materiais autorizados, apresentar resistência contra tentativas de violação, assegurar a proteção física das forças de segurança, operar adequadamente em situações de alta demanda, impedir acessos até que o processo de identificação seja concluído, e estar sob constante monitoramento por pessoal de segurança.

Conforme previsto pela CNEN, as pessoas com acesso autorizado às áreas de segurança devem portar distintivos em local visível e que permita a identificação por foto (CNEN, 2019a). Quanto maior o nível de segurança do local, mais robustas devem ser as medidas de controle de acesso. Dessa forma, para um baixo nível de proteção pode-se considerar a utilização de apenas um tipo de controle de acesso, seja por crachá, senha ou biometria. Nos casos de um nível médio de proteção, dois sistemas de verificação podem ser usados, combinando crachá e senha ou senha e biometria. Por fim, para altos níveis de proteção, recomenda-se a utilização de três métodos de verificação de identidade como crachá, senha e biometria.

Além dos sensores com transmissão para um central de monitoração e os sistemas de controle de acesso, a detecção pode ser realizada por meio de membros da força de segurança, quer sejam posicionados em locais fixos de vigilância ou volantes no perímetro, e que são capazes de realizar a detecção de alguma intrusão.

Os sistemas de alarme também fazem parte do conjunto de ações empregadas na detecção. Os alarmes são destinados a alertar por meio de sinais sonoros ou visuais quaisquer tipos de intrusão ou interferência, auxiliando a força de segurança no processo de decisão se um evento está ou não desencadeando um incidente de segurança física (CNEN, 2019a).

Como os sensores estão inseridos no meio e não são capazes de distinguir entre a detecção de uma real intrusão ou de outros eventos, como a entrada de um animal na zona do sensor, é necessário que haja uma central de alarmes para que possam ser processados e exibidos de forma adequada a permitir uma rápida análise. Sendo assim, é fundamental

que a central de alarmes seja constantemente guarnecida para que, após o processamento do alarme, o contato com a força de reação seja o mais rápido possível para que atuem eficientemente na mitigação do evento. Ainda, rotinas de teste dos alarmes e de comunicação com a força de reação devem ser estabelecidas para que se garanta a correta operação do sistema.

2.2.2 Atraso

Outra função importante do SPF é o atraso. O atraso pode ser garantido por pessoas, como a força de reação, barreiras, bloqueios, e o objetivo é garantir que a força de reação tenha tempo hábil de interceptar o intruso e mitigar a ação pretendida antes que ocorra.

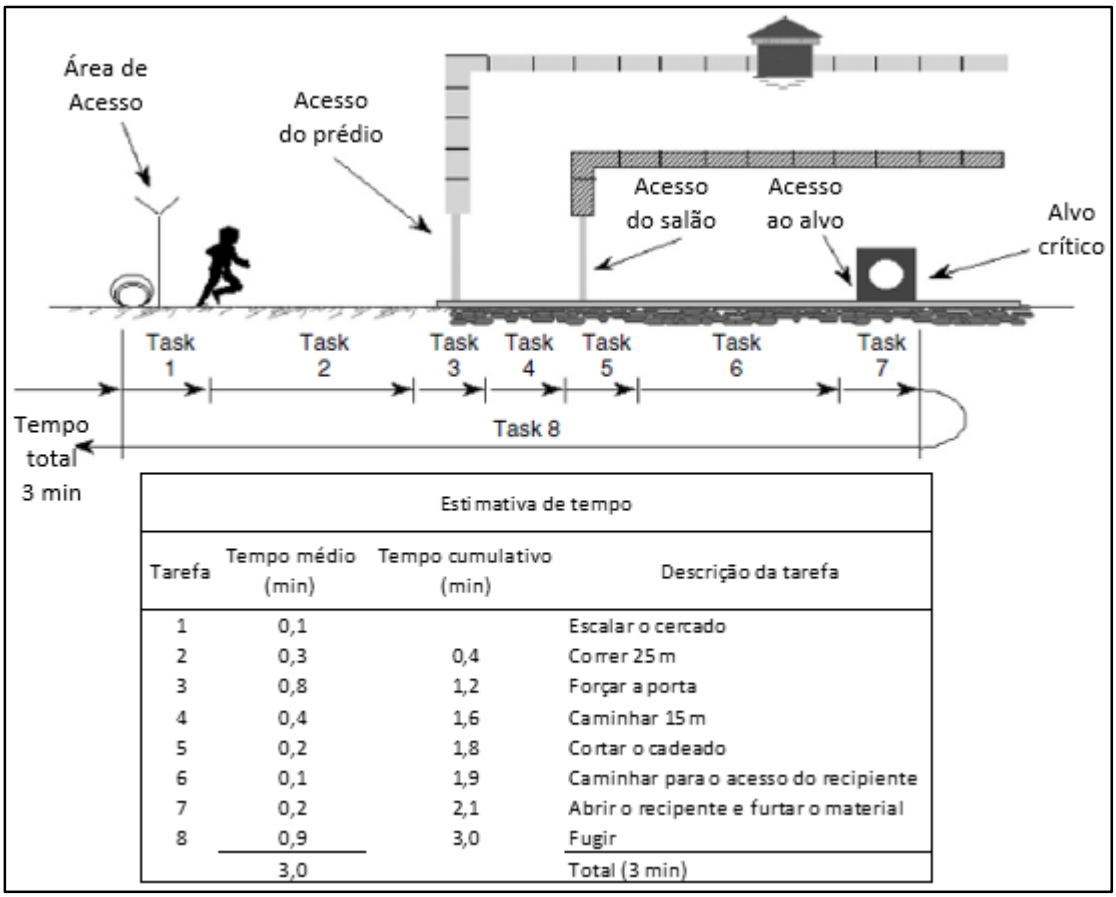
A efetividade de cada medida de atraso é o tempo necessário para que o adversário, após a detecção, transponha o elemento de atraso. É importante ressaltar que o atraso é considerado apenas pós detecção porque é quando já se sabe da existência de uma tentativa de sabotagem ou subtração de material nuclear não autorizada e se deseja retardar o adversário de modo que a força de reação consiga atuar.

O atraso proporcionado pelos obstáculos físicos depende bastante das ferramentas e técnicas usadas pelos adversários para transpor os obstáculos (GARCIA, 2008). Por isso, é necessário que as barreiras sejam testadas para que se tenha uma noção realista do tempo de atraso que proporcionam, ainda mais se forem barreiras customizadas para o local onde o SPF esteja sendo projetado. A eficiência da barreira é medida principalmente pelo tempo que o adversário leva para contornar esta barreira.

São três os principais tipos de barreiras considerados: barreiras passivas, como portas, paredes, cercas, muros; presença de guardas, que só garantem o atraso para intrusos que utilizem a força se estiverem em locais abrigados; barreiras dispensáveis que são montadas apenas quando necessário durante um ataque, por exemplo, bombas de fumaça.

Além das barreiras físicas, o atraso pode ser conseguido por meio da distância de deslocamento entre o ponto de detecção até o ponto para a realização da sabotagem ou subtração do material nuclear. Desse modo, sítios com áreas maiores, provendo longas distâncias entre os pontos de entrada e os de possível interesse de um adversário, contribuem bastante para que haja um atraso eficiente em alguma ação inimiga.

Desse modo, o tempo que o adversário levará para atingir o ponto de interesse precisa ser determinado considerando todos os obstáculos que precisam ser vencidos até atingir o local, conforme demonstrado na Figura 2.



Estimativa de tempo			
Tarefa	Tempo médio (min)	Tempo cumulativo (min)	Descrição da tarefa
1	0,1		Escalar o cercado
2	0,3	0,4	Correr 25 m
3	0,8	1,2	Forçar a porta
4	0,4	1,6	Caminhar 15 m
5	0,2	1,8	Cortar o cadeado
6	0,1	1,9	Caminhar para o acesso do recipiente
7	0,2	2,1	Abrir o recipente e furtar o material
8	0,9	3,0	Fugir
	3,0		Total (3 min)

Figura 2 – Caminho percorrido pelo adversário até o alvo.

2.2.3 Resposta

Dois importantes aspectos da função de resposta do sistema de proteção a uma ameaça incluem a força de reação e o sistema de comunicação da força de reação. A resposta é fundamental para o SPF, pois é a função efetivamente responsável por impedir que um adversário execute uma sabotagem ou subtração de material nuclear não autorizada. Em um bom projeto do SPF, é necessário que a detecção da atividade do adversário seja feita corretamente, pois sem a detecção da ação, a equipe da força de reação nem chega a ter conhecimento que há a demanda de atuação e combate à força adversária. Ainda, a imposição de obstáculos com o objetivo de atrasar o adversário é indispensável para garantir que a equipe da FR tenha tempo suficiente para combater o sinistro. Por fim, o dimensionamento correto da força de reação de acordo com as

ameaças levantadas é o que garante que as forças serão capazes de neutralizar a ação adversária.

A força de reação é composta por pessoal treinado para responder a algum incidente de segurança física. A força de reação pode ser composta por agentes internos, tais como guardas, ou agentes externos, envolvendo a polícia local, corpo de bombeiros e até polícia federal. Segundo a norma da CNEN, "guarda" é um indivíduo selecionado e treinado para a atividade de proteção física, uniformizado e, preferencialmente, portando arma de fogo (GARCIA, 2008). São eles os responsáveis por realizar controle de acesso à instalação nuclear, inspeção de pessoal e veículos, patrulhas periódicas para averiguação de anormalidades, resposta a alarmes avaliando as causas, operação de uma estação de alarmes, acompanhamento de deslocamentos do material nuclear.

A força de resposta possui duas funções principais. A primeira é a interrupção da ação, intervindo na ação do adversário de modo a impedir a execução. A segunda é a neutralização, que consiste na capacidade de impedir que a ação adversária seja finalizada, quer seja pela fuga, captura ou morte do adversário.

2.3 Análise do Sistema de Proteção Física

A última macroetapa do projeto do SPF, conforme a Figura 1, consiste em avaliar o desempenho do Sistema de Proteção Física projetado. É importante que o SPF seja um sistema de alto desempenho e, para isso, podem-se utilizar ferramentas computacionais sofisticadas de análise e avaliação para estimar níveis mínimos de desempenho atingidos pelo SPF. O uso de ferramentais computacionais é mais indicado, tendo em vista que a realização de testes normalmente não é viável para uma instalação, pois pode afetar o seu funcionamento operacional e até introduzir uma vulnerabilidade desnecessária.

Dessa forma, esta última etapa no processo de projeto do SPF visa a verificar se o projeto atingiu os objetivos de proteção, podendo apontar pontos fracos e necessidades de melhorias. Assim, o SPF pode ser reforçado com mais medidas de segurança física nos pontos falhos averiguados. Ao final, a análise é refeita para verificar se os objetivos foram, finalmente, alcançados.

Para sistemas de proteção de ativos de alto valor, cujas consequências de perda sejam inaceitáveis, como é o caso de centrais com material nuclear, é fundamental que seja realizada uma rigorosa análise quantitativa. Já uma análise qualitativa, mais

simplificada, é adequada para sistemas onde a perda ou o dano ao ativo pode ser suportado, como por exemplo, prédios comerciais e residenciais, lojas comerciais, pequenas empresas (GARCIA, 2008).

A análise quantitativa pode ser realizada por meio de diversos modelos computacionais que avaliam a efetividade de um SPF. Muitos desses modelos são baseados na existência de caminhos adversários, os quais representam um caminho ordenado de ações contra uma instalação que, quando concluído, resulta no roubo ou sabotagem do ativo. A execução deste caminho por um adversário, tal como demonstrado na Figura 2, é avaliada quantitativamente utilizando-se a previsão de tempos para que o indivíduo realize todas as etapas do caminho e, desse modo, execute a ação adversa planejada.

Por fim, o projeto do SPF precisa ser verificado de um ponto de vista de alto nível para que se avalie o quanto de risco é aceitável na segurança da instalação versus os custos e viabilidade de implementação do SPF. Estas etapas da análise do SPF são mais bem detalhadas nas seções abaixo.

2.3.1 Modelos Computacionais

Há uma ampla variedade de modelos computacionais analíticos quantitativos disponíveis que auxiliam os analistas na avaliação da eficácia do SPF. A maioria desses modelos compartilha uma estrutura básica similar. Eles oferecem um mecanismo para inserção de dados de entrada, execução dos cálculos necessários e exibição dos resultados. Alguns desses modelos são especialmente eficazes na análise de ameaças internas, enquanto outros são mais adequados para ameaças externas.

A análise de segurança em instalações críticas, como a BNH, requer o uso de modelos computacionais que permitam avaliar a eficácia das medidas de proteção contra adversários. Diversos modelos de simulação foram desenvolvidos para esse fim, cada um com suas particularidades e aplicabilidades, conforme brevemente descrito:

- **SAVI** (*System Analysis of Vulnerability to Intrusion*) - Este modelo fornece uma análise abrangente de todos os caminhos do adversário para a instalação. Uma vez que os dados sobre a ameaça, alvo, instalação, itens do SPF específicos do local, e o tempo da força de resposta for inserido, o código SAVI calcula e classifica os 10 caminhos mais

vulneráveis de acordo com suas possibilidades de interrupção. Este modelo usa o algoritmo EASI para prever o sistema desempenho (SNL, 1989);

- **ASSESS** (*Analytic System and Software for Evaluating Safeguards and Security*) – é uma extensão avançada do modelo SAVI, incorporando módulos extras para análise de neutralização de invasores, avaliação de adversários internos e conluio entre adversários internos e externos. Ele utiliza a probabilidade de interrupção e o modelo DSA, trazendo maior robustez à análise de segurança. Além de suas novas funcionalidades, o ASSESS apresenta uma estrutura detalhada composta por seis módulos relativamente independentes, permitindo maior flexibilidade e abrangência na avaliação de ameaças (PHILIPS, 2004);

- **SAFE** (*Safeguards Automated Facility Evaluation*) – o SAFE processa os dados de entrada relacionados à instalação, incluindo recursos de proteção física, caminhos do adversário e a força de resposta, para identificar os caminhos mais vulneráveis dentro da instalação. Em seguida, aplica o modelo EASI nesses trajetos críticos e utiliza o BATLE (*Brief Adversary Threat Loss Estimator*), um modelo de engajamento força-contra-força, para calcular a probabilidade de neutralização dos adversários, fornecendo uma análise detalhada da eficácia da proteção (GARCIA, 2008);

- **SNAP** (*Safeguards Network Analysis*) – utiliza uma abordagem baseada em modelagem de rede para resolver problemas de segurança, exigindo que o analista represente detalhadamente a instalação, a força de reação e a força adversária. Altamente dependente do cenário, o SNAP emprega um método de atributos para gerar uma medida de eficácia do Sistema de Proteção Física dentro de um contexto específico. No entanto, em aplicações onde não se espera a ocorrência de confrontos diretos entre forças, o EASI é a ferramenta de análise mais adequada, destacando-se por sua simplicidade e eficiência (GARCIA, 2008);

- **JCATS** (*Joint Conflict and Tactical Simulation*) – é uma ferramenta de software projetada para estimar a eficácia da força de resposta. Desenvolvida inicialmente para treinamento de oficiais e suas equipes em comandos e ordens durante intervenções, a ferramenta também contribui para a análise de proteção física. Ela avalia intervenções terrestres e aéreas, incluindo ações de unidades de combate a incêndios, por meio de uma simulação de combate com modelagem realista de terreno, áreas protegidas, armas e munições. Do ponto de vista da proteção física, o JCATS é útil para calcular a

probabilidade de eliminação de intrusos e possui uso parcial na identificação de locais vulneráveis dento do sistema de proteção (SNL, 2005), (SNL, 2006);

- **EASI** (*Estimate of Adversary Sequence Interruption*) – é uma ferramenta simples e de fácil utilização para avaliar o desempenho do Sistema de Proteção Física ao longo de um caminho específico, considerando condições específicas de ameaça e operação. Ele calcula a probabilidade de interrupção com base em uma análise das interações entre os elementos de detecção, atraso, resposta e comunicação (GARCIA, 2008). Este modelo está detalhado na seção 3.2.

Para a BNH, o EASI oferece uma vantagem superior ao integrar os aspectos de detecção, atraso e resposta, proporcionando uma visão clara do tempo necessário para interromper o adversário, essencial em instalações nucleares. O EASI se destaca por ser especificamente projetado para medir a eficácia de barreiras, sensores e tempos de resposta em cenários de intrusão externa, que são prioridades para a proteção de instalações como a BNH.

Dessa forma, o EASI oferece a melhor combinação de características para avaliar a segurança física de uma instalação nuclear como a BNH, permitindo uma abordagem detalhada e eficaz para proteger contra intrusões adversárias.

Todos os modelos empregados são complexos e exigem a disponibilidade de dados extensivos sobre o desempenho do SPF. Desse modo, é preciso ter disponíveis informações sobre a probabilidade de detecção para os tipos de sensores, tempo médio para vencer as barreiras, probabilidade de comunicação com a força de reação, desvio padrão da força de resposta entre outros. Cada modelo, aplicável a um tipo de análise, requererá dados específicos que precisam ser levantados em estudos específicos, compilados em bancos de dados disponibilizados, como o do *Sandia National Laboratories* (SNL, 2017).

Existem, ainda, algumas ferramentas comerciais para a realização da análise qualitativa. Estas ferramentas são mais simples e devem ser usadas com cautela para sistemas de proteção de ativos com consequências elevadas em caso de perda. No entanto, podem auxiliar na avaliação inicial das necessidades de um sistema de proteção complexo, como uma forma de iniciar o projeto do SPF.

Os modelos computacionais são ferramentas valiosas na análise de desempenho do SPF, no entanto, ainda mais fundamental é o emprego de analistas dedicados para

construir e interpretar os modelos complexos, utilizando ferramentas de análise de caminhos e simulações de computador. Dessa forma, é imprescindível que o SPF seja projetado e avaliado por pessoal competente, a fim de garantir sua eficácia.

2.3.2 Diagrama de Sequência do Adversário (DSA)

O diagrama de sequência do adversário é uma ferramenta analítica fundamental no campo da segurança de instalações nucleares. Este diagrama fornece uma representação detalhada e cronológica das possíveis ações de um adversário ao tentar realizar uma intrusão em uma instalação protegida. A análise cuidadosa do comportamento adversário através deste diagrama é essencial para o desenvolvimento de sistemas de segurança robustos, capazes de antecipar, detectar e neutralizar ameaças antes que estas comprometam a integridade da instalação ou causem danos significativos.

O DSA representa graficamente os elementos do sistema de proteção usados para auxiliar avaliar a eficácia do SPF em uma instalação, permitindo demonstrar os caminhos que os adversários podem seguir para atingir os objetivos de sabotagem ou roubo. O modelo também possibilita identificar os caminhos mais vulneráveis que correspondem àqueles com valores de P_I mais baixas, que determinarão a eficácia total do SPF.

Em conformidade com GARCIA (2008), existem três etapas básicas para a criação de um DSA para uma determinada instalação:

1. Realizar o modelo da instalação separando-a em áreas físicas adjacentes;
2. Definir camadas de proteção e elementos de caminho entre as áreas adjacentes; e
3. Registrar valores de detecção e atraso para cada elemento.

O diagrama de sequência do adversário mapeia as etapas potenciais de uma tentativa de intrusão, desde o planejamento inicial até a execução final. Cada etapa no diagrama representa um momento crítico no qual o adversário pode ser detectado ou interrompido pelas medidas de segurança. Para uma instalação nuclear, onde a proteção contra ameaças internas e externas é de máxima importância, este diagrama permite a visualização de cenários complexos de ataque, auxiliando na identificação de vulnerabilidades e na otimização dos recursos de defesa.

Sendo assim, o DSA modela a instalação separando-a em áreas físicas adjacentes, conforme apresentado na Figura 3 que mostra um DSA genérico para uma determinada instalação. As áreas da instalação são representadas por retângulos, com áreas nomeadas para modelar um local específico, e identificando as camadas de proteção existentes entre áreas adjacentes. Cada camada de proteção consiste em uma série de elementos de proteção, que são os blocos básicos de um SPF (cercados, portas, grades, paredes, janelas etc.).

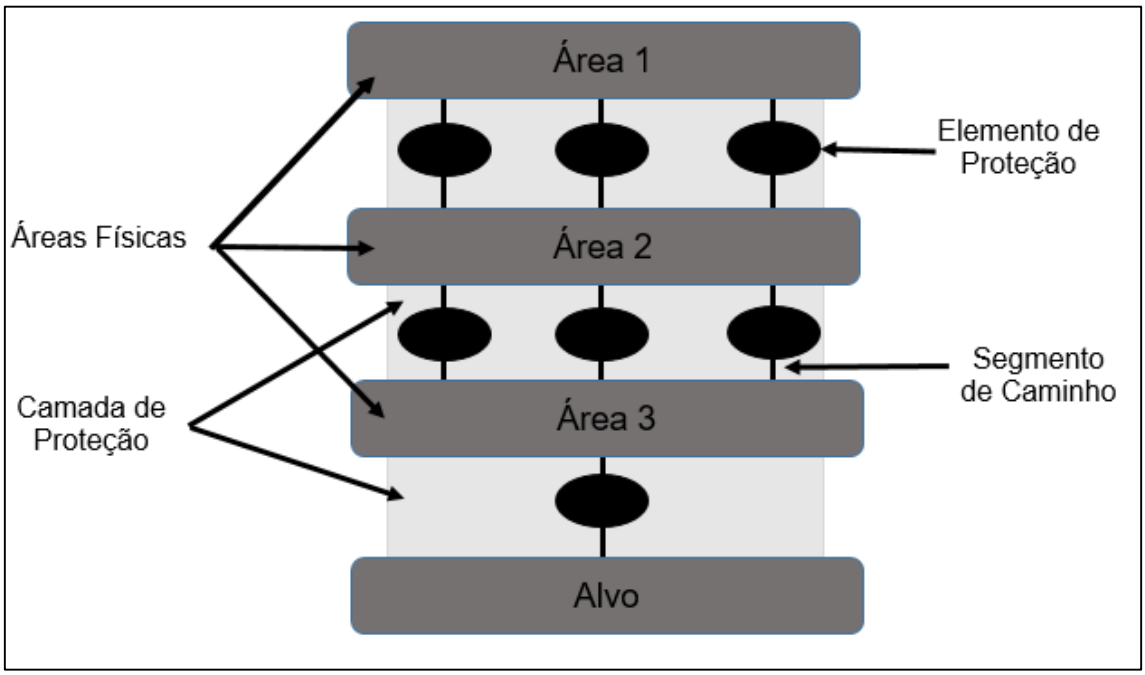


Figura 3 – Diagrama esquemático de um Diagrama de Sequência do Adversário

Uma vez modelado o DSA, é necessário atribuir sensores com as respectivas Probabilidades de Detecção (P_D), atraso médio, desvio padrão do atraso e localização para cada elemento de proteção. Os segmentos de caminho de entrada e de saída podem ser modelados. O segmento de caminho de entrada consiste no caminho percorrido pelo adversário de uma área externa até o alvo, ao passo que o segmento de caminho de saída é o caminho que o adversário percorre no sentido de se evadir do local, ou seja, do alvo até o local externo. Um determinado elemento de proteção pode ser percorrido uma vez (na entrada ou na saída) ou pode ser percorrido duas vezes, na entrada e na direção oposta na saída. Desta forma, o adversário tem que vencer sequencialmente um elemento em cada camada de proteção enquanto percorre um caminho dentro da instalação até o alvo. Assim, o DSA representa todos os caminhos realistas possíveis que um adversário pode seguir para atingir um alvo.

Este método não apenas detalha as ações do invasor, mas também mapeia a interação entre essas ações e os sistemas de segurança da instalação. Isso inclui a localização de sensores, a cobertura das câmeras de vigilância, e a disposição das forças de reação. Cada interação no diagrama representa uma oportunidade para detectar e deter o adversário.

Desta forma, a utilização do diagrama de sequência do adversário em instalações nucleares tem aplicações práticas que vão além do planejamento inicial de segurança. Ele é utilizado em treinamentos de resposta a emergências, onde os cenários são simulados para avaliar a prontidão das equipes de segurança. Além disso, o diagrama é uma ferramenta valiosa durante auditorias de segurança, permitindo a revisão e atualização dos procedimentos de segurança com base em novas ameaças ou em falhas identificadas.

2.3.3 Análise de Risco

O projeto do SPF deve avaliar e balancear com recursos disponíveis para exercer a proteção de forma a garantir que não haja desperdício de recursos com proteção desnecessária ou a falta de proteção adequada em pontos críticos da instalação. Nesta etapa, busca-se responder se a probabilidade de interrupção encontrada ao longo do caminho mais vulnerável estudado é boa o suficiente para a instalação em análise.

Uma forma de quantificar a performance do SPF é avaliar o risco que sobra após a implantação das barreiras. A avaliação do risco é, então, feita conforme apresentado na Equação (1) (GARCIA, 2006).

$$R = P_A * (1 - P_E) * C \tag{1}$$

Onde:

R: risco de um adversário obter acesso ou roubar ativos críticos. O risco é medido por unidade de tempo, um a cinco anos, por exemplo;

P_A: probabilidade de um ataque adversário durante um período de tempo;

P_E: probabilidade de eficácia do sistema. É o produto das probabilidades de interrupção e a de neutralização; e

C: valor da consequência. É um valor entre zero e um que se relaciona com a gravidade da ocorrência do evento, um fator de normalização, que permite o valor de risco condicional ser comparado com os demais riscos da instalação.

Nota-se pela equação (1), que o risco relacionado a roubo / sabotagem na planta nuclear é diretamente proporcional as três parcelas distintas:

1. P_A, probabilidade de ataque: relaciona-se com a atratividade do material;
2. (1-PE), probabilidade de sucesso de um ataque: representa o valor complementar da probabilidade de eficácia, que corresponde a ineficácia do SPF; e
3. C, consequência: relaciona-se com as consequências prejudiciais do material nuclear para pessoas e meio ambiente.

Portanto, a redução do risco pode ser realizada por meio da atuação nos parâmetros descritos na equação (1). O gerenciamento de risco é conduzido principalmente por três perspectivas (IAEA, 2011):

1. Redução da ameaça: a ameaça pode ser reduzida por meio da dissuasão de medidas robustas de proteção física, ou pela proteção física, ou pela confidencialidade de informações sensíveis;
2. Melhora na eficácia do SPF: A eficácia do SPF pode ser aumentada, implementando defesa em profundidade ou estabelecendo e mantendo uma cultura de segurança nuclear; e
3. Redução das consequências potenciais de atos maliciosos: Isso pode ser atingido modificando determinados fatores, por exemplo, a quantidade, fator de enriquecimento e o tipo de material nuclear.

Este trabalho adota, como premissa central, a utilização da abordagem número 2 para gerenciar o risco na Base Naval Hipotética (BNH).

Com a equação do risco, Equação (1), é possível modelar o efeito de algumas hipóteses feitas e simplificar a análise. Caso se considere a existência de um ataque, P_A se torna 1, e se ainda for considerado que a consequência é a pior possível, ou seja, C igual a 1, tem-se que o risco R é dado exclusivamente pela eficácia do SPF. Neste caso, se estabelece o caso mais grave, no qual um adversário capaz ataca o ativo mais valioso da instalação. A partir desse caso, é possível reavaliar os valores da consequência C e estabelecer os riscos para a instalação frente a perdas de ativos menos valiosos.

Consequência:

Para este estudo, o valor das consequências será determinado por uma análise amplamente utilizada na área de *safety*, que adota a Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES) como referência para graduar a severidade do impacto de um possível roubo ou sabotagem do material nuclear da BNH.

A INES foi desenvolvida pela AEIA com o objetivo de comunicar a gravidade de incidentes e acidentes em instalações nucleares de maneira compreensível ao público e às autoridades. A escala classifica os eventos em sete níveis, com base em seu impacto na segurança, saúde humana e meio ambiente como apresentado na Figura 4.

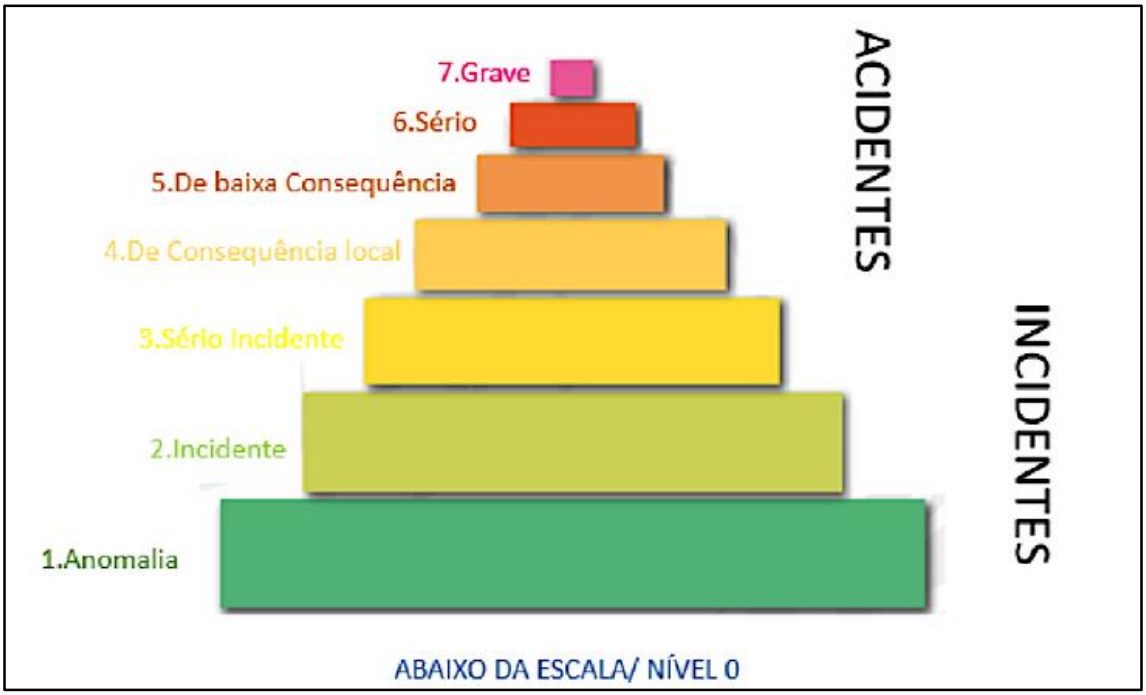


Figura 4 – Escala INES de acidentes e incidentes (IAEA, 2019b)

Eventos sem significância são classificados como abaixo da escala/nível 0.

Os níveis de 1 a 3 são considerados incidentes (IAEA, 2013):

- Nível 1 – Anomalia: Desvios pequenos em relação à operação normal, sem impacto significativo na segurança;
- Nível 2 – Incidente: Exposição ao material radioativo em níveis superiores ao permitido para trabalhadores, sem impacto significativo na população; e

- Nível 3 – Incidente grave: Exposição de trabalhadores ou pequenas quantidades de liberação de material radioativo no ambiente, que afeta a segurança da instalação, mas com consequências limitadas.

Os níveis de 4 a 7 são considerados acidentes (IAEA, 2013):

- Nível 4 – Acidente com consequências locais: Liberação de material radioativo fora da instalação, que requer intervenções localizadas, mas com impacto limitado;
- Nível 5 – Acidente com consequências maiores: Liberação limitada de material radioativo que pode levar à implementação de contramedidas, ou graves danos ao núcleo do reator;
- Nível 6 – Acidente grave: Liberação significativa de material radioativo, requerendo a implementação de contramedidas extensas para proteger a população; e
- Nível 7 – Acidente severo: Liberação massiva de material radioativo com efeitos generalizados no meio ambiente e na saúde pública, como ocorreu em Chernobyl e Fukushima.

A INES é amplamente utilizada para classificar e informar sobre a severidade de eventos nucleares, facilitando a tomada de decisão e a comunicação clara em situações de emergência.

O valor da consequência é determinado pela equação (2) (IAEA, 2013):

$$C = 0{,}8 \cdot 10^{\mathrm{N}-7} \tag{2}$$

Onde,

N é o nível do evento na escala de INES.

No caso de subtração de material nuclear da BNH, o evento foi classificado como nível 5 (médio lançamento de material radioativo para fora da contenção) e, com a aplicação da equação (2), obteve-se um valor de consequência equivalente ao demonstrado nas equações (3) e (4):

$$C = 0{,}8 \cdot 10^{5-7} \tag{3}$$

$$C = 8{,}0 \cdot 10^{-3} \tag{4}$$

A estimativa e a avaliação de risco para a BNH serão abordadas novamente na seção 6.3.3, onde serão analisados e definidos os parâmetros essenciais para calcular o risco associado ao furto de material nuclear, considerando tanto os cenários possíveis quanto as medidas de proteção existentes.

2.3.4 O Ponto de Detecção Crítico (PDC)

O Ponto de Detecção Crítico (PDC) é um conceito bastante importante em sistemas de segurança para instalações que requeiram alta proteção, como usinas nucleares, instalações militares ou infraestruturas críticas. O PDC representa o ponto específico no sistema de segurança onde a detecção de uma ameaça ou invasão deve ocorrer para garantir que haja tempo suficiente para que a força de reação consiga combater a ameaça. Este ponto precisa ser estrategicamente posicionado de modo a maximizar a probabilidade de interceptação antes que a ameaça alcance o seu objetivo.

Determinar o PDC é fundamental para que se avalie qual o tempo disponível que as forças de reação têm para reagir à detecção de uma ameaça. Caso a detecção ocorra após o PDC, não restará tempo hábil para que o adversário seja contido e a ameaça neutralizada, resultando em uma grave falha de segurança.

A identificação do PDC exige uma análise do layout da instalação, das possíveis rotas dos adversários, dos tempos de resposta das forças de reação e das capacidades dos sistemas de detecção. O PDC deve ser posicionado onde a ameaça seja mais provável de ser detectada, onde haja tempo suficiente para uma resposta eficaz, e onde se minimizem falsos alarmes para evitar sobrecarregar as forças de reação.

Para exemplificar o conceito, é apresentada na Figura 5, uma linha do tempo de uma invasão a uma instalação e a localização do PDC.

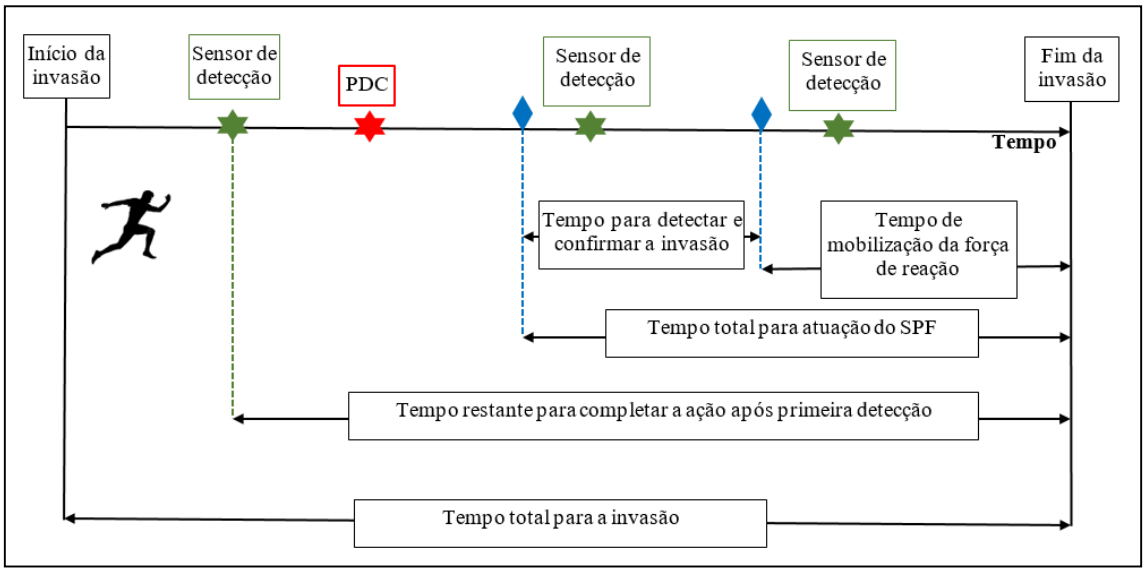


Figura 5 – Diagrama esquemático da interrupção da ação do adversário pelo SPF

Pode-se observar que o PDC está localizado no terceiro ponto de detecção. Neste ponto, o tempo restante até que o adversário cumpra a missão ainda é superior ao tempo necessário para que a força de reação se mobilize para interromper a ação adversária. Sendo assim, é bem provável que a ação do invasor não seja bem-sucedida. Entretanto, caso a detecção ocorra no ponto posterior ao PDC, a força de reação não mais possuirá o tempo hábil de mitigar a ação adversária e, consequentemente, é bastante provável que o invasor tenha êxito em sua missão.

Em instalações nucleares, é desejável que ameaças externas sejam detectadas o quanto antes, por meio de uma camada de sensores de radiação ou movimento que abrange a área externa da instalação, permitindo a detecção de qualquer aproximação antes que o invasor atinja áreas sensíveis, por exemplo.

O PDC é um elemento essencial para o sistema de segurança e, por isso, precisa ser atualizado regularmente, especialmente com a evolução constante das táticas de adversários e dos sistemas empregados na proteção física das instalações. Pode-se lançar mão para avaliar a eficácia do PDC, ferramentas de simulação de invasão ou realização de testes de penetração. Dessa forma, garante-se que o sistema opere conforme planejado.

O Ponto de Detecção Crítico é uma peça central em qualquer sistema de segurança robusto, garantindo que haja um equilíbrio adequado entre detecção precoce e resposta efetiva, protegendo instalações sensíveis contra uma ampla gama de ameaças.

2.4 Cultura de segurança nuclear

A cultura de segurança nuclear é um componente fundamental na gestão e operação seguras de instalações nucleares, abrangendo crenças, valores, atitudes, comportamentos e práticas compartilhadas por todos os envolvidos na indústria nuclear. Ela vai além das medidas técnicas e regulamentares, focando na mentalidade coletiva e no compromisso de priorizar a segurança em todos os níveis hierárquicos e áreas de atuação. Assim, não é suficiente um Sistema de Proteção Física bastante robusto se não houver uma conscientização por parte de todo o pessoal que trabalha na instalação nuclear da importância das medidas de segurança para manter a sua integridade física da instalação.

Essa cultura é construída sobre a compreensão de que a segurança é a principal prioridade e responsabilidade de todos os envolvidos, desde os operadores de instalações nucleares até os reguladores, gerentes, engenheiros, técnicos e demais profissionais que trabalham nesse setor. Além disso, a cultura de segurança nuclear envolve:

- Comunicação Aberta e Transparente: Encoraja um ambiente onde a comunicação aberta é valorizada, permitindo que as preocupações com a segurança sejam expressas livremente, sem medo de retaliação. Isso inclui relatar incidentes, erros e sugerir melhorias sem que haja consequências negativas para quem relata.
- Aprendizado Contínuo: Promove uma mentalidade de aprendizado constante, onde os erros são vistos como oportunidades para melhorar e reforçar a segurança. Isso envolve revisões de incidentes, análise de causas-raiz e implementação de medidas corretivas para evitar a repetição de falhas.
- Liderança Comprometida: A liderança desempenha um papel crucial na promoção de uma cultura de segurança. Líderes devem demonstrar compromisso com a segurança, fornecer recursos adequados, estabelecer expectativas claras e servir como modelos de comportamento seguro.
- Responsabilidade Individual e Coletiva: Cada indivíduo é responsável pela segurança, não apenas a própria, mas também a de seus colegas e do ambiente de trabalho como um todo. Isso implica em seguir procedimentos operacionais, relatar anomalias e assumir responsabilidade por suas ações.

- Respeito pela Regulamentação e Padrões de Segurança: Cumprir rigorosamente as regulamentações, diretrizes e padrões de segurança estabelecidos é essencial para uma cultura de segurança nuclear sólida.

Uma cultura de segurança nuclear eficaz requer um compromisso contínuo, investimento em treinamento, educação e conscientização, promovendo uma mentalidade onde a segurança é parte integrante de todas as atividades e decisões relacionadas à energia nuclear. Essa cultura visa garantir a proteção das pessoas, do meio ambiente e a manutenção da confiabilidade das instalações nucleares.

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento do trabalho

Para este trabalho, será utilizado uma instalação nuclear estratégica, localizada dentro de uma Base Naval Hipotética (BNH) que sedia navios com propulsão nuclear. Para permitir a realização da manutenção destes navios, a BNH é dotada de um Complexo de Manutenção Especializada (CME) com instalações apropriadas para que sejam realizadas as atividades de manutenção dos sistemas dos reatores nucleares das embarcações, incluindo a troca do combustível.

Para que o projeto do Sistema de Proteção Física (SPF) desta base naval hipotética seja desenvolvido, a metodologia proposta por (GARCIA, 2008), conforme mostrado no Capítulo 2, foi adotada. Desse modo, o trabalho será constituído de três etapas principais.

Na primeira, serão definidos os objetivos do SPF da Base Naval Hipotética, fazendo-se a caracterização da instalação com a descrição dos principais prédios; a definição das ameaças, elencando a que tipos principais de ameaças o complexo está mais sujeito; e definição dos alvos, levantando os tipos de materiais nucleares de maior interesse para roubo ou sabotagem, bem como sua localização no complexo da BNH.

Para a segunda etapa, será proposto um projeto preliminar do SPF da BNH, descrevendo os sistemas de detecção, retardo e resposta. Nesta etapa, as diversas barreiras físicas, como cercado, portarias de controle de acesso, sensores de movimento, câmeras, serão preliminarmente posicionadas na BNH.

Por fim, na terceira etapa, o SPF será analisado para testar sua eficácia contra uma invasão. Para tanto, será utilizado o programa EASI para auxiliar na análise de todas as possíveis rotas de invasão, calculando as probabilidades de interrupção do adversário (P_I), como detalhado na seção 3.2. Posteriormente, será utilizado um programa de cálculo de neutralização, resultando nos valores da probabilidade de neutralização do adversário (P_N), conforme descrito na seção 3.3. Por fim, as probabilidades P_I e P_N serão combinadas, conforme a Equação (5), resultando na Probabilidade de Eficácia do SPF (P_E). Para o projeto em desenvolvimento, será considerada uma meta de P_E de 0,90. As rotas avaliadas que apresentarem valores inferiores à meta, terão as barreiras e sensores reforçados de forma a aumentar a probabilidade de detecção ou o tempo de atraso. Dessa forma,

pretende-se obter o Sistema de Proteção Física para a BNH adequado aos objetivos de segurança definidos.

$$P_E = P_I * P_N \tag{5}$$

Não existe um valor quantitativo para a P_E nas normas, publicações e regulamentações vigentes. Essa ausência ocorre porque a P_E depende de uma série de fatores contextuais e operacionais, como o tipo de ameaça, as características da instalação, e as contramedidas implementadas. Assim, a avaliação da P_E é feita com base em cenários específicos, permitindo ajustes e otimizações conforme a necessidade operacional.

A meta de 0,90 para P_E da Base Naval Hipotética (BNH) foi estipulada com base em diversos fatores que refletem a necessidade de um nível elevado de segurança para instalações nucleares. Os motivos para a adoção deste valor incluem:

- **Gravidade das Consequências:** As instalações nucleares possuem materiais de alta sensibilidade, cujo roubo ou sabotagem podem resultar em consequências catastróficas, como a liberação de radiação ou o uso de material nuclear para fins terroristas;
- **Padrões Internacionais de Segurança:** Órgãos internacionais, como a AEIA, recomendam níveis de eficácia elevados para sistemas de proteção física em instalações nucleares;
- **Níveis de Ameaça:** O nível de ameaça em instalações nucleares é considerado extremamente alto devido à atratividade dos materiais nucleares para grupos terroristas, crime organizado e espiões industriais; e
- **Princípio da Defesa em Profundidade:** Um SPF que atinja 90% de eficácia reflete o uso de múltiplas camadas de segurança, como sensores, barreiras físicas e sistemas de resposta rápida.

3.2 Modelo EASI

Uma ferramenta bastante importante no projeto do SPF para a Base Naval Hipotética é o código computacional a ser empregado para a análise da eficiência do sistema de proteção física. Entre os modelos computacionais apresentados na seção 2.3.1, o algoritmo selecionado para esse trabalho foi o *Estimate of Adversary Sequence*

Interruption (EASI), ou Estimativa de Interrupção de Sequência Adversária traduzido para a língua portuguesa.

O modelo EASI foi escolhido devido à sua eficácia em representar cenários de segurança física de maneira clara e acessível. Ele permite uma análise quantitativa das zonas, barreiras e sensores de uma instalação, tornando-o adequado para avaliar a eficácia de SPF (KUHN, 2012). A escolha do EASI sobre outros modelos se deve principalmente à sua simplicidade e eficiência em calcular as probabilidades de detecção, atraso e neutralização dos adversários, sendo especialmente útil para análises preliminares e estudos de risco em instalações complexas como uma base naval.

O método é baseado em um modelo probabilístico que descreve todos os elementos do sistema de segurança física em termos de seus elementos de segurança e possibilidade de melhoria (ZOU, YANG, *et al.*, 2018). Esses aspectos são expressos em estimativas de probabilidade para falha de item e possibilidade de interrupções de segurança. O trabalho analítico, o qual necessita do ajuste de vários parâmetros, ainda é amplamente baseado na intuição e experiência humanas. O elemento do sistema de segurança, atinente ao modelo EASI, inclui propriedades físicas e probabilidades. Entre as propriedades físicas estão: adversários (o oponente e seu nível de habilidade), sensores e atuadores (câmeras, micro-ondas, infravermelho, sensores de cerca, interruptores e outros dispositivos), barreiras (portas, paredes, telas, etc.) localizadas em pontos ao longo do caminho adversário, dispositivos de comunicação, força de resposta (os guardas ou outras equipes que protegem a instalação), os ativos protegidos, caminhos tomados por um adversário para alcançar o ativo, pontos ao longo do caminho e outros elementos.

O programa EASI está focado em desenvolver técnicas para estimar a probabilidade de interrupção de uma sequência adversa com base em dados reais de SPF aplicados a instalações nucleares. Essas técnicas podem ser usadas para avaliar a segurança de sistemas nucleares e identificar áreas onde as medidas de segurança podem ser melhoradas. Uma sequência adversa é uma sequência de eventos que pode levar a um acidente nuclear. A interrupção de uma sequência adversa é o ato de interromper essa sequência antes que ela possa causar um acidente.

O EASI é um código desenvolvido no programa Microsoft Excel®, relativamente simples de utilizar e demonstra os efeitos quantitativos de um caminho específico mediante a alteração de parâmetros de proteção física. O algoritmo necessita de alguns

parâmetros de entrada que representam as funções de proteção física de **detecção, atraso, resposta** e comunicação para o cálculo da Probabilidade de Interrupção (P_I) para um único caminho por vez de tentativa de roubo ou sabotagem realizado pelo adversário. Desta forma, listam-se os principais parâmetros de entrada do sistema:

- **A probabilidade de detecção (P_D)** é atrelada à função de detecção e corresponde à capacidade de detecção inerente de cada sensor que o adversário encontra em seu caminho;
- **O tempo médio ($T_{médio}$) e o desvio padrão** ($\boldsymbol{\sigma}$) são parâmetros inerentes à função de atraso e correspondem ao tempo necessário e sua respectiva tolerância para que o adversário vença uma barreira do sistema de proteção física;
- **A probabilidade de comunicação entre os guardas (P_C)** está ligada à função de resposta e refere-se ao sucesso da comunicação de um alarme com a força de reação.

O valor de $\mathbf{P_D}$ de cada sensor deve ser inserido no EASI de forma ordenada de acordo com o caminho do adversário. O valor é calculado por meio da Equação (6).

$$P_D = P_S \cdot P_T \cdot P_A \tag{6}$$

Onde:

$\mathbf{P_S}$, corresponde à probabilidade de que o detector identifique atividades anormais ou não autorizadas pelo adversário;

$\mathbf{P_T}$, é a probabilidade de que a indicação de um alarme seja transmitida para um ponto de avaliação; e

$\mathbf{P_A}$, é a probabilidade de avaliação precisa do alarme.

Na maioria dos SPF, a probabilidade de comunicação ($\mathbf{P_C}$) com sucesso com a força de reação aumenta com o tempo. A avaliação de muitos sistemas projetados e implantados pelo *Sandia National Laboratories* (SNL) indicou que a maioria dos sistemas opera com $\mathbf{P_C}$ superior a 0,95 (GARCIA, 2008). Esta suposição pode ser usada como valor de referência em uma análise de uma instalação, a menos que haja razões para desconsiderá-la, resultando numa probabilidade de comunicação inferior em virtude de falha nos sistemas de comunicação da equipe de reação, falta de instrução na utilização do equipamento, manutenção deficiente, “áreas de sombra” na comunicação por rádio ou até mesmo estresse vivenciado pela equipe durante um ataque real.

O parâmetro de saída do EASI é a probabilidade de interrupção (P_I) que representa uma estimativa da probabilidade de que um número suficiente de pessoas da equipe de reação interrompa o adversário em algum momento antes que o mesmo conclua os atos de roubo ou sabotagem. Logo, esse parâmetro indica uma medida de eficácia de um SPF, quanto maiores os valores de P_I, mais prováveis são as chances de que haja a interrupção da sequência de um adversário, e consequentemente a integridade do alvo pretendido por pessoas maliciosas.

3.3 Modelo de Neutralização

O outro fator constituinte da probabilidade global do SPF é a Probabilidade de Neutralização, P_N que, por definição, corresponde à probabilidade de que a Força de Reação obtenha o controle físico completo da força adversária, dado que houve a prévia interrupção do adversário pela FR (SNELL, 2013). Esse fator demonstra a eficiência da FR, relacionando a capacidade tática, força do adversário, armas usadas na neutralização, número de integrantes das forças (reação e adversário) e tempo associados a cada uma das tarefas (HAWILA, 2016).

Assim como no cálculo da probabilidade de interrupção, também existem alguns métodos para realizar o cálculo da probabilidade de neutralização. Entre eles tem-se o julgamento, opinião de especialistas; simulações numéricas simples; simulações numéricas complexas (jogos de guerra computadorizados); exercícios de engajamento físico (força contra força) e engajamentos reais (SNELL, 2013).

Para realizar o cálculo da P_N, foi escolhido um programa em Visual Basic que utiliza a plataforma do Excel® para ser compilado, conforme visto na Figura 6. Este programa foi desenvolvido como uma ferramenta de treinamento para um curso em Segurança Física ministrado pela AIEA (SNELL, 2013).

A escolha do programa de neutralização para a BNH foi respaldada em diversos fatores que consideraram tanto a viabilidade prática quanto à adequação às necessidades específicas de uma primeira análise do SPF. Entre as justificativas para essa seleção, destacam-se:

- **Simplicidade para análises iniciais**: O software escolhido apresenta uma estrutura simplificada, ideal para conduzir uma análise inicial do SPF. Essa característica

permite avaliar de maneira rápida e eficiente os elementos principais do sistema, sem exigir recursos computacionais excessivos ou dados muito detalhados;

- **Interface amigável:** A interface intuitiva facilita o aprendizado e a utilização do programa, sendo especialmente benéfica para equipes acadêmicas ou profissionais na área de simulação de segurança física;
- **Aplicações acadêmicas:** Por ser utilizado em contextos acadêmicos e treinamentos, o software se alinha ao objetivo de integrar análises de proteção física a estudos teóricos e práticos, fornecendo uma base para a validação de conceitos e metodologias;
- **Resultados satisfatórios:** Embora utilize simulação numérica simplificada, o programa é capaz de fornecer resultados confiáveis e satisfatórios para projetos iniciais de SPF, permitindo a identificação de vulnerabilidades e a proposição de melhorias antes de avançar para análises mais complexas;
- **Adaptabilidade e flexibilidade:** O programa permite ajustes e personalizações que atendem às especificidades do cenário da BNH, tornando-o uma ferramenta versátil para diferentes projetos;
- **Custo-benefício:** A simplicidade do programa também contribui para um menor custo operacional em comparação com ferramentas mais sofisticadas, que necessitam de mais dados de entrada e recursos computacionais; e
- **Base para futuras análises:** A implementação do software fornece uma base sólida para análises mais aprofundadas no futuro, permitindo que os resultados iniciais sejam utilizados como referência para a adoção de métodos mais complexos, caso necessário.

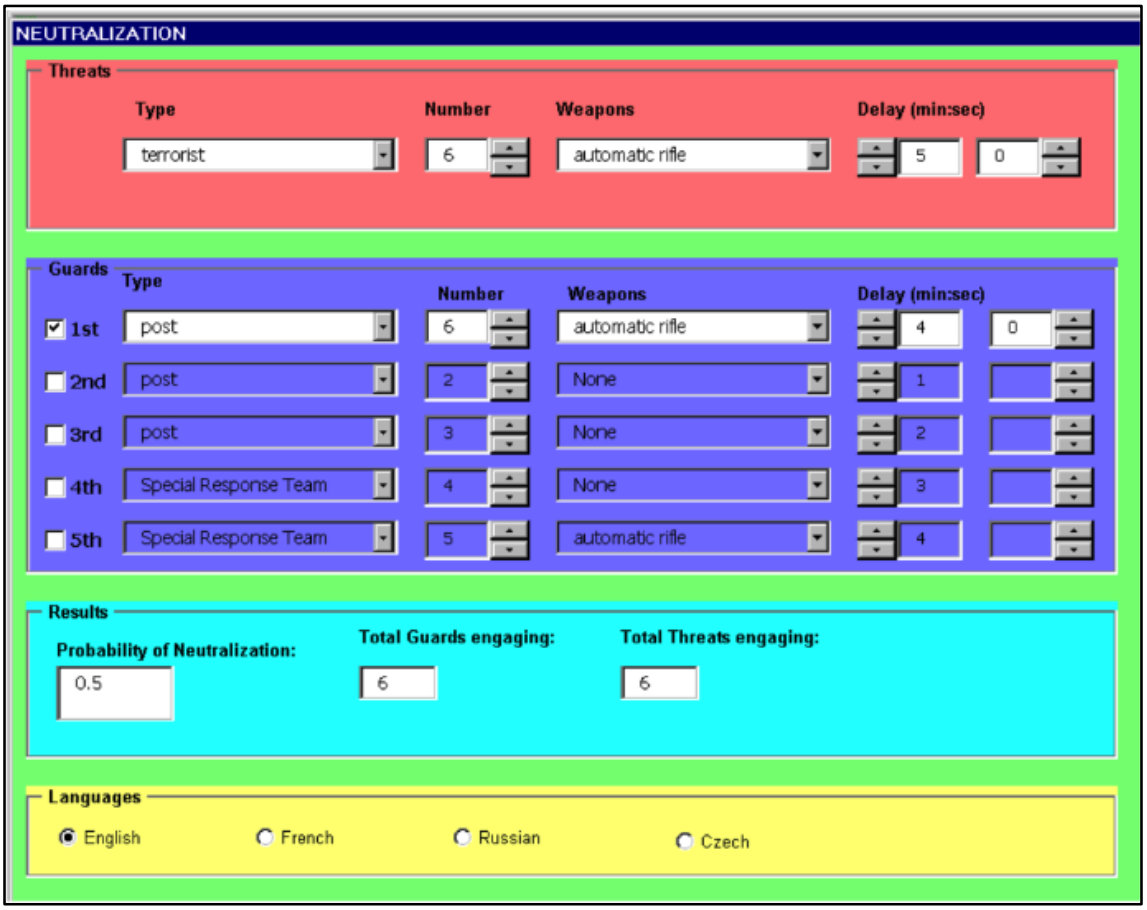


Figura 6 – Planilha para cálculo da probabilidade de neutralização P_N.
Fonte: extraído de SNELL (2013)

O método do programa de Neutralização baseia-se em dados advindos de um modelo de Cadeias de Markov[2], mais sofisticado, em que os valores de probabilidade da tabela de dados são ajustados de acordo com a variação do número de guardas e de adversários, com todos os outros parâmetros de engajamento, mas mantendo-se o quantitativo, o tipo de armamento e o tempo de chegada iguais.

A fim de que se contabilize o efeito de diferentes armas utilizadas, o programa pondera o tipo de armamento de acordo com a sua letalidade, atribuindo diferentes coeficientes para definir o grau de força de cada um.

Para que seja calculada a influência da chegada de grupos sucessivos da força de reação em momentos distintos sobre o valor final na probabilidade de neutralização, o programa utiliza uma função de decaimento exponencial. O grande foco do programa é

[2] Modelo no qual a probabilidade futura depende apenas das condições no presente e não de ocorrências anteriores. Portanto, a probabilidade de ocorrência de um fato é a probabilidade condicional deste fato dado o estado atual (NORRIS, 1997).

enfatizar os fatores mais importantes para a reação a uma invasão: o número de pessoas do adversário e da força de reação, as armas empregadas por cada um (nenhum, cassetete, pistola, fuzil) e os tempos associados do caminho do adversário e do de chegada da força de reação.

Algumas hipóteses são adotadas no programa para se obter o valor da probabilidade de neutralização. De acordo com SNELL (2013), essas hipóteses são principalmente:

- Número de pessoas da força de reação superior ao de invasores aumenta a P_N, mantendo-se os outros parâmetros fixos;
- Armas superiores portados pela força de reação aumentam a P_N, mantendo-se constante o número de adversários de pessoal da força de reação;
- Tempo de resposta da força de reação apenas entra na composição da P_N se este tempo for inferior ao necessário pelo adversário finalizar a ação adversa. Assim, quanto menor for o tempo de resposta da força de reação, maior será a P_N;
- O armamento superior empregado pela força de reação é contabilizado pela multiplicação da força utilizando a equação (7).

$$P_N = f(E_{guardas} * M_{guardas}, E_{adversários} * M_{adversários}) \quad (7)$$

Onde:

"M" é o número de guardas que efetivamente combatem a invasão

"E" é o fator multiplicador de força da eficácia do armamento

A regra da eficácia de duas armas é empregada para $P_N = 0{,}5$ conforme:

- 1 bastão = 2 pessoas sem armas;
- 1 arma = 2 pessoas com cassetete; e
- 1 rifle automático = 2 pessoas com arma.

Quanto menor for o tempo que a força de reação demora para chegar ao local onde estão os adversários, maior é a probabilidade de neutralização.

Desta forma, utilizando esta ferramenta relativamente simples, mas capaz de fornecer dados de cálculo da probabilidade de neutralização, será possível levantar as P_N para as situações de invasão postuladas, considerando a força de reação proposta para a BNH.

4 DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS DO SPF DA BNH

Conforme explicado no Capítulo 2, os objetivos do Sistema de Proteção Física são a caracterização da instalação, definição da ameaça e identificação do alvo. Dessa forma, neste capítulo serão definidos os objetivos do SPF para a Base Naval Hipotética em análise.

4.1 Caracterização da BNH

Uma instalação nuclear é uma estrutura altamente complexa e rigorosamente controlada, destinada ao desenvolvimento de atividades relacionadas ao uso da energia nuclear nas suas diversas aplicações, como, por exemplo, a geração de eletricidade, pesquisa científica ou produção de radioisótopos. A configuração de uma instalação nuclear varia conforme o propósito, contudo existem alguns elementos que se fazem presentes e são comuns a todas finalidades e serão apresentados na instalação alvo desse estudo.

O presente trabalho foi desenvolvido considerando como instalação uma Base Naval Hipotética (BNH) com material nuclear em seu interior. A propriedade situa-se nem uma região litorânea e possui área total igual a 440 mil m^2 (880m x 500m), conforme visto na Figura 7. Neste local, é armazenado o combustível nuclear empregado nos reatores que servem como fonte de energia para a propulsão dos meios navais equipados com essa tecnologia.

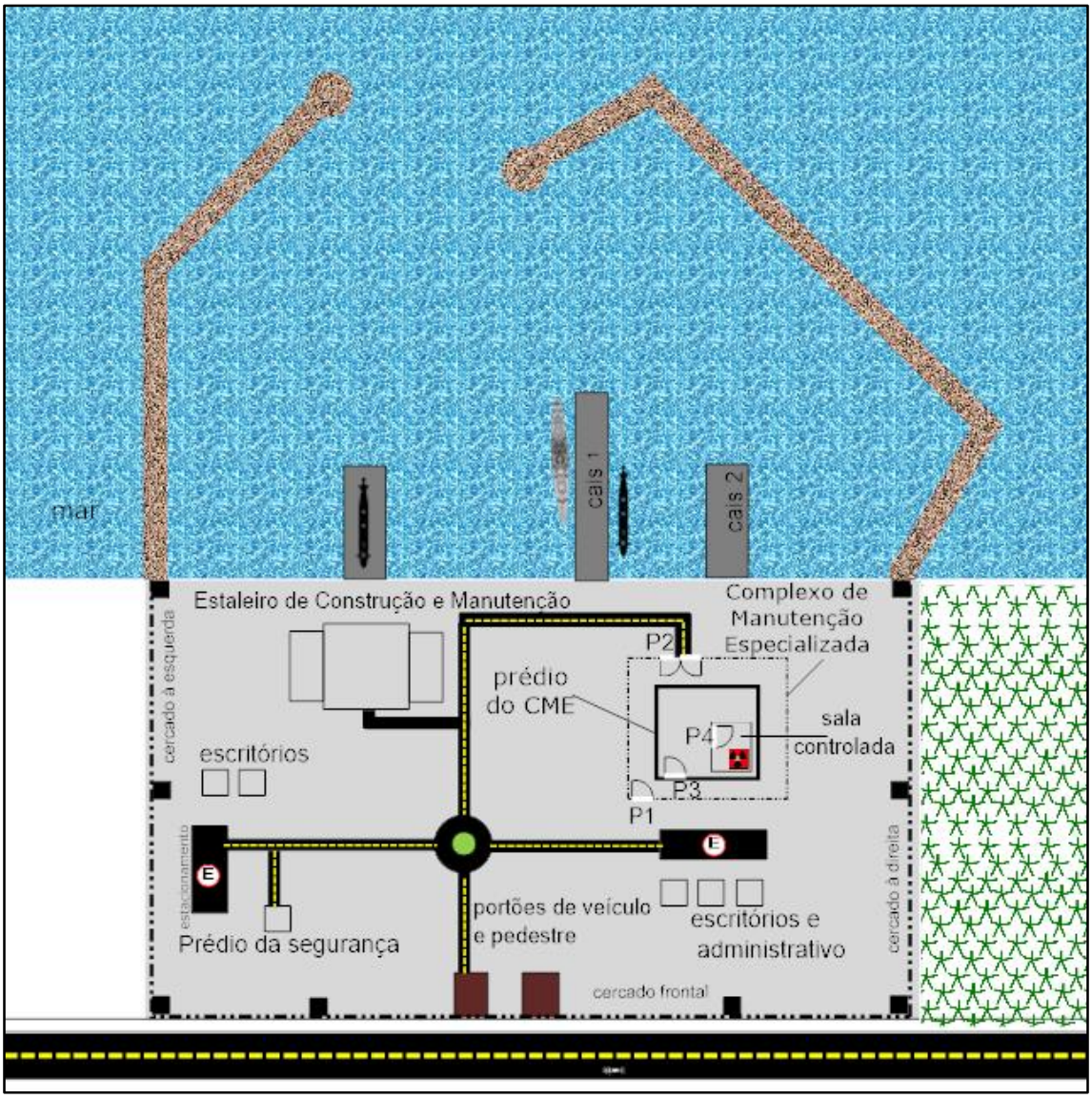


Figura 7 – Planta esquemática da Base Naval Hipotética

As áreas e estruturas que compõem uma instalação nuclear são essenciais para compreender a organização e o seu funcionamento. Cada edifício e infraestrutura dentro de um complexo nuclear desempenham um papel fundamental na operação segura e eficiente da instalação, garantindo o cumprimento das normas rigorosas de segurança nuclear. Desta forma, apresentam-se logo abaixo os principais componentes da BNH, destacando funções e importância dos acessos controlados. Este estudo abrange desde os prédios onde ocorrem as atividades operacionais e administrativas, até os sistemas de segurança e controle de acesso, essenciais para a proteção da instalação.

4.1.1 Estaleiro de Construção e Manutenção (EsCoMa)

O Estaleiro de Construção e Manutenção (EsCoMa) da Base Naval Hipotética (BNH) é uma das principais infraestruturas da base, responsável pela construção, manutenção e reparo de embarcações navais de propulsão nuclear. Este estaleiro desempenha um papel essencial na garantia de que a frota nuclear da base opere com eficiência e segurança, mantendo as embarcações em pleno funcionamento ao longo de suas vidas úteis. Dessa forma, garantir a segurança dos colaboradores e a segurança física do local é essencial para o bom desempenho das funções que envolvem alta tecnologia.

O EsCoMa é um complexo altamente especializado, dividido em diferentes áreas dedicadas à construção de novos submarinos e embarcações, à manutenção de frotas existentes, e ao reparo de sistemas críticos, excetuando os equipamentos relacionados à parte nuclear, que é realizada no Complexo de Manutenção Especializada (CME). A operação no estaleiro envolve uma equipe multidisciplinar de engenheiros, técnicos e especialistas, todos focados em garantir que as embarcações atendam aos mais altos padrões de desempenho e segurança.

O EsCoMa é divido em diversas partes internas, cada uma possuindo um propósito específico para a realização da manutenção. Uma parte importante é a doca seca. Nesta, as embarcações são retiradas da água para a realização de inspeções e manutenções nas áreas submersas (obras vivas) que só podem ser acessadas quando a embarcação está docada.

Diretamente relacionado à missão do estaleiro, têm-se as Oficinas de Construção e Reparo. São oficinas especializadas em construção naval, soldagem, metalurgia, usinagem, pintura industrial e inspeção metrológica. É nas oficinas que são realizados a fabricação de componentes estruturais, os reparos de sistemas mecânicos e a atualização de sistemas obsoletos.

Ainda, no interior do EsCoMa encontra-se o Armazém de Componentes e Suprimentos (não representado na Figura 7, pois é uma área interna ao EsCoMa) . Este é um grande almoxarifado no qual são armazenados materiais estruturais, peças e equipamentos sobressalentes e ferramental especial para a realização de tarefas específicas de manutenção. É fundamental que uma gestão de logística eficiente seja realizada para garantir que as ações de construção e reparo não sejam impactadas por falta de material no prazo adequado.

Por fim, um Centro de Treinamento Técnico é localizado no EsCoMa de forma a possibilitar a constante capacitação e reciclagem dos profissionais envolvidos nas atividades do estaleiro. O contínuo treinamento é essencial para assegurar a correta execução das complexas tarefas de construção e manutenção desempenhadas, bem como o preparo para emprego de novas tecnologias nas atividades.

4.1.2 Complexo de Manutenção Especializada (CME)

O prédio do Complexo de Manutenção Especializada desempenha uma função estratégica no ciclo de vida dos reatores nucleares utilizados pela frota naval. O edifício, equivalente a um prédio de 15 andares, é projetado para a realização de operações especializadas e críticas diretamente relacionadas à planta nuclear das embarcações, tais como a troca do combustível nuclear.

Para tanto, o prédio do CME precisa ter uma infraestrutura robusta, respeitando diversas normas de segurança de projeto determinadas pela CNEN para a concessão da licença de construção e operação. Ainda, internamente o complexo é divido em áreas específicas que atendem às diversas etapas do processo de manutenção da planta nuclear, incluindo a retirada de combustível usado, colocação de combustível novo, armazenamento do combustível irradiado em piscinas de decaimento, inspeções no vaso do reator e equipamentos do circuito primário.

A estrutura interna do complexo é composta por um Área de Manuseio do Combustível, Área de Decaimento do Combustível Irradiado, Oficinas de Reparo e Inspeção.

A Área de Manuseio do Combustível é onde o combustível nuclear irradiado é removido do vaso do reator, armazenado no compartimento de transporte temporário refrigerado para ser encaminhado para as áreas de piscina de decaimento. A atividade é realizada com auxílio de robôs para limitar a exposição humana à radiação. É necessário um alto controle de acesso a essa área pela questão de limitação de dose ocupacional dos trabalhadores e, também, de acesso a um material com potencial uso não pacífico, em virtude da existência de ^{235}U e ^{239}Pu no combustível usado.

Após ser removido do reator, o combustível é deslocado para a área de Decaimento do Combustível Irradiado. Esta área é composta por um prédio, reforçado, no qual se encontram as piscinas de decaimento, nas quais o combustível é deixado para

reduzir a atividade. Posteriormente, esse combustível pode ser deslocado para um repositório permanente, entretanto esta etapa não é escopo da análise deste trabalho.

Por fim, as Oficinas de Reparo e Inspeção são utilizadas para realizar inspeções nos elementos combustíveis novos, analisar a integridade de componentes do primário, inspeção em soldas, entre outras atividades de manutenção.

Devido à alta sensibilidade do material manipulado dentro do CME, este precisa ser protegido por múltiplas camadas de segurança física e operacional. O acesso ao complexo deve ser bastante restrito, sendo garantido apenas ao pessoal qualificado e autorizado por meio de um completo sistema de vigilância e controle de acesso, composto de câmeras, cercados, sensores infravermelho, rondas periódicas da equipe de segurança, identificação por meio de crachás, senha e biometria.

4.1.3 Prédio da Segurança

O prédio da segurança é uma estrutura fundamental para a proteção de todo o complexo. Neste, concentram-se as equipes responsáveis por monitorar e garantir a segurança física e operacional da base, além de gerenciar as respostas rápidas a qualquer tipo de ameaça ou incidente. Este edifício é equipado com sistemas avançados de vigilância, controle de acesso e coordenação de emergências, tornando-o um dos pontos mais críticos em termos de proteção e monitoramento. Ele também serve como base para as equipes de segurança armada e de resposta às emergências.

O prédio da segurança é projetado para funcionar como o centro de comando e controle de todas as operações de segurança na base. Ele abriga as equipes de segurança, que trabalham em turnos para garantir vigilância ininterrupta 24 horas por dia, 7 dias por semana. A estrutura conta com salas de controle equipadas com monitores que exibem imagens de câmeras distribuídas por toda a base, além de sensores e outros dispositivos de detecção de intrusão. No prédio é possível elencar as seguintes salas principais:

- **Centro de Vigilância e Controle (CVC):** o coração do prédio da segurança é a sala de controle, onde operadores monitoram em tempo real todas as áreas da base por meio de um sistema integrado de câmeras, sensores de movimento e detectores de radiação. Este ambiente é altamente tecnológico, permitindo a rápida identificação de qualquer atividade suspeita ou incidente.

- **Centro de Resposta a Emergências**: em casos de emergência, como incidentes nucleares ou tentativas de invasão, o centro de resposta é ativado. É nele que se realiza a coordenação das ações das equipes de segurança, resposta a desastres e envio do pessoal especializado, garantindo uma intervenção rápida e eficaz. No Centro há a capacidade para que se comunique com as equipes internas e também com forças policiais externas em caso de necessidade.
- **Paiol de Material Bélico**: este recinto armazena todos os equipamentos necessários para as operações de segurança, incluindo armamentos, coletes à prova de bala, equipamentos de comunicação e trajes de proteção contra radiação. Os equipamentos são mantidos em constante prontidão para serem usados em quaisquer eventualidades.

4.1.4 Prédio administrativo

É neste edifício que são realizadas as atividades administrativas da instalação. Conta com salas para a gestão de recursos humanos, finanças, gerências estratégica e operacional do complexo, sistemas de tecnologia da informação, equipes de manutenção prediais.

Neste local não há manipulação de material nuclear, mas é fundamental para o funcionamento organizacional da instalação. Portanto, exige um controle de acesso condizente com o grau de segurança do local.

4.1.5 Prédio de escritórios técnicos

Na BNH existe o prédio de escritórios técnicos no qual se encontram a equipe composta por engenheiros, analistas e técnicos. Estes são responsáveis pelo apoio técnico às atividades de planejamento das atividades de manutenção das embarcações, projetos de modernização dos sistemas, programa de inspeções, em suma, gestão do ciclo de vida dos meios navais baseados na BNH.

Embora não lidem diretamente com o material nuclear, é neste local que se encontra a documentação e planos de manutenção das plantas nucleares de propulsão dos navios. Portanto, o prédio exige um grau de controle de acesso a fim de evitar acesso à documentação sensível guardada por pessoal não autorizado.

4.1.6 Guaritas

As guaritas são estruturas menores, localizadas em pontos estratégicos ao redor da instalação, como nos perímetros e próximos às entradas principais. Elas são estruturas geralmente mais elevadas, ocupadas por guardas da equipe de segurança, que monitoram a área. Algumas guaritas podem ser equipadas com armas e sistemas de comunicação direta com o prédio da segurança a fim de facilitar reportar alguma discrepância observada.

4.2 Definição de Ameaças para a BNH

Uma instalação nuclear, devido à sua infraestrutura e à presença de materiais nucleares, enfrenta uma série de ameaças que podem comprometer sua segurança, suas operações e a integridade de seus ativos. As principais ameaças identificadas para esse projeto são:

- **Ameaças físicas:** compreendem as ações de tentativa de intrusão às instalações por forças hostis, indivíduos mal-intencionados ou grupos organizados. Dentre as possíveis ameaças físicas, podem-se destacar:
    - **Sabotagem:** são ações executadas por agentes externos, internos ou em conluio, que visam a danificar sistemas ou infraestruturas operacionais. Podem resultar em consequências bastante graves dependendo dos sistemas afetados, como, por exemplo, o sistema de controle e segurança do reator nuclear;
    - **Ataques terroristas:** são ações realizadas por grupos terroristas que visam ao roubo do material nuclear para fins não pacíficos ou ainda causar danos à instalação nuclear como um ataque à segurança nacional; e
    - **Roubo de materiais nucleares:** o combustível utilizado por navios a propulsão nuclear é um dos principais alvos de roubo na BNH. O combustível pode fornecer elementos de interesse, como ^{235}U e ^{239}Pu, para criminosos ou grupos terroristas para a fabricação de dispositivos nucleares ou radiológicos;
- **Ameaças cibernéticas:** surgem da crescente dependência de sistemas automatizados e de TI, podendo gerar sérios comprometimentos para a instalação em caso de ataques, tais como:
    - **Ataques de *hackers*:** grupos hackers podem tentar comprometer os sistemas de controle da base, visando à desativação dos sistemas de segurança, obtenção

de dados sensíveis que possam levar ao comprometimento das operações da instalação ou dos navios;

- **Espionagem cibernética:** resulta na coleta de informações sensíveis por meio da espionagem digital. Informações relevantes como: materiais nucleares que são mantidos a bordo, o nível de enriquecimento, dados técnicos sobre as embarcações são informações que podem ser utilizadas tanto por grupos com interesse em desenvolver tecnologia nuclear para fins não pacíficos quanto grupos com interesse em atacar a instalação para causar danos à frota ou às tripulações e pessoas da área;

- **Ameaças internas:** são ameaças vindas dos próprios colaboradores ou pessoal autorizado a acessar as áreas da instalação que, por algum motivo, podem se tornar uma ameaça à segurança. Duas possibilidades de ameaças internas podem ser citadas:

  - ***Insiders*** maliciosos: quando funcionários com acesso a áreas e informações sensíveis colaboram passiva ou ativamente com grupos externos facilitando o acesso à instalação ou informações;
  - **Negligência:** ocorre quando há falha no cumprimento de protocolos de segurança ou descuido no manuseio do material nuclear e de informações sensíveis, facilitando o acesso por pessoal não autorizado.

Embora existam muitas possibilidades de ameaças, o estudo será focado nas ameaças físicas externas a fim de realizar o dimensionamento do sistema de segurança.

4.3 Ameaça Base de Projeto

A caracterização da Ameaça Base de Projeto é um elemento essencial para a análise de riscos e implementação do SPF. Ela apresenta diretrizes para identificar e categorizar possíveis ameaças, permitindo que o SPF seja projetado para mitigar os riscos de forma eficaz. A Tabela 1 apresenta a Ameaça Base de Projeto que orientou o desenvolvimento das medidas de segurança das instalações da BNH.

Tabela 1 – Ameaça Base de Projeto da Base Naval Hipotética

Classe	Parâmetro	Ameaças		
		Sabotagem	**Crime**	**Terrorismo**
Intenção	Alvo	Material nuclear e informações sensíveis	Material nuclear e informações sensíveis	Material nuclear
	Objetivo do ataque	Causar danos à segurança nuclear	Subtração de material radioativo	Subtração de material radioativo
Motivação	Ideológico	Alto	Baixo	Alto
	Recursos econômicos	Baixo	Alto	Alto
	Político	Médio	Baixo	Alto
Capacidades	Número de adversários	2	5	5
	Armas	Fuzil, pistola	Fuzil, pistola	Fuzil, pistola
	Explosivos	Sim	Sim	Sim
	Ferramentas	Mecânicas e elétricas	Mecânicas e elétricas	Mecânicas e elétricas
	Transporte	Terrestre / Marítimo	Terrestre / Marítimo	Terrestre / Marítimo
	Financiamento	Médio	Médio	Médio
	Habilidades técnicas	Alto	Médio	Médio
	Conhecimentos extras	Sim	Não	Não
	Conluio com agentes internos	Sim	Sim	Não
	Estrutura de apoio	Médio	Médio	Médio
	Dispostos ao sacrifício da própria vida e alheias	Sim	Não	Sim

4.4 Identificação de Alvos da BNH

Os principais alvos de potencial de roubo/furto são os materiais nucleares utilizados como combustível para os meios navais. Esses materiais possuem valor estratégico, não apenas pela sua aplicação militar, mas também pelo risco de serem usados para atos maliciosos, seja para uso em ações terroristas, sabotagem ou fins de proliferação nuclear. Entre os principais alvos, destacam-se:

- **Material nuclear enriquecido** – O tipo mais comum usado é o urânio enriquecido (U^{235}) com enriquecimento superior aos reatores comerciais, podendo chegar a 20%. Esse tipo de material é de grande interesse para grupos que poderiam usá-lo para fabricar armas nucleares ou dispositivos de dispersão radiológica. Durante uma operação normal de reabastecimento do reator de alguma embarcação de propulsão nuclear, combustível novo é armazenado temporariamente no CME. Para navios de médio porte dotados de reatores de baixo enriquecimento, foi considerado um total de 3500 kg de UO_2 dispostos nos elementos combustíveis. Dessa forma, este material é classificado como de Categoria I (CNEN, 2019a).

- **Elementos Combustíveis Usados** – Outro alvo seria o combustível nuclear usado, que apesar de não ter mais aplicação direta em reatores navais, ainda contém material físsil em quantidades perigosas. Esses elementos são armazenados em salas protegidas do CME, mas são interessantes para aqueles que buscam extrair urânio enriquecido e plutônio para fins ilícitos. O combustível irradiado tem classificação de Categoria II (CNEN, 2019a).

- **Informações Técnicas** – As informações sensíveis do material nuclear como dados técnicos, tipo e porcentagem de enriquecimento, assim como os processos de armazenamento e manuseio, podem ser o objetivo de agentes maliciosos com o intuito de fornecer dados críticos para construção de dispositivos nucleares ou mesmo favorecer o contrabando de material radiológico. As informações sensíveis de projeto ficam contidas dentro dos prédios de escritórios técnicos, sendo armazenadas digitalmente em servidores e não em documentação física. Sendo assim, esses prédios se tornam alvo mais provável de sabotagem e não de roubo de material.

4.4.1 Áreas de Segurança da BNH

A classificação das áreas de segurança é estabelecida de acordo com a criticidade e vulnerabilidade de cada região da instalação. Uma vez identificados os alvos no item anterior, é possível estabelecer a categorização das zonas de segurança em três níveis principais:

- Área protegida (AP): compreende toda a área da BNH (Figura 8)
- Área vigiada (AVg): compreende todo o CME (Figura 9); e
- Área vital (AVt): compreende todo o prédio do CME (Figura 10).

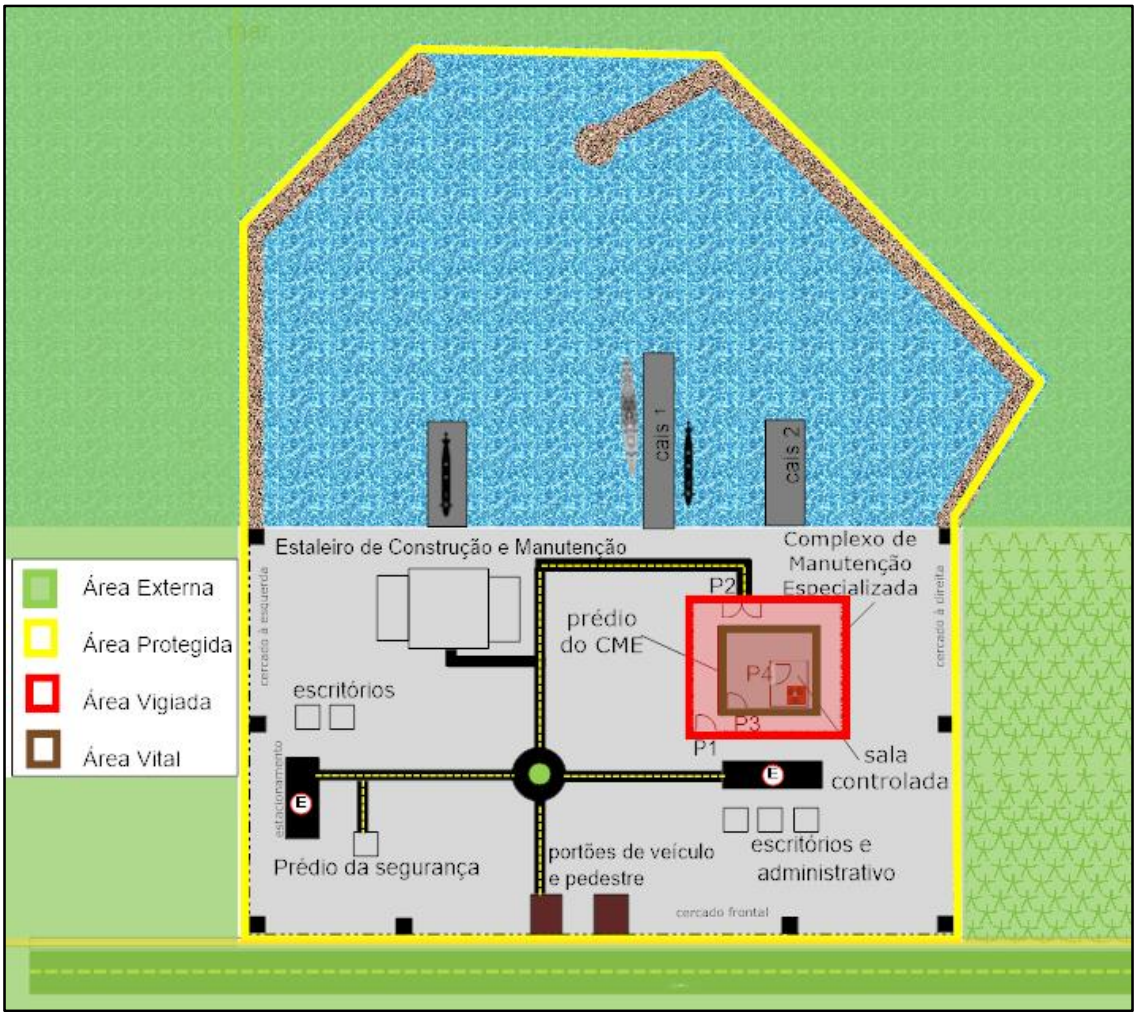


Figura 8 – Definição das áreas de segurança da Base Naval Hipotética

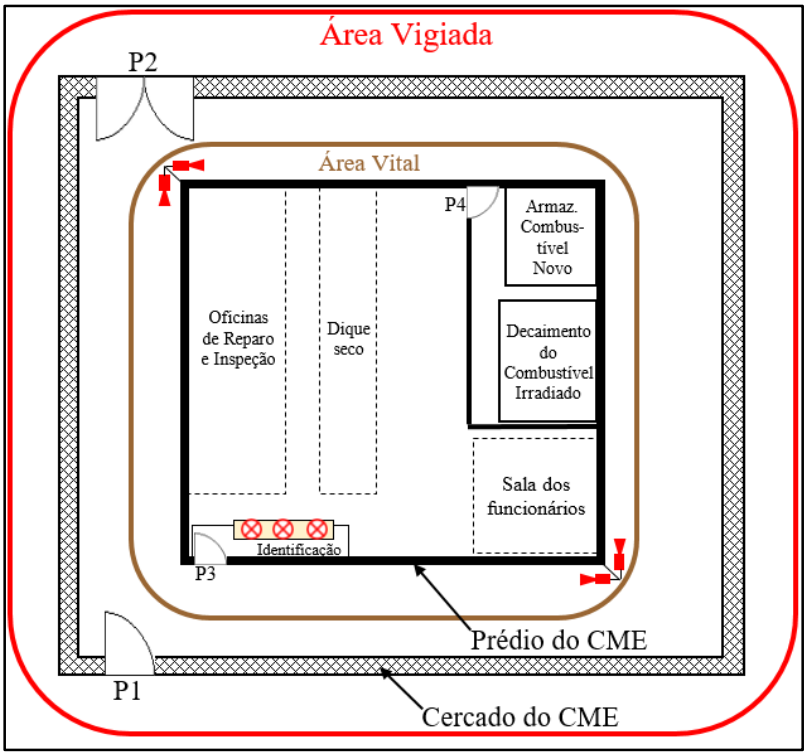


Figura 9 – Definição das áreas de segurança do CME

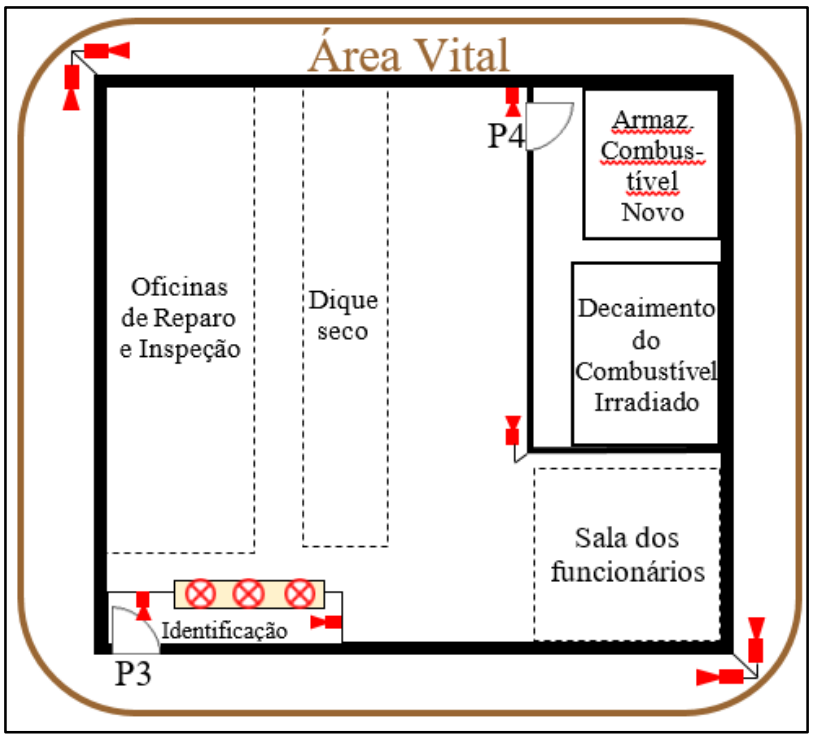


Figura 10 – Detalhe da área de segurança relativa ao prédio do CME

5 PROJETO DO SPF DA BNH

O desenvolvimento de um SPF para a Base Naval Hipotética requer a definição de proposições que orientem o projeto e garantam a sua eficácia. Esses princípios são importantes para alinhar as características do sistema com as ameaças potenciais, os recursos disponíveis e os objetivos de proteção da instalação. Desse modo, as principais premissas consideradas no projeto do SPF da BNH.

- **Análise de Risco:** identificar ameaças potenciais e adotar metodologias quantitativas (equação (1)) para manter o risco em níveis aceitáveis;

$$R = P_A * (1 - P_E) * C \tag{1}$$

- **Defesa em Profundidade:** implementar proteção em camadas (áreas vigiada, protegida e vital) nos sistemas de detecção, retardo e resposta;
- **Integração Tecnológica:** incorporar sensores acústicos, infravermelhos, Circuito Fechado de Televisão (CFTV) e controle de acesso com múltiplas autenticações (crachá, PIN e biometria), centralizados no Centro de Vigilância e Controle (CVC);
- **Resposta Ágil:** garantir que o tempo de retardo das barreiras permita a neutralização das ameaças antes que atinjam áreas críticas, com equipes treinadas e bem equipadas; e
- **Conformidade:** atender à normas nacionais e internacionais, como as da CNEN e AIEA, com auditorias regulares e aprimoramento contínuo.

5.1 Sistemas de detecção de intrusão da BNH

5.1.1 Medidas de proteção

A Base Naval Hipotética está equipada com uma série de sensores infravermelho localizados ao longo dos cercados que limitam a área externa da área protegida da base. Esses sensores desempenham um papel fundamental no SPF, pois são responsáveis pela detecção de movimentações não autorizadas nas proximidades da base, tanto durante o dia quanto à noite.

Os sensores infravermelhos utilizam a emissão de radiação térmica para identificar variações de temperatura, especialmente as geradas pelos seres humanos ou veículos. Estes sensores apresentam alta taxa de eficácia em ambientes externos, pois não

dependem da iluminação visível para operar, conseguindo manter a mesma eficácia de detecção em períodos de baixa luminosidade, como à noite. Quando um objeto ou pessoa atravessa a área monitorada, os sensores capturam a mudança na radiação térmica e enviam um alerta ao Centro de Vigilância e Controle.

O mar que circunda a BNH é provido de sensores acústicos de alta sensibilidade, desenvolvidos para identificar e monitorar atividades subaquáticas suspeitas. Esses sensores são capazes de detectar movimentos de embarcações não autorizadas, veículos submersíveis e até mesmo mergulhadores em proximidade à instalação. Adicionalmente, esses dispositivos são programados para filtrar ruídos de fundo, como correntes marítimas e sons de vida marinha, garantindo alta precisão na identificação de ameaças reais.

Esses sensores estão posicionados ao longo do perímetro, formando uma primeira linha de detecção de intrusões. A integração destes com câmeras de vigilância e sistemas de alarme permite uma resposta rápida por parte da força de reação, uma vez que qualquer anomalia detectada é imediatamente analisada para verificar a ameaça potencial e possível acionamento da FR para combater o adversário.

Em toda a área protegida e vigiada da BNH, há um Circuito Fechado de Televisão (CFTV) que desempenha um papel central na segurança da instalação. Este sistema realiza o monitoramento contínuo por meio de câmeras distribuídas e conectadas ao CVC, que exibe as imagens em monitores e efetua a gravação dos registros.

O CFTV permite que a equipe de segurança monitore, em tempo real, o que ocorre em cada ambiente, 24 horas por dia, e tome ações imediatas quando alguma anormalidade é detectada. Além do monitoramento ativo, o sistema mantém registros das imagens capturadas, possibilitando sua análise posterior, o que auxilia na identificação de suspeitos. Outro benefício significativo é o efeito dissuasório gerado pela presença visível das câmeras. A percepção de monitoramento constante desencoraja atividades ilícitas e comportamentos mal-intencionados, reforçando a segurança e a proteção da instalação.

Além disso, a segurança é reforçada por oito torres de vigilância posicionadas ao longo do perímetro da BNH, cada uma é guarnecida por um militar treinado. Essas torres estão equipadas com recursos essenciais para comunicação e resposta rápida, incluindo rádio e ramal telefônico fixo. Esses elementos permitem o monitoramento constante do perímetro, a comunicação imediata com o CVC e a rápida notificação de incidentes, garantindo uma resposta eficaz para qualquer ameaça.

A Figura 11 apresenta a planta da BNH provida de torres de vigilância, sensores infravermelho, sensores acústicos, câmeras de vigilância e o CVC (localizado no prédio da segurança).

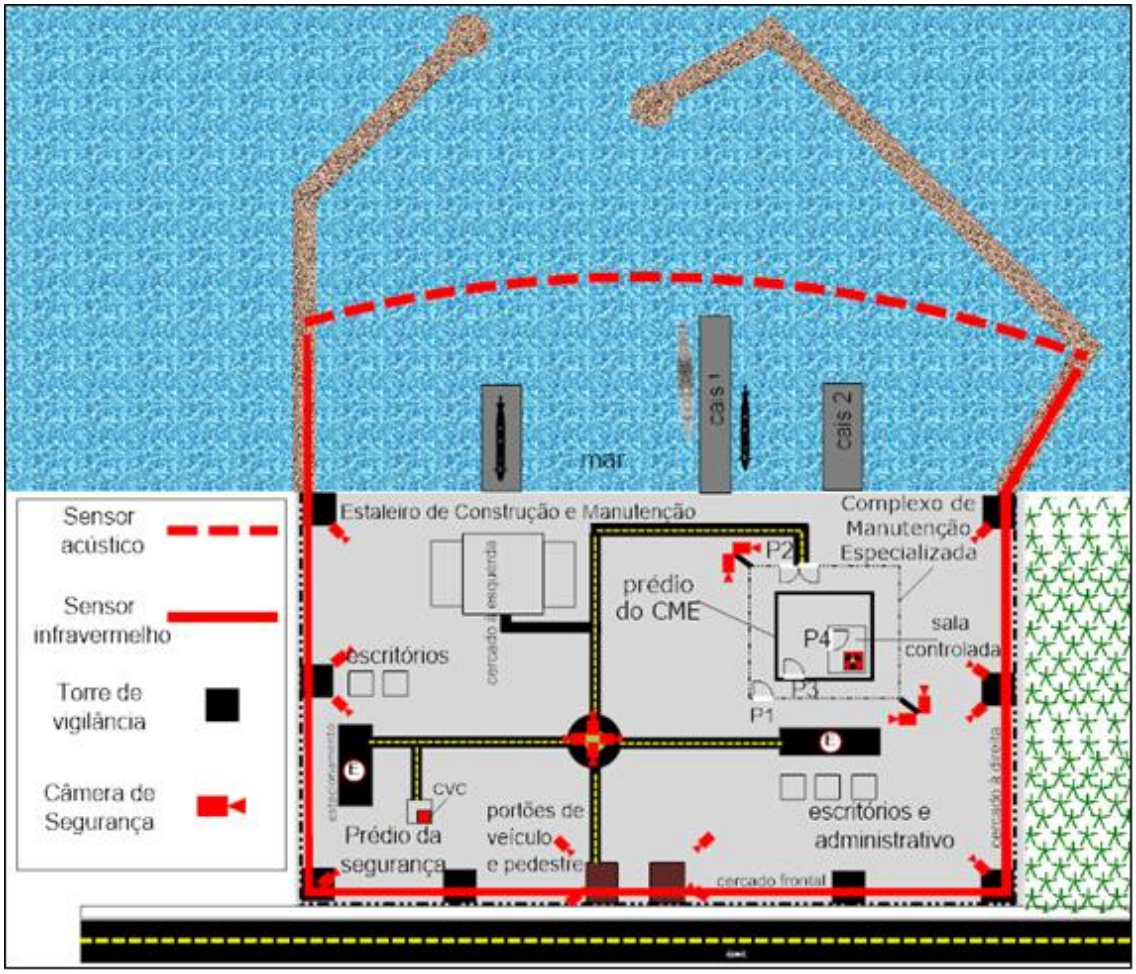


Figura 11 – Medidas de proteção da BNH: CFTV, sensores infravermelho, sensor acústico e torres de vigilância

5.1.2 Controle de Acesso à BNH

O sistema de controle de acesso às instalações nucelares é bastante complexo e apresenta múltiplas camadas a fim de garantir que apenas indivíduos autorizados tenham acesso a áreas restritas. Por isso, que o controle de acesso à BNH exige controles diferentes para cada ponto da instalação.

Antes que alguém possa efetivamente adentrar o complexo, é fundamental que seja realizada uma investigação prévia de todos os funcionários da BNH e visitantes que acessarão a BNH. Essa triagem prévia visa a verificar os antecedentes de modo a

minimizar o risco de exposição de áreas e informações sensíveis a pessoas com interesses duvidosos.

O sistema de segurança garante que o controle de acesso seja adequado à sensibilidade e criticidade de cada área, reforçando a proteção contra acessos não autorizados, desta forma, o acesso às diferentes áreas da BNH é regulamentado por níveis crescentes de segurança, conforme listado:

- **Área vigiada**: requer somente a apresentação do crachá;
- **Área protegida**: exige a combinação de crachá e senha; e
- **Área vital**: necessita de múltiplas verificações, incluindo crachá, senha e biometria.

O acesso à área vigiada da BNH é controlado exclusivamente pelos portões frontais, um para veículos e outro para pedestres, ambos guarnecidos por dois militares armados. A entrada é autorizada mediante a apresentação do crachá, sendo este obrigatório para todos os funcionários, que devem utilizá-lo em local visível durante toda a permanência na instalação. Os veículos dos funcionários também são identificados para liberação de acesso por meio de cancelas e catracas.

Para visitantes (pedestres ou motoristas), o procedimento inclui cadastramento no portão de entrada, entrega de um crachá de visitante, que limita o acesso apenas às áreas autorizadas, e acompanhamento por funcionários da BNH. Essas medidas asseguram um controle rigoroso e eficiente, adequado ao nível de segurança requerido pela instalação.

O acesso ao CME, localizado na área vigiada, é realizado exclusivamente pelas portas P1 (pedestres) e P2 (viaturas), ambas posicionadas no cercado perimetral de 2,5 metros de altura, confeccionado com malha de arame entrelaçada de 4 mm por 50 mm. Esse cercado delimita as áreas protegida e vigiada da BNH.

Para entrar no CME, é necessário o uso de um crachá combinado com uma senha pessoal (PIN), garantindo um nível adicional de segurança. Além disso, o perímetro do CME é monitorado continuamente por quatro câmeras cuidadosamente posicionadas, com controle centralizado no CVC, proporcionando cobertura total e vigilância constante de seu entorno.

O acesso à área vital, que corresponde ao prédio do CME, é exclusivamente realizado pela porta P3, dotada de camadas adicionais de segurança. O edifício é

protegido por paredes reforçadas de 30 cm de espessura, garantido maior resistência a ataques. Para ingressar, é necessário crachá de identificação, digitar uma senha pessoal (PIN) e realizar a autenticação biométrica.

Após a entrada pela porta P3, há uma área de identificação equipada com scanner para inspeção de equipamentos e detectores de metal para pessoas. Esse ambiente é guarnecido por um agente de segurança armado e monitorado por câmeras, cujas imagens são concentradas no CVC, assegurando vigilância contínua e reforçada.

5.2 Sistemas de retardo da BNH

Os sistemas de retardo são uma das camadas fundamentais na proteção física da BNH, sendo responsáveis por desacelerar o avanço de possíveis adversários, proporcionando tempo suficiente para que as forças de resposta intervenham de maneira eficaz. Esses sistemas estão inseridos no perímetro e nas áreas internas da BNH, atuando como barreiras físicas e dissuasórias contra intrusões.

1. Barreiras Perimetrais: o perímetro externo da BNH é protegido por cercas de malha entrelaçada de 4 mm por 50 mm, com 2,5 metros de altura, revestidas com arame farpado na parte superior. Adicionalmente, o perímetro conta com portões controlados eletronicamente, projetados para bloquear o avanço de veículos não autorizados, mesmo em tentativas de invasão em alta velocidade. Esses portões são guarnecidos por dois militares armados, que têm autoridade para tomar ações imediatas em caso de ameaças.

2. Portas Reforçadas e Controle de Acesso: nas áreas protegidas, vigiadas e vitais, portas reforçadas desempenham um papel crítico no sistema de retardo. A porta P3, que controla o acesso ao prédio do CME, é projetada para resistir a ataques físicos e retardar a entrada de adversários.

3. Paredes Reforçadas: as áreas vitais, como o prédio do CME, são protegidas por paredes de concreto armado com 30 cm de espessura. Essa característica estrutural garante elevada resistência a impactos e explosões, retardando significativamente a progressão de um ataque direto.

Os sistemas de retardo da BNH não operam isoladamente, eles estão integrados aos sistemas de detecção e resposta. Essa sinergia garante que o tempo obtido pelos

sistemas de retardo seja utilizado de forma eficiente pelas forças de reação para neutralizar a ameaça antes que ela alcance áreas críticas.

5.3 Sistema de resposta - Força de Reação da BNH

5.3.1 Organização do serviço

A Força de Reação da Base Naval Hipotética (BNH) é uma unidade militar altamente treinada e preparada para responder a qualquer situação de emergência ou ameaça à segurança das instalações e ao material nuclear. O serviço militar de segurança na BNH é organizado de 2 formas principais:

- **Serviços de estado** – serviço que é executado por períodos superior a seis horas, não ultrapassando 24 horas. Não é necessária vigilância constante, sendo realizado por uma pessoa ao longo de todo o dia. A jornada efetiva inicia-se às 7h e termina às 22h. Fora deste período, o militar fica em seu alojamento para descanso e também disponível para eventuais demandas atinentes à segurança.

Serviço de quarto – Serviço em que os militares são divididos em grupos que se revezam em turnos. O turno é chamado de "quarto de serviço" que corresponde ao período de 4h. Normalmente, para cada posto de serviço existem 3 militares que se revezam a cada 4h, para garantir que o posto tenha vigilância 24h por dia, 7 dias por semana. Logo, para um posto de serviço de quarto, são necessários 3 militares de serviço no mesmo posto. Quando o militar não está em seu período de serviço efetivo, ou seja, guarnecendo as guaritas e torres de vigilância, por exemplo, ele está de prontidão/ descanso no prédio da segurança. Um exemplo da divisão de serviços por quartos para um determinado posto de vigilância pode ser visto na Tabela 2. Observa-se que a cada 4 horas de serviço efetivo do militar, descansa-se (ou mantém-se disponível) por 8 horas contínuas.

Tabela 2 – Exemplo de serviço de quarto para o posto de guarita

POSTO: Guarita fundos			
Quarto de serviço	**Período**	**Serviço Efetivo**	**Prontidão/ Descanso**
1º	8h às 12h	militar 1	militar 2 e militar 3
2º	12h às 16h	militar 2	militar 1 e militar 3
3º	16h às 20h	militar 3	militar 1 e militar 2
4º	20h às 00h	militar 1	militar 2 e militar 3
5º	00h às 04h	militar 2	militar 1 e militar 3
6º	04h às 08h	militar 3	militar 1 e militar 2

5.3.2 Postos do Serviço

A estrutura de segurança e vigilância na BNH é composta por diversos postos de serviço que são ocupados por militares com responsabilidades específicas para garantir a segurança e o bom funcionamento das operações da base. Na Tabela 3 está descrita a divisão de serviço responsável pela segurança em 24 horas. Observa-se que para cada posto de serviço de quarto são necessários 3 militares para assegurar o revezamento ao longo do dia.

Tabela 3 – Divisão de serviço para segurança da BNH

Postos de serviço	**Principais atribuições**	**Arma-mento**	**Tipo de serviço**	**Militares em efetivo serviço**	**Militares em descanso/ prontidão**	**Total de militares**
Encarregado geral da divisão de segurança	Coordenar as operações de segurança Gerir a equipe de segurança Exigir o cumprimento dos procedimentos de segurança pelos subordinados Realizar a interlocução de demandas externas para a divisão de serviço	-	Estado	1	0	1
Chefe da divisão de segurança	Coordenar as atividades de rotina Atender as ocorrências em geral Registrar as atividades Assumir temporariamente o comando em situações de emergências	Pistola	Estado	1	0	1

Postos de serviço	Principais atribuições	Arma-mento	Tipo de serviço	Militares em efetivo serviço	Militares em descanso/ prontidão	Total de militares
Supervisor da divisão de segurança	Supervisionar as atividades diárias Organizar e distribuir as atividades inerentes do serviço Garantir o cumprimento das ordens Apoiar a segurança física das instalações	Pistola	Quarto	1	2	3
Identificador	Verificar se as pessoas que acessam a BNH estão devidamente identificadas Inspecionar os veículos na entrada e saída da BNH Operar portões manuais e semiautomático	Pistola	Quarto	1	2	3
Operadores do CVC	Vigiar continuamente as áreas cobertas por câmeras Observar possíveis atividades suspeitas e de violação de segurança Registar eventos e incidentes Notificar a equipe de reação em caso incidentes Verificar e interpretar os alarmes	-	Quarto	2	4	6
Sentinela	Vigiar área externa e os arredores da guarita Observar possíveis atividades suspeitas Solicitar apoio da equipe da força de reação em caso de emergência	Fuzil	Quarto	7	14	21
Total	-	-	-	13	22	35

5.3.3 Dinâmica da Força de Reação

Durante a rotina normal, a divisão de segurança distribui-se da seguinte forma:

- Na área dos portões de pedestre e de veículo, a segurança está representada no local por um supervisor da divisão de segurança e um identificador;
- Em cada uma das oito torres de vigilância (guarita), existe um militar no seu devido posto de observação na função de sentinela;
- O CVC é guarnecido por 2 militares no posto de operador do CVC; e

- Os demais postos, chefe da divisão de segurança e encarregado geral da divisão de segurança, não possuem locais fixos na BNH, atuam na coordenação e gestão da equipe.

Em caso de acionamento da FR devido uma possível invasão nos limites da BNH, há uma mobilização imediata para responder à situação da forma mais rápida possível. A resposta segue a seguinte dinâmica:

- Os militares em efetivo serviço permanecem em seus locais, sem realizar ações imediatas, mas devem se manter alertas e atentos à nova situação;
- Os militares em descanso/prontidão ficam alojados no prédio da segurança;
- Existe uma sala de material bélico, próxima aos alojamentos para provimento de armas, equipamento de proteção balística e rádios portáteis de comunicação para toda a FR;
- Há duas viaturas com capacidade para 16 pessoas que apoiam a equipe da FR no deslocamento interno da BNH.
- O chefe da divisão de segurança se desloca para o CVC, onde já existem dois militares de efetivo serviço, para realizar todo o acompanhamento, supervisão e orientação da equipe da FR;
- A comunicação entre os militares do CVC, sentinelas e FR é feita por rádios portáteis de comunicação;
- Os 22 militares em descanso/prontidão são os componentes da Força de Reação, que será subdividida em duas outras unidades conforme descrito a seguir
- Força de Ataque (FA): composta por 11 militares, responsáveis pelo deslocamento até o local do adversário, interceptação e neutralização do adversário; e
- Força de Proteção (FP): também composta por 11 militares, cuja função é reforçar a proteção de áreas sensíveis da instalação.

O deslocamento da força de reação é essencial para responder a incidentes, por isso serão propostas três diferentes estratégias de translado da equipe desde o prédio de segurança, onde a força de reação está alojada, até o local da intrusão (CME). Essas opções estão detalhadas na Tabela 4 e na Tabela 5, levando em consideração fatores como o meio do deslocamento durante o trajeto, rapidez e geografia da BNH.

Algumas considerações podem ser destacadas referentes aos dados do tempo de translado para cada uma das situações apresentadas.

- As distâncias foram determinadas a partir das dimensões da planta da BNH;
- Velocidade de marcha concebida a partir de trabalhos anteriores (ABREU, 2018) e velocidade da viatura estimada pelo próprio autor; e
- Tempos obtidos a partir de cálculo direto com dados de distância e velocidade.

Tabela 4 – Tempo de translado da Força de Reação: situação 1 e situação 2

	Situação 1	Situação 2
Parâmetros	Somente deslocamento a pé	Somente deslocamento por viatura
Distância (m)	840	840
Velocidade média (m/s)	3	16,7 (60 km/h)
Tempo de translado (s)	280	50,4

Tabela 5 – Tempo de translado da Força de Reação: situação 3

Situação 3				
Deslocamento por viatura + a pé				
Parâmetros referentes ao deslocamento da viatura			Parâmetros referentes ao deslocamento a pé	
Distância do prédio da segurança até CME (m)	520		Semiperímetro do CME (m)	360
Velocidade média da viatura (m/s)	16,7		Velocidade de marcha da FR (m/s)	3
Tempo da viatura (s)	31,2		Tempo a pé (s)	120
Tempo total de translado: viatura + a pé (s)	151,2			

Os tempos de resposta para cada uma das atividades previstas para a resposta da FR da BNH podem ser visualizados na Tabela 6. Os valores propostos representam uma média do que seria esperado de uma FR treinada e equipada adequadamente. É válido mencionar que, em organizações militares, esses dados de performance seriam obtidos por meio de exercícios práticos conduzidos periodicamente pela divisão de segurança.

Estes exercícios simulam ameaças com o objetivo de verificar a capacidade de resposta da FR em diferentes aspectos: tempo de mobilização, precisão de ações táticas e a eficiência de comunicação e coordenação da equipe pelo líder da FR.

A singularidade de cada instalação influencia diretamente os parâmetros de desempenho, uma vez que fatores como a planta, adjacências da instalação, o nível de ameaça, ferramentas do adversário, poder de dano do armamento e o treinamento específico da força de segurança são determinantes para o SPF. Dessa forma, os resultados de desempenho podem variar significativamente. Os exercícios e treinamentos são essenciais para assegurar que a FR esteja em constante prontidão para responder a eventuais emergências ou ataques, oferecendo uma medida concreta da eficácia operacional.

Tabela 6 – Parâmetros de resposta da Força de Reação

Fase	Descrição	Tempo (s)
Fase de Preparação	Ativação do alarme	1
	Avaliação do operador do CVC	45
	Comunicação com a FR	30
	Preparação da FR	60
Fase de Translado	Translado da FR do prédio da segurança até o CME	280 (situação 1) ou 50,4 (situação 2) ou 151,2 (situação 3) (consultar situações na Tabela 4 e na Tabela 5)
Tempo total da Força de Reação		416 (situação 1) ou 186,4 (situação 2) ou 287,2 (situação 3) (consultar situações na Tabela 4 e na Tabela 5)

O tempo total da FR consiste no somatório dos tempos da fase de preparo e da fase de translado.

Os testes realizados na SNL sugerem que o desvio padrão de um evento temporal pode ser conservadoramente estimado em 30% da média. Assim, caso não existam testes suficientes para determinar um desvio padrão significativo, esse valor é adotado como

referência (GARCIA, 2008). Para obter tempos mais próximos da média, foi adotado um valor de 20% para o desvio padrão referente aos tempos da FR, conforme apresentado na Tabela 6. O uso do uso do desvio padrão para o tempo da FR e tempos de atraso permite considerar o fato de que a equipe de reação nem sempre responderá exatamente no mesmo tempo e que os adversários podem levar mais ou menos tempo para penetrar as barreiras.

Esses parâmetros servem como referência para ajustes e melhorias contínuas nos protocolos de segurança e a técnicas de reposta, assegurando que as equipes estejam sempre preparadas para responder de maneira rápida e eficiente a qualquer tipo de incursão adversária. O processo de validação dessas métricas é dinâmico e precisa ser atualizado periodicamente para atender às mudanças nas ameaças, avanços tecnológicos e estratégias futuras decorrentes de experiências prévias.

6 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DO SPF DA BNH

6.1 Diagrama de Sequência do Adversário (DSA) da BNH

A planta da BNH pode ser representada por um gráfico dos elementos do sistema de proteção utilizados para auxiliar na eficácia do SPF da instalação, denominado Digrama de Sequência do Adversário (DSA). O método demostra os caminhos possíveis que o adversário pode seguir para atingir os objetivos de roubo ou sabotagem.

A partir dos conceitos do Diagrama de Sequência do Adversário, a Base Naval Hipotética (BNH) foi modelada em um DSA para antecipar e mitigar ameaças potenciais, permitindo a construção de uma defesa mais robusta e eficiente. O diagrama proporciona uma visão detalhada das possíveis etapas que um adversário pode seguir ao tentar comprometer a segurança da base. Um modelo de DSA para a Base Naval hipotética está representado na Figura 12.

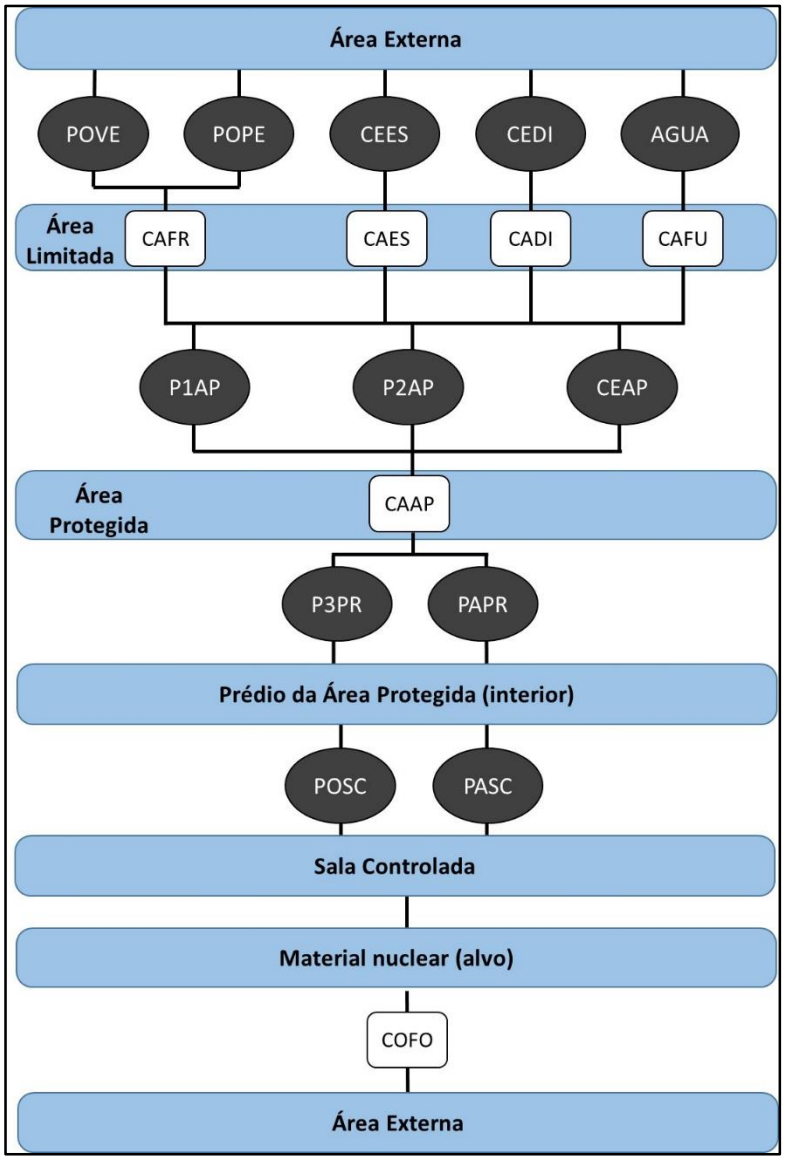


Figura 12 – Diagrama de Sequência do Adversário da BNH

No diagrama apresentado na Figura 12, usaram-se siglas para os elementos de proteção (barreiras físicas) para manter as caixas do diagrama pequenas e facilitar a visualização. As identificações estão listadas na ordem de aparecimento no DSA e estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Identificações utilizadas no DSA da BNH

Identificação	Significado
POVE	Portão de Veículo
POPE	Portão de Pedestre
CEES	Cercado à Esquerda
CEDI	Cercado à Direita
AGUA	Água

Identificação	Significado
CAFR	Caminhada Frontal
CAES	Caminhada à Esquerda
CADI	Caminhada à Direita
CAFU	Caminhada pelos Fundos
P1AP	Porta 1 da Área Protegida
P2AP	Porta 2 da Área Protegida
CEAP	Cercado da Área Protegida
CAAP	Caminhada na Área Protegida
P3PR	Porta 3 do Prédio do CME
PAPR	Parede do Prédio do CME
P4SC	Porta da Sala Controlada
PASC	Parede da Sala Controlada
COFO	Corrida para Fora

Mediante o exposto, algumas considerações são relevantes e pertinentes para o entendimento e leitura do DSA da BNH:

- O DSA mostra que para ir da Área Externa para a Área Limitada existem 5 opções disponíveis: POVE, POPE, CEES, CEDI e AGUA, e assim sucessivamente verificando os segmentos de caminho disponíveis até atingir o alvo;

- Os retângulos brancos dentro das Áreas Limitada e Protegida representam os trajetos que o adversário deve percorrer para alcançar a próxima barreira. Como essas distâncias demandam tempo significativo e contribuem para o atraso do intruso, elas foram devidamente consideradas no DSA, influenciando diretamente o cálculo do tempo total de resposta;

- Observa-se que os retângulos brancos apresentam também questões limitantes, ou seja, se um adversário penetra pela água (AGUA) não poderá realizar a Caminhada à Direita (CADI) por questões geográficas. Neste exemplo citado, somente resta a Caminhada pelos Fundos (CAFU), conforme segmentos de caminho mostrados no DSA;

- De forma a simplificar a análise, supondo que o adversário atinja o alvo (captura do material nuclear) para o cenário de roubo, ele retornará pelo mesmo caminho que utilizou para entrar, percorrendo as respectivas distâncias de saída iguais às de

entrada. Esse retorno é dado pelo retângulo branco na parte de baixo do DSA chamado de COFO (Corrida para Fora). Então a representação da sequência “COFO-> Área Externa”, varia de acordo com o caminho utilizado pelo adversário.

O próximo passo envolve a caracterização detalhada das barreiras físicas previamente identificadas no Diagrama de Sequência do Adversário (DSA). Cada uma dessas barreiras deve ser associada a uma medida de proteção adequada, como a instalação de sensores de movimento, intrusão, infravermelho ou outros dispositivos de monitoramento. Além disso, é crucial estipular as respectivas probabilidades de detecção (P_D) de cada sensor, considerando fatores como alcance, tempo de resposta, taxa de falsos alarmes e a capacidade de integração com outros sistemas de segurança.

Essa abordagem não apenas reforça a capacidade de resposta da instalação, mas também otimiza os recursos de segurança ao direcionar as proteções para os pontos mais críticos. Ao definir as probabilidades de detecção, devem-se levar em conta variáveis como o ambiente de operação, as características do intruso e a confiabilidade dos sistemas, garantindo que a combinação de barreiras e sensores atenda aos requisitos de segurança estipulados.

Outro ponto relevante é a integração dos sensores com o CVC, que após avaliação do operador, permite uma resposta imediata e coordenada a qualquer violação detectada, além da análise contínua da eficiência das barreiras ao longo do tempo.

A Tabela 8 apresenta uma proposta inicial da caracterização das barreiras físicas discretizadas a partir da planta da BNH. Os dados foram extraídos através de consultas às tabelas oferecidas pelo *Sandia National Laboratories*, em um manual de pesquisas de situações hipotéticas (SNL, 2017). Essas tabelas provêm informações detalhadas referente às probabilidades de detecção de diversos tipos de componentes (sensores), e trazem também, os tempos de atraso associados às principais barreiras físicas (paredes, portas, janelas, cercados etc.) relacionados a equipamentos e ferramentas utilizados para vencer as barreiras supracitadas, parâmetro este, que ainda será detalhado ao longo da descrição do SPF.

Entre os sensores considerados, estão câmeras de segurança, sensores infravermelhos, e a presença de postos de guarda, cada um com capacidades específicas de monitoramento e detecção. As probabilidades de detecção são influenciadas por

variáveis como o tipo de sensor e a configuração da barreira, enquanto o tempo de atraso reflete o intervalo necessário para retardar o avanço de um intruso antes da intervenção.

Este estudo é fundamental para otimizar o desenho das barreiras de segurança, garantindo uma combinação eficaz de detecção rápida e tempo de resposta, minimizando os riscos em situações hipotéticas de intrusão.

Tabela 8 – Proposta inicial de barreiras físicas e Probabilidades de Detecção das medidas de proteção

Sigla	**Barreira**	**Característica da Barreira**	**Medida de Proteção**	**P_D** (SNL, 2017)
POVE	Portão de veículos	Portão de arame de 2,5m de altura de malha entrelaçada de 4mm x 50mm	Múltiplos sensores	0,9
POPE	Portão de pedestres	Portão de arame de 2,5m de altura de malha entrelaçada de 4mm x 50mm	Múltiplos sensores	0,75
CEES	Cercado à esquerda	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Infravermelho	0,8
CEDI	Cercado à direita	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Infravermelho	0,8
AGUA	Água (Mar)	Região de mar aprisionada pelos enrocamentos	Sensor acústico	0,8
CAES	Caminhada à esquerda	Área livre de trânsito de pedestre	Câmera de vídeo	0,5
CADI	Caminhada à direita	Área livre de trânsito de pedestre	Câmera de vídeo	0,5
CAFR	Caminhada frontal	Área livre de trânsito de pedestre	Múltiplos sensores	0,9
CAFU	Caminhada pelos fundos	Área livre de trânsito de pedestre	Câmera de vídeo	0,5
P1AP	Porta 1 da área protegida (pedestre)	Porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6mm	Múltiplos sensores	0,9
P2AP	Portão 2 da área protegida (veículo)	Portão de veículos padrão industrial - 1,6mm (painel vazado de aço)	Câmera de vídeo	0,5
CEAP	Cercado da área protegida	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Câmera de vídeo	0,8
CAAP	Caminhada na área protegida	-	Câmera de vídeo	0,5
P3PR	Porta 3 do prédio da área protegida	Porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6mm	Múltiplos sensores	0,75

Sigla	Barreira	Característica da Barreira	Medida de Proteção	P_D (SNL, 2017)
PAPR	Paredes do prédio da área protegida	concreto reforçado de 30cm de espessura	Câmera de vídeo	0,5
P4SC	Porta 4 da sala controlada	padrão industrial (1,6mm espessura)	Múltiplos sensores	0,75
PASC	Parede da sala controlada	concreto reforçado de 10cm de espessura	Câmera de vídeo	0,5
COFO	Corrida para fora da BNH	Distância a ser percorrida	Câmera de vídeo	0,5

Para cada barreira de segurança, o adversário pode empregar ferramentas e técnicas distintas para superá-la, sendo que cada método de ataque está associado a um tempo de atraso específico. Essas ferramentas podem variar desde equipamentos físicos, como escadas, alicates, explosivos, até o uso de tecnologia avançada para neutralizar sistemas eletrônicos, como sensores infravermelhos, câmeras de vigilância e sistemas de alarme.

O tempo de atraso (T_d) representa o intervalo durante o qual a barreira resiste à tentativa de intrusão, funcionando como um fator crítico para permitir a resposta das forças de segurança. Ele depende da robustez da barreira, da sofisticação da ferramenta utilizada pelo adversário, e da integração das barreiras com sistemas de detecção. Uma barreira física robusta pode ser mais eficaz em retardar o avanço do intruso, enquanto barreiras eletrônicas, embora possam ser neutralizadas com rapidez, oferecem uma alta probabilidade de detecção que ativa contramedidas imediatas.

Esse tempo de atraso, combinado com a detecção antecipada, é fundamental para o sucesso da resposta defensiva, garantindo que a equipe de segurança possa intervir antes que o adversário consiga acessar áreas mais internas ou ativos valiosos. A análise detalhada das ferramentas adversárias e o tempo de atraso de cada barreira ajudam a otimizar o planejamento de defesa e a alocação de recursos de segurança em pontos estratégicos do SPF.

Existe uma série de ferramentas que podem ser utilizadas para vencer as barreiras da BNH; neste Estudo, foram selecionadas ferramentas apropriadas e plausíveis para cada barreira, assim como os tempos de atraso para cada barreira, eles estão apresentados na Tabela 9**,** cujos dados foram obtidos de (SNL, 2017). Observa-se que foram utilizadas

mais de uma ferramenta para cada barreira física, e também atribuído um número no final de cada sigla, que representa uma ferramenta diferente. Por exemplo, para o Portão de Veículos (POVE), foram adicionados números ao final da sigla: POVE-1, POVE-2 e POVE-3, eles indicam ferramentas diferentes: escada, alicate de corte específico e alicate, respectivamente. Essas informações são fundamentais para a avaliação das medidas de defesa e da eficácia das barreiras em relação à resistência e tempo de resposta.

Tabela 9 – Ferramentas e tempos de atraso das barreiras físicas

Sigla	Tempo de atraso (T_d) (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
POVE-1	12	2	Escada
POVE-2	60	12	Alicate de corte específico
POVE-3	120	25	Alicate
POPE-1	12	2	Escada
POPE-2	60	12	Alicate de corte específico
POPE-3	120	25	Alicate
CEES-1	12	2	escada
CEES-2	60	12	Alicate de corte específico
CEDI-1	12	2	Escada
CEDI-2	60	12	Alicate de corte específico
AGUA	180	45	Equipamento de mergulho
CAES	220*	55	-
CADI	58*	14,5	-
CAFR	128*	32	-
CAFU	64,8*	16,2	-
P1AP-1	12	25	Pé-de-cabra
P1AP-2	114	28,5	Explosivo
P2AP-1	90	19	pé-de-cabra
P2AP-2	66	16,5	Explosivo
CEAP-1	12	2	Escada
CEAP-2	60	12	Alicate de corte específico
CAAP	12*	3	-
P3PR-1	12	25	Pé-de-cabra
P3PR-2	114	28,5	Explosivo
PAPR	132	33	Explosivo

Sigla	Tempo de atraso (T_d) (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
P4SC-1	12	25	Pé-de-cabra
P4SC-2	114	28,5	Explosivo
PASC	120	30	Explosivo
COFO	**	**	-

O valor atribuído para o desvio padrão do tempo de atraso (T_d) foi estimado em 25% para as siglas AGUA, CAES, CADI, CAFR, CAFU, P1AP-2, P2AP-2, CAAP, P3PR-2, PAPR, P4SC-2, PASC e CAFO, pois estas informações não estavam disponíveis em (SNL, 2017).

Os tempos de atraso indicados com um asterisco “*” foram calculados a partir da razão entre distância e velocidade. As distâncias foram obtidas pela proporção das dimensões da BNH, 880 m X 550 m, conforme mostrado na Figura 13. Ao passo que, as velocidades foram obtidas a partir de valores médios de corrida de uma pessoa, conforme mostrado na Tabela 12.

Os tempos de atraso para a Corrida para Fora (COFO), indicados com "**", variam de acordo com o caminho de entrada escolhido pelo invasor. Isso significa que, se o intruso entrar pela frente da instalação, a rota de fuga será pela mesma entrada, demandando um cálculo específico para o tempo de deslocamento nessa direção. O tempo de atraso para essa rota frontal, portanto, deve ser ajustado para refletir a distância percorrida, que difere de outras possíveis rotas de saída, como ilustrado na Figura 13.

As distâncias dos cercados laterais, dos portões frontais e distâncias do mar até o CME estão indicadas na Figura 13 e compiladas na Tabela 10.

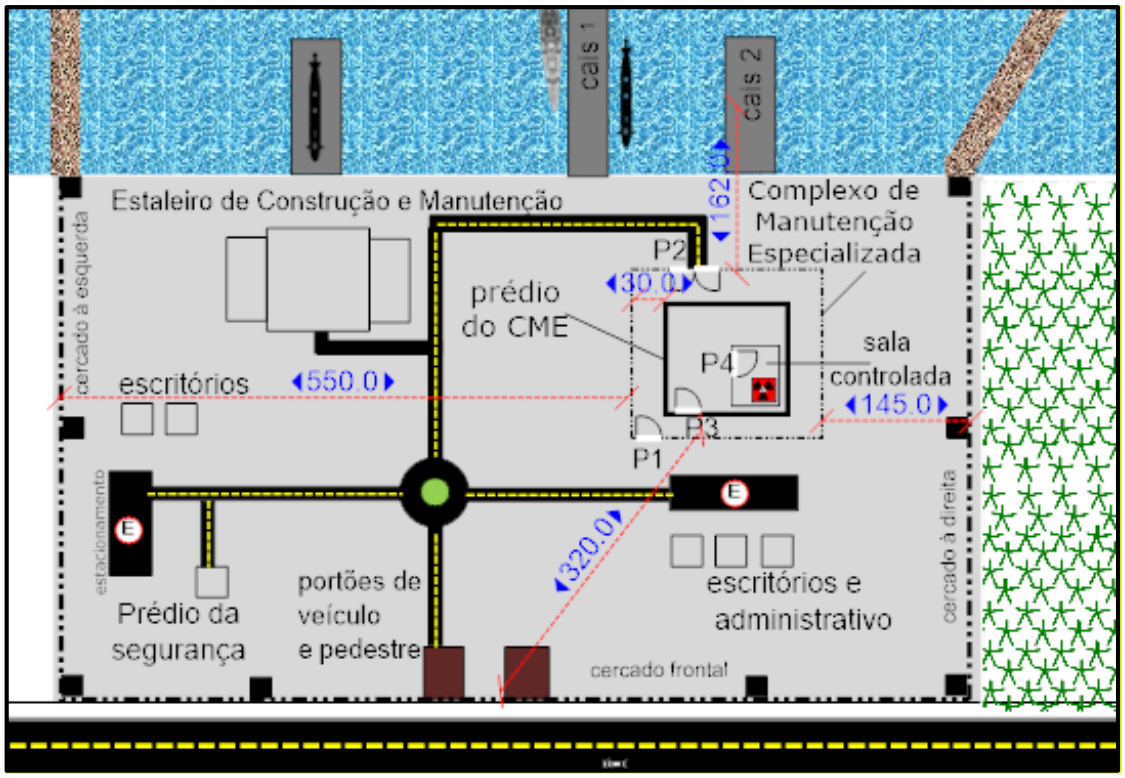


Figura 13 – Distâncias laterais, frontal e posterior de caminhada do adversário

Tabela 10 – Distâncias médias dos limites da BNH até CME

		Distâncias médias até o cercado do CME (m)	Distância do cercado do CME até o prédio do CME (m)
corrida na área vigiada	pela esquerda	550	30
	pela direita	145	30
	pela frente	320	30
	pelos fundos (mar)	162	30

As velocidades típicas de corrida para um ser humano estão detalhadas na Tabela 11, considerando diferentes condições físicas e níveis de treinamento, evidentemente. Esses dados são fundamentais para estimar com precisão o tempo de deslocamento do adversário nas simulações, auxiliando na avaliação da eficácia das barreiras e no planejamento das respostas de segurança.

Tabela 11 – Velocidades médias para diferentes tipos de corrida

Descrição	Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Referência de Ritmo
Caminhada Rápida	6 – 7 km/h	1,67 – 1,94 m/s	Deslocamento rápido, mas ainda caminhando.
Trote Leve	8 – 9 km/h	2,22 – 2,50 m/s	Corrida leve, fácil de manter, aquecimento.
Corrida Moderada	10 – 12 km/h	2,78 – 3,33 m/s	Corrida confortável, ritmo de resistência.
Corrida Rápida	13 – 15 km/h	3,61 – 4,17 m/s	Ritmo intenso, mais difícil de sustentar.
Corrida Acelerada	16 – 18 km/h	4,44 – 5,00 m/s	Corrida muito rápida, exige maior esforço.
Sprint	19 km/h ou mais	5,28 m/s ou mais	Máxima velocidade, mantida por curtos períodos.

Fonte: adaptado de (FINCH, 2022)

No entanto, para os cenários de invasão e fuga na BNH, serão utilizadas as velocidades de entrada e escape descritas na Tabela 12. Estas correspondem aos limites superior de um trote leve e limite inferior de uma corrida moderada para a entrada e escape, respectivamente.

Tabela 12 – Velocidades para o cenário de invasão e fuga

Cenários para invasão	
velocidade de caminhada de entrada	2,50 m/s
velocidade de corrida de fuga	2,78 m/s

Fonte: adaptado de (FINCH, 2022)

Observa-se que a velocidade de entrada é inferior à de saída, pois, durante a invasão, o objetivo do adversário é evitar a detecção pelos sistemas de segurança e não levantar suspeitas entre os elementos de proteção interna da instalação. A movimentação mais lenta, portanto, favorece a furtividade e reduz o risco de alertar a equipe de segurança. Por outro lado, durante a fuga da BNH, especialmente quando o invasor já estiver de posse do objeto-alvo subtraído, a prioridade se torna a evasão rápida do local. Nessa fase, a agilidade é essencial para minimizar o tempo de exposição e diminuir as chances de interceptação pela FR, aumentando assim a probabilidade de sucesso da operação adversária.

A partir das distâncias e velocidades médias, calcula-se o tempo de atraso para cada uma das situações de entrada e saída apresentadas na Tabela 13. Observa-se que o tempo utilizado para a invasão (entrada) é maior do que o da fuga (saída), uma vez que, durante a entrada, assume-se que o adversário mantém um ritmo de trote leve, enquanto

na saída ele adota um ritmo mais acelerado, caracterizado como uma corrida moderada.

Tabela 13 – Tempos médios de invasão e fuga do adversário

	Tempo médio de deslocamento pela esquerda CAES (s)	Tempo médio de deslocamento pela direita CADI (s)	Tempo médio de deslocamento pela frente CAFR (s)	Tempo médio de deslocamento pelos fundos CAFU (s)
Invasão (entrada)	220,0	58,0	128,0	64,8
Fuga (saída) COFO	208,8	63,0	126,0	69,1

Após a apresentação dos dados, é possível consolidar todas as informações relevantes, juntamente com as variações do DSA, em uma só matriz, como ilustrado na Tabela 14. Essa matriz facilita a visualização das diferentes rotas de invasão, mostrando de maneira organizada, as interações entre os parâmetros críticos, como características da barreira, sensores, tempos de atraso e ferramentas utilizadas pelos invasores.

Tabela 14 – Barreiras, medidas de proteção e ferramentas do adversário

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Medida de proteção	P_d	*Loca-tion*	Tempo de atraso T_d (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
Área externa									
POVE-1	Portão de veículos	Portão de arame de 2,5m de altura de malha entrelaçada de 4mm x 50mm	Penetrar portão de veículos	Múltiplos sensores	0,9	B	12	2	Escada
POVE-2			Penetrar portão de veículos	Múltiplos sensores	0,9	B	60	12	Alicate de corte específico
POVE-3			Penetrar portão de veículos	Múltiplos sensores	0,9	B	120	25	Alicate
POPE-1	Portão de pedestres	Portão de arame de 2,5m de altura de malha entrelaçada de 4mm x 50mm	Penetrar portão de pedestres	Múltiplos sensores	0,75	B	12	2	Escada
POPE-2			Penetrar portão de pedestres	Múltiplos sensores	0,75	B	60	12	Alicate de corte específico
POPE-3			Penetrar portão de pedestres	Múltiplos sensores	0,75	B	120	25	Alicate
CEES-1	Cercado à esquerda	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Escalar cercado localizado à esquerda da base naval	Infravermelho	0,8	B	12	2	Escada
CEES-2			Cortar cercado localizado à esquerda da base naval	Infravermelho	0,8	B	60	12	Alicate de corte específico
CEDI-1	Cercado à direita	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Escalar cercado localizado à esquerda da base naval	Infravermelho	0,8	B	12	2	Escada
CEDI-2			Cortar cercado localizado à direita da base naval	Infravermelho	0,8	B	60	12	Alicate de corte específico
AGUA	Mar	Região de mar aprisionada pelos enrocamentos	Invadir pelo mar próximo ao cais 2	Sensor acústico	0,8	B	180	45	Equipamento de mergulho
Área limitada (vigiada)									
CAES	Caminhada à esquerda	-	Caminhar do cercado da área externa (à esquerda) para o cercado do CME	Câmera de vídeo	0,5	B	220	66	-
CADI	Caminhada à direita	-	Caminhar do cercado da área externa (à direita) para o cercado do CME	Câmera de vídeo	0,5	B	58	22	-

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Medida de proteção	P_d	*Loca-tion*	Tempo de atraso T_d (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
CAFR	Caminhada frontal	-	Caminhar do cercado da área externa (frontal) para o cercado do CME	Múltiplos sensores	0,9	B	128	44,5	-
CAFU	Caminhada fundo	-	Caminhar do cais 2 para o cercado do CME	Câmera de vídeo	0,5	B	64,8	16,2	-
P1AP-1	Porta 1 da área protegida (pedestre)	Porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6mm	Penetrar porta P1 do CME	Múltiplos sensores	0,9	B	12	25	Pé-de-cabra
P1AP-2			Explodir porta P1 do CME	Múltiplos sensores	0,9	M	114	28,5	Explosivo
P2AP-1	Portão 2 da área protegida (veículo)	Portão de veículos padrão industrial - 1,6mm (painel vazado de aço)	Penetrar porta P2 do CME	Câmera de vídeo	0,5	B	90	19	Pé-de-cabra
P2AP-2			Explodir porta P2 do CME	Câmera de vídeo	0,5	B	66	16,5	Explosivo
CEAP-1	Cercado da área protegida	Cerca de arame de 2,5m altura de malha entrelaçada 4mm x 50mm	Escalar cercado limítrofe do CME	Câmera de vídeo	0,8	B	12	2	Escada
CEAP-2			Cortar cercado limítrofe do CME	Câmera de vídeo	0,8	B	60	12	Alicate corta parafuso
Área Protegida (CME)									
CAAP	Caminhada na área protegida	-	Caminhar do cercado do CME para o prédio	Câmera de vídeo	0,5	B	12,2	3,05	-
P3PR-1	Porta 3 do prédio da área protegida	Porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6mm	Penetrar porta P3 do prédio do CME	Múltiplos sensores	0,75	B	12	25	Pé-de-cabra
P3PR-2			Explodir porta P3 do prédio do CME	Múltiplos sensores	0,75	M	114	28,5	Explosivo
PAPR	Paredes do prédio da área protegida	Concreto reforçado de 30cm de espessura	Explodir parede do prédio do CME	Câmera de vídeo	0,5	M	132	33	Explosivo
Prédio da Área Protegida (interior)									
P4SC-1	Porta 4 da sala controlada	Padrão industrial (1,6mm espessura)	Penetrar porta P4 da sala controlada	Múltiplos sensores	0,75	B	12	25	Pé-de-cabra

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Medida de proteção	P_d	*Loca-tion*	Tempo de atraso T_d (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
P4SC-2		Padrão industrial (1,6mm espessura)	Explodir porta da sala controlada	Múltiplos sensores	0,75	M	114	28,5	Explosivo
PASC	Parede da sala controlada	Concreto reforçado de 10cm de espessura	Explodir parede da sala controlada	Câmera de vídeo	0,5	M	120	30	Explosivo
Sala Controlada									
Material nuclear (alvo)									
COFO	Corrida para fora da base naval	-	Retornar para o ponto de origem da invasão	Câmera de vídeo	0,5	B	Ver Tabela 13	-	-

A coluna "*Location*" refere-se à localização onde a detecção do invasor ocorre, em relação ao tempo de atraso, e pode variar de três formas possíveis. Essas variações refletem diferentes pontos no percurso do invasor, onde a detecção pode acontecer, impactando diretamente no tempo de invasão, e consequente resposta da FR.

- B (*begin*) – A detecção ocorre antes do atraso. Ex.: sensores volumétricos que detectam antes do indivíduo executar uma tarefa;
- M (*middle*) – A detecção ocorre durante o tempo de atraso do adversário. Ex.: O uso de explosivos, pois a detecção ocorrerá num ponto intermediário da tarefa;
- E (*end*) – A detecção ocorre após o tempo de atraso. Ex.: Uma porta equipada com sensor de abertura, que dispara o alarme apenas após a porta ser aberta. Esse cenário representa o pior caso para a FR, pois, nesse momento, o invasor já superou a barreira física.

6.2 Análise de múltiplos caminhos

A partir do Diagrama de Sequência do Adversário (DSA) é possível realizar a análise de múltiplos caminhos que um intruso pode percorrer ao tentar violar as defesas de uma instalação. O DSA mapeia diversas rotas possíveis que o adversário pode utilizar, considerando a combinação de barreiras físicas e tecnológicas, como cercados, portas e

paredes associados aos seus respectivos sensores (câmeras de vigilância, sensor infravermelho, entre outros).

Cada caminho representa uma sequência de ações do adversário para transpor barreiras específicas, sendo que a probabilidade de detecção (P_D) e o tempo de atraso (T_D) variam conforme as ferramentas usadas e a resistência de cada barreira (ANDIWIJAYAKUSUMA, 2021). O objetivo dessa análise é identificar os pontos vulneráveis da BNH e priorizar áreas que necessitam de reforço adicional. Dessa forma, o DSA ajuda a definir cenários onde as defesas podem ser comprometidas, permitindo uma resposta proativa e a alocação otimizada de recursos de segurança.

Ao identificar múltiplos caminhos, o DSA também permite simular ataques coordenados em diferentes setores da base, melhorando a eficácia do plano de defesa e contribuindo para a formação de uma estratégia de contenção eficiente, garantindo que as ações de mitigação possam ser ativadas com antecedência, minimizando o risco de comprometimento das áreas críticas, como o CME e demais áreas sensíveis da unidade.

Portanto, considerando todas as formas possíveis de invasão apresentadas na Tabela 14, determina-se o número de caminhos possíveis do adversário para a planta da BNH. Na Figura 14 é apresentado um diagrama das rotas possíveis que podem ser exploradas pelo adversário para violar as defesas da BNH.

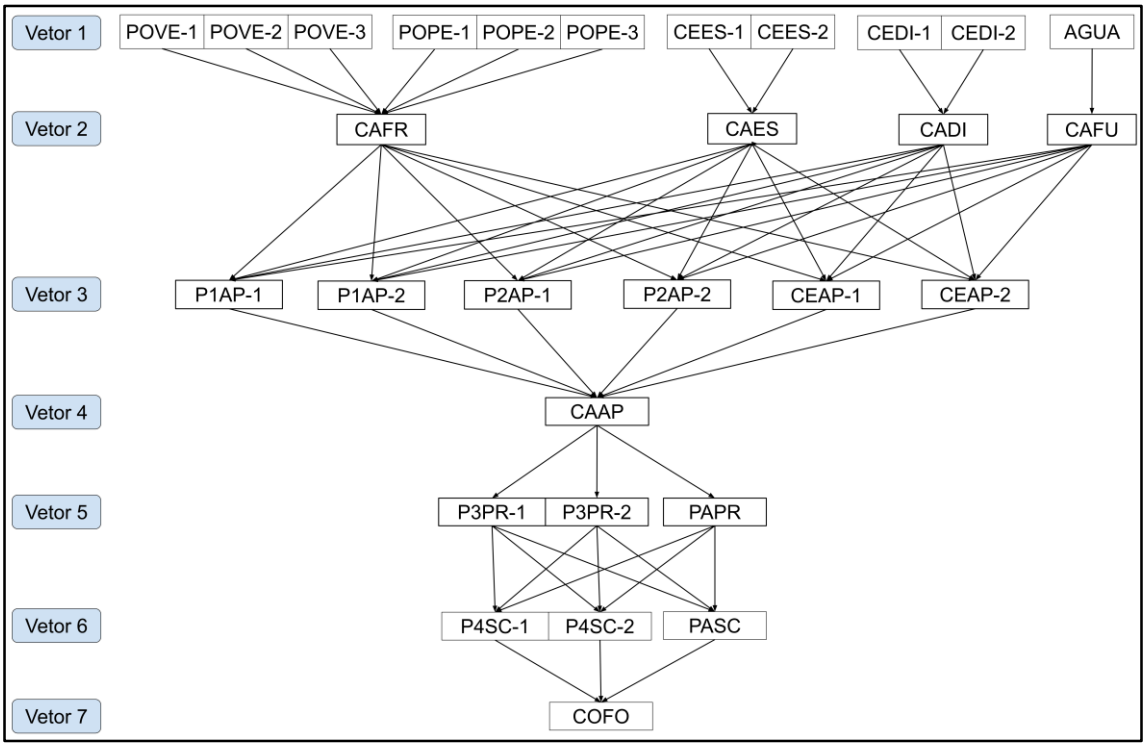


Figura 14 – Quantidade de caminhos possíveis de roubos de material nuclear da BNH

Destaca-se novamente, a restrição de caminhos imposta pelo diagrama devido a características geográficas. Se houver invasão pelo Portão de Veículo com a ferramenta escada (POVE-1), somente resta a Caminhada Frontal (CAFR) para ser realizada por esse intruso. Logo, o número de maneiras possíveis de invasão é calculado utilizando-se o Princípio Fundamental da Contagem (ROSS, 2019), atentando-se às restrições do diagrama.

Tabela 15 – Quantidade de caminhos possíveis de roubo de material nuclear da BNH

	Possibilidades de caminhos pela frente (CAFR)		Possibilidades de caminhos à esquerda (CAES)		Possibilidades de caminhos à direita (CADI)		Possibilidades de caminhos pelos fundos (CAFU)	
Vetores	Caminhos possíveis	Quantidade de caminhos	Caminhos possíveis	Quantidade de caminhos	Caminhos possíveis	Quantidade de caminhos	Caminhos possíveis	Caminhos possíveis
Vetor 1	POVE-1 POVE-2 POVE-3 POPE-1 POPE-2 POPE-3	6	CEES-1 CEES-2	2	CEDI-1 CEDI-2	2	AGUA	1
Vetor 2	CAFR	1	CAFR	1	CAFR	1	CAFR	1
Vetor 3	P1AP-1 P1AP-2 P2AP-1 P2AP-2 CEAP-1 CEAP-2	6	P1AP-1 P1AP-2 P2AP-1 P2AP-2 CEAP-1 CEAP-2	6	P1AP-1 P1AP-2 P2AP-1 P2AP-2 CEAP-1 CEAP-2	6	P1AP-1 P1AP-2 P2AP-1 P2AP-2 CEAP-1 CEAP-2	6
Vetor 4	CAAP	1	CAAP	1	CAAP	1	CAAP	1
Vetor 5	P3PR-1 P3PR-2 PAPR	3	P3PR-1 P3PR-2 PAPR	3	P3PR-1 P3PR-2 PAPR	3	P3PR-1 P3PR-2 PAPR	3
Vetor 6	P4SC-1 P4SC-2 PASC	3	P4SC-1 P4SC-2 PASC	3	P4SC-1 P4SC-2 PASC	3	P4SC-1 P4SC-2 PASC	3
Vetor 7	COFO	1	COFO	1	COFO	1	COFO	1
Total parcial de formas de invasão	**324**		**108**		**108**		**54**	
Total de formas de invasão	**594**							

Observa-se que a partir do 3º nível até o 7º nível, todas as possiblidades de caminhos são idênticas, ou seja, não existem restrições e é possível que o adversário percorra quaisquer uma das barreiras até o alvo.

O total parcial de caminhos é dado pelo produto dos caminhos em cada nível, deste modo, a possiblidade de caminhos pela frente, por exemplo, é o resultado da Equação (8), como foi apresentado na Tabela 15.

$$6 \cdot 1 \cdot 6 \cdot \ 1 \cdot 3 \cdot 3 = 324 \tag{8}$$

Desta forma, o número total de formas possíveis de invasão consiste na soma de cada um dos totais parciais (324 + 108 + 108 + 54), que resulta em 594.

6.3 Análise dos resultados

6.3.1 Análise da Probabilidade de Interrupção (P_I)

Os resultados das simulações para a Probabilidade de Interrupção (P_I) nos diferentes cenários e caminhos modelados no Diagrama de Sequência do Adversário (DSA) serão organizados e apresentados em ordem crescente de efetividade. Cada cenário considerado no DSA inclui uma análise detalhada das rotas possíveis que o adversário pode seguir, levando em conta as barreiras físicas, os tipos de sensores e as respectivas probabilidades de detecção. Além disso, será avaliado o impacto do tempo de resposta da força de reação para os casos apresentados.

Ao variar o tempo de resposta da força de reação, é possível observar como ele afeta a probabilidade de sucesso ou falha na interrupção das ações do adversário. Cenários com tempos de resposta mais curtos tendem a aumentar a eficiência da defesa, resultando em maiores probabilidades de interrupção. Por outro lado, tempos de resposta mais longos podem permitir ao adversário avançar por barreiras mais facilmente, reduzindo a eficácia da interrupção.

Esses resultados obtidos a partir da metodologia EASI (GARCIA, 2008), gerou a P_I para cada uma das possibilidades de caminhos para invasão, com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes tempos de resposta da força de reação e determinar que cenários oferecem maior proteção contra uma tentativa de intrusão.

As tabelas e códigos apresentados em (GARCIA, 2008), foram ligeiramente modificados para se adaptarem aos cenários postulados da BNH. Um extrato do programa EASI, desenvolvido em Microsoft Excel®, utilizado para o cálculo de P_I pode ser visualizado na Figura 15.

XL Easi_BNH_v1.0.xlsm - Excel

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibir | Desenvolvedor | Acrobat | Power Pivot | O que você deseja fazer...

C2 | Estimate of Adversary Sequence Interruption (EASI)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2–4			Estimate of Adversary Sequence Interruption (EASI)		Probability of Guard Communication		Response Mean	Force Time(in Seconds) Standard Deviation
5					0,95		416,00	83,20
6								
7				Delays (in Seconds):				
8	SIGLA	Task	Description	sensor associado	P(Detection)	Location	Mean	Standard Deviation
9	POVE-1	1	Penetrar portão de veículos	Múltiplos sensores	0,9	B	12	2
10	CAFR	2	Caminhar do cercado da área externa (frontal) para o cercado	Múltiplos sensores	0,9	B	128	32
11	P1AP-1	3	Penetrar porta P1 do CME	Múltiplos sensores	0,9	B	12	25
12	CAAP	4	caminhar do cercado do CME para o prédio	Câmera de vídeo	0,5	B	12	3
13	P3PR-1	5	penetrar porta P3 do prédio do CME	Múltiplos sensores	0,75	B	12	25
14	PASC	6	explodir parede da sala controlada	Câmera de vídeo	0,5	M	120	30
15	COFO	7	Retornar para o ponto de origem da invasão	Câmera de vídeo	0,5	B	126	31,5
21								
22			Probability of Interruption:		0,48854956			
23								

Figura 15 – Exemplo de Probabilidade de Interrupção para um caminho da BNH (adaptado de (GARCIA, 2008))

A Figura 15 mostra o caminho utilizado pelo adversário na coluna A: POVE-1→ CAFR→ P1AP-1→ CAAP→ P3PR-1→ PASC→ COFO. Ela apresenta também a sequência da tarefa, descrição da ação, sensor associado àquela barreira, probabilidade de detecção do mesmo, tempo médio do atraso e seu respectivo desvio padrão. Outros dados de entrada visíveis são a probabilidade de comunicação e o tempo de resposta da Força de Reação. O programa apresenta como saída o valor único de P_I para o caminho analisado.

Um código utilizando o *Microsoft Visual Basic*® foi escrito para automatizar e acelerar o registro dos valores de P_I para cada um dos caminhos do DSA. Sinteticamente, o código gera os 7 vetores da Figura 14, com seus respectivos elementos e os insere em cada uma das posições da coluna A (A9 até a A15) (Figura 15), levando em consideração as restrições geográficas da planta da BNH (Figura 14), que gera 594 combinações de modos de invasão diferentes considerando barreiras e as ferramentas usadas para vencê-las. Os argumentos das colunas "C" até a "H" são preenchidos utilizando associações lógicas da Tabela 14, ou seja, toda vez que é inserido uma sigla nos endereços (A9 até A15), são também preenchidas automaticamente as colunas adjacentes à direita, trazendo

as informações já constantes (Tabela 14). O código escrito para cálculo dos caminhos múltiplos está detalhado no Anexo A.

O programa apresenta como resultados de saída os seguintes parâmetros:

- Número total de caminhos possíveis. Para o DSA apresentado este número corresponde a um valor igual a 594;
- O número do caminho: 1 até o 594;
- PI de cada caminho; e
- Sequência do caminho, desde a entrada até a saída do invasor. Exemplo: POVE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO.

A partir dos dados de saídas é possível traçar curvas de dispersão e histogramas, para que os dados sejam mais facilmente visualizados e, posterior cálculo da eficácia da SPF. Essas representações gráficas auxiliam na identificação de padrões e na análise da distribuição dos resultados, tornando o processo de interpretação mais claro e objetivo.

O Sistema de Proteção Física será avaliado postulando-se cenários de invasão, nos quais serão simuladas variações no tempo de resposta da Força de Reação e aprimoramentos nas barreiras físicas. Essas alterações visam validar a eficácia do SPF, considerando diferentes situações de ataque. A análise dessas variáveis proporcionará uma compreensão mais profunda dos impactos que o tempo de resposta e o fortalecimento das barreiras têm no desempenho do sistema de segurança, permitindo a identificação de potenciais vulnerabilidades e melhorias necessárias em diversos cenários de risco.

6.3.1.1 Cenário 1: Deslocamento a pé da Força de Reação

Os seguintes parâmetros de entrada foram considerados para o cenário 1:

1. As barreiras, ações, medidas de proteção e tempos de atraso são idênticos aos definidos na Tabela 14;
2. Deslocamento a pé da FR do prédio da segurança até a área do CME, logo prevalecem os dados referentes à situação 1 da Tabela 4; e

A partir das condições de entrada, obtiveram-se os resultados de saída conforme está apresentado na Figura 14, cujos dados do gráfico estão no formato de dispersão que ilustram a relação entre o número de caminhos possíveis que o adversário pode seguir e a P_I de cada cenário. No eixo das abscissas, está representado o número de caminhos, que

correspondem às diferentes rotas possíveis avaliadas no DSA. No eixo das ordenadas, encontra-se a probabilidade de interrupção, que indica a chance de a invasão ser detectada e interrompida pelo SPF. Os pontos no gráfico representam cada combinação de caminho e sua respectiva P_I, permitindo uma comparação clara entre cenários e identificando padrões ou tendências em diferentes condições de segurança.

Observa-se também que os pontos estão bem dispersos e ocupando a parte inferior do gráfico de maneira significativa, inclusive apresentando P_I próximas de zero, o que demostra que essa configuração de cenário não é eficaz para a BNH.

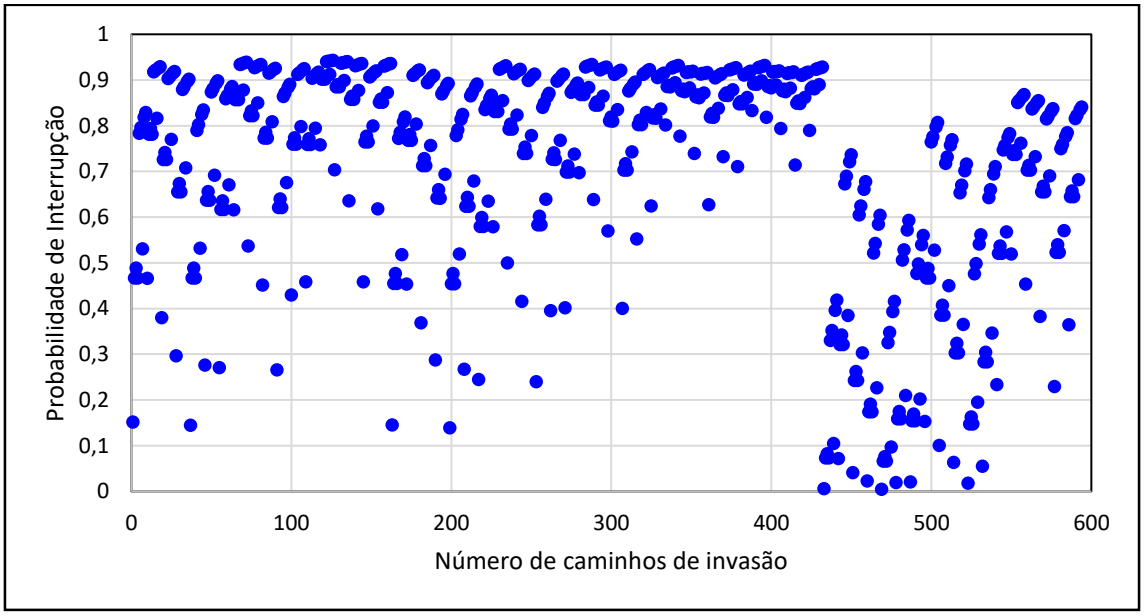


Figura 16 – Probabilidade de interrupção dos caminhos do adversário – cenário 1

A Figura 17 é um histograma no qual está apresentada a frequência de ocorrência dos resultados de P_I agrupados em intervalos de 1 décimo (para P_I superiores a 0,5), ou seja essa visualização permite quantificar os caminhos mais eficazes para esse cenário (P_I mais próximas da unidade).

Essa forma de exibição facilita a análise da eficácia de cada rota de defesa, mostrando como a probabilidade de interrupção varia conforme a complexidade dos caminhos e o tempo de resposta da força de reação.

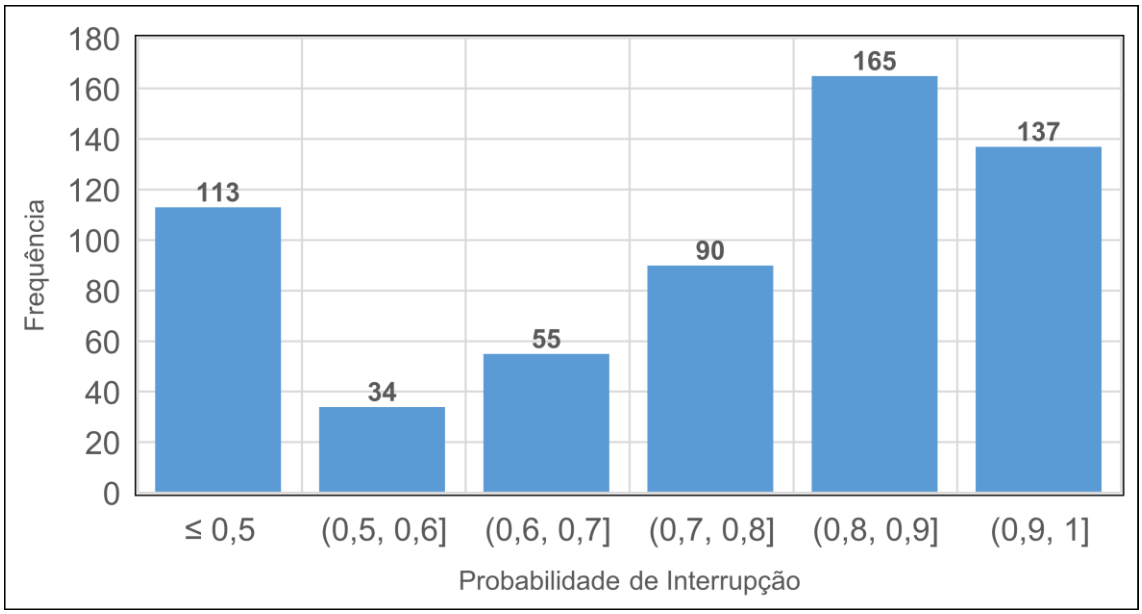


Figura 17 – Frequência das Probabilidades de Interrupção - cenário 1

Uma vez que as P_I resultaram em valores extremamente baixos (alguns próximos de zero) e longe do objetivo de projeto do SPF, conclui-se que essa configuração de deslocamento da FR a pé não é eficaz. O tempo de resposta prolongado impactou negativamente a capacidade da FR de interceptar o adversário antes que ele superasse as barreiras críticas. Para atingir os objetivos de segurança desejados, é necessária uma maior celeridade no deslocamento da equipe de reação. Algumas medidas como o uso de veículos motorizados ou a implantação de rotas de acesso mais rápidas devem ser consideradas, visando reduzir significativamente o tempo de resposta e, consequentemente, aumentar as chances de interrupção em cenários futuros, alinhando o desempenho operacional da FR aos requisitos de segurança esperados pelo SPF.

6.3.1.2 Cenário 2: Deslocamento da Força de Reação utilizando viatura + deslocamento a pé

Os seguintes parâmetros de entrada foram considerados para o cenário 2:

1. As barreiras, ações, medidas de proteção e tempos de atraso são iguais aos definidos na Tabela 8 (idêntico ao cenário 1);

2. Deslocamento da FR por meio da viatura do prédio da segurança até a área do CME, e em seguida, deslocamento a pé da FR pelo perímetro do CME, logo prevalecem os dados referentes à situação 3 da Tabela 5.

De forma análoga ao cenário 1, o resultado para as condições supracitadas estão representadas por meio da Figura 18 e Figura 19.

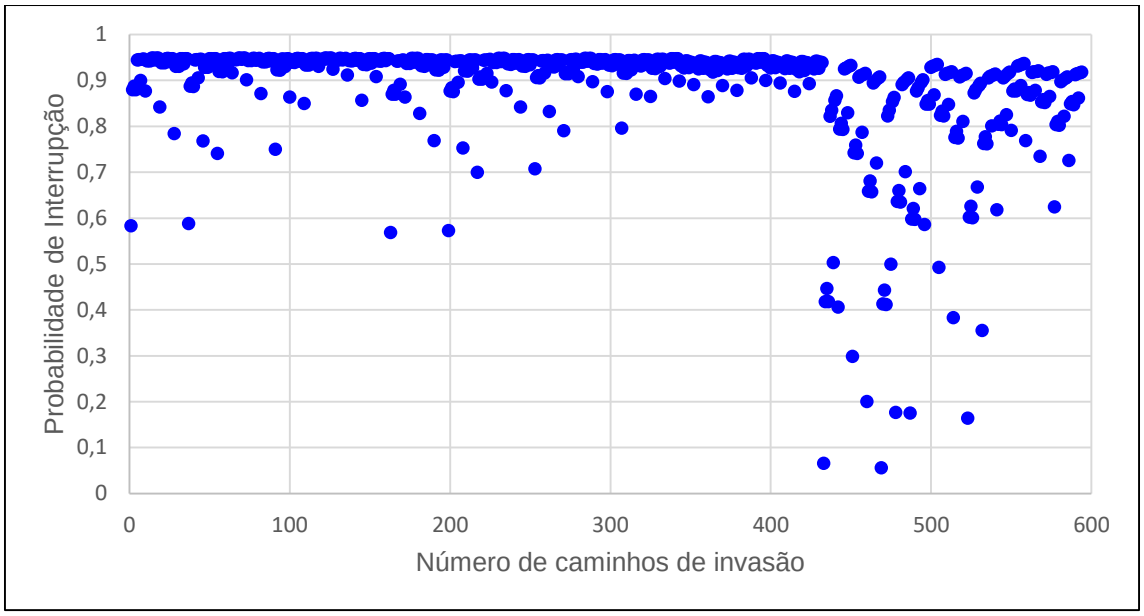


Figura 18 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 2

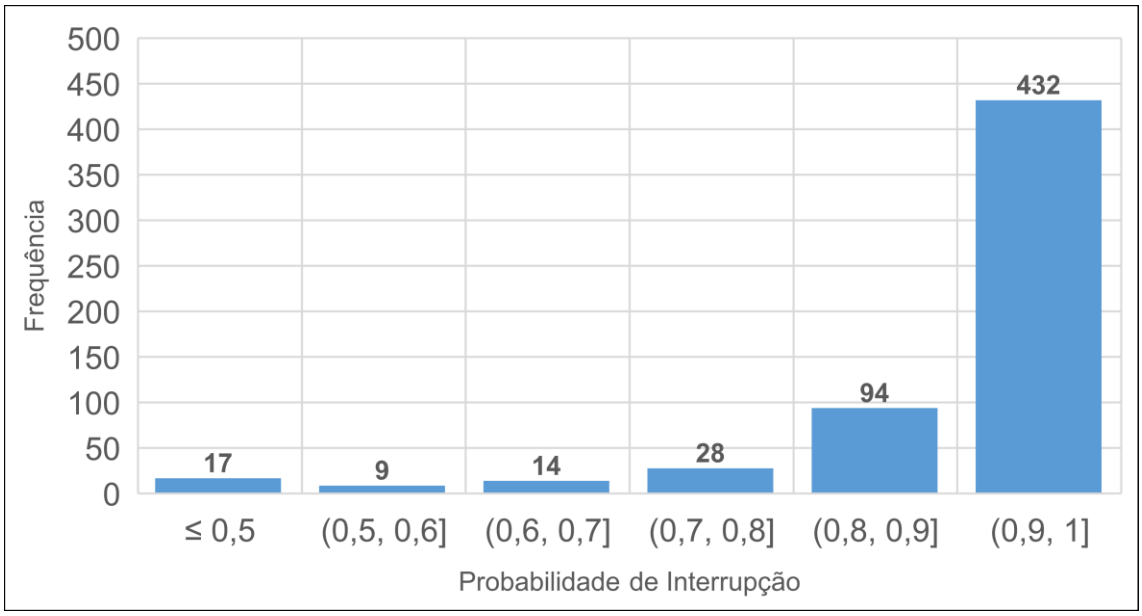


Figura 19 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 2

A Figura 20 amplifica a visualização entre os resultados de P_I compreendidos entre 0,9 e 0,96 para maior detalhamento e observação da faixa com maior concentração de pontos, 432 em sua totalidade.

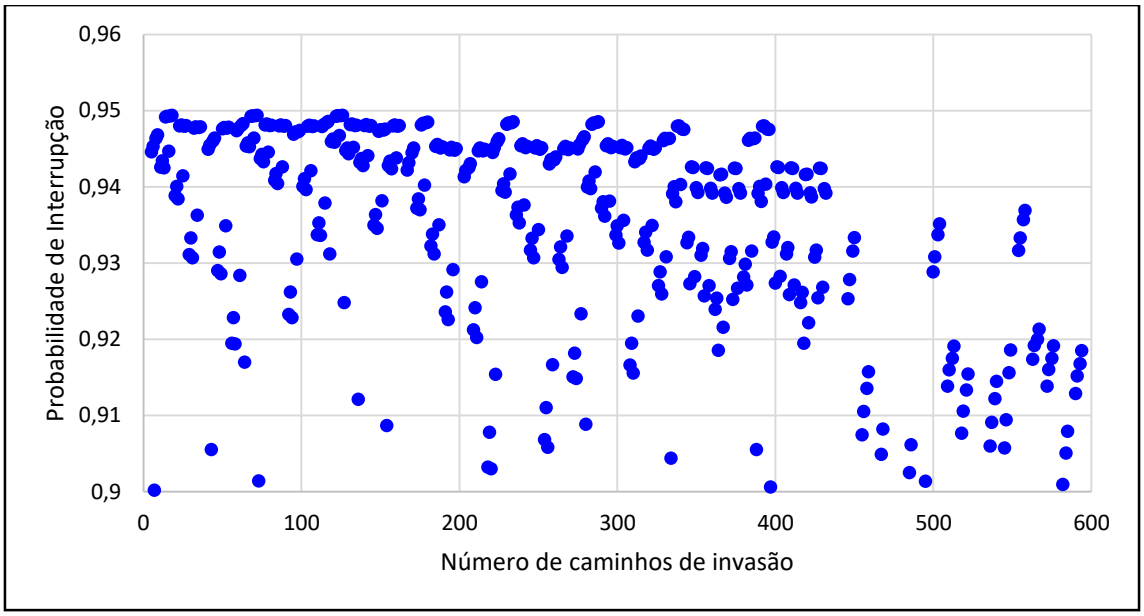


Figura 20 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 2

Nota-se previamente que os resultados demonstram um impacto significativo na melhoria nas P_I de uma invasão após a introdução de uma viatura dedicada à FR. A inclusão deste recurso material reduziu significativamente o tempo de resposta da equipe até o local da intrusão (CME), permitindo uma ação mais rápida e eficiente.

Antes dessa mudança, os dados indicavam que o tempo de resposta era um dos principais limitadores na eficácia da interrupção de ações adversas. Com a equipe de segurança tendo que percorrer distâncias a pé, as probabilidades de interrupção no momento crítico da invasão eram consideravelmente menores. No entanto, com a viatura dedicada, o tempo necessário para chegar ao local foi drasticamente reduzido, resultando em uma resposta mais rápida e coordenada.

Após a introdução do novo recurso, os gráficos demonstraram um aumento expressivo nas probabilidades de interrupção bem-sucedidas e objeto-alvo, 72,7% dos casos estão acima de 0,9, evidenciando a importância da celeridade no deslocamento da força de reação. Essa melhoria não só reforçou a capacidade da FR de interromper ameaças em fases iniciais, como também aumentou a segurança geral da instalação. Com a redução do tempo de resposta, a equipe conseguiu ganhar minutos preciosos, o que se traduziu em maior controle sobre a situação e uma chance significativamente maior de deter os invasores antes que pudessem alcançar áreas críticas da instalação.

No entanto, o histograma da Tabela 18 revela que ainda persistem rotas altamente vulneráveis, com 17 caminhos apresentando uma P_I inferior a 50%. Esses pontos críticos representam falhas significativas na segurança e necessitam de atenção imediata.

Para mitigar essas vulnerabilidades, é fundamental fortalecer as barreiras físicas da BNH aumentando a resistência às invasões e dificultando o avanço do adversário. Os cenários subsequentes apresentarão a substituição das barreiras atuais por outras mais resistentes, e por consequência, o aumento do atraso de transposição do adversário pelas mesmas.

6.3.1.3 Cenário 3: Substituição da porta 1 da área protegida (P1AP)

O cenário 3, e os subsequentes, têm como objetivo substituir algumas barreiras físicas com o propósito de reforçá-las e torná-las mais robustas, ocasionando o aumento do atraso de um eventual adversário. Os seguintes parâmetros foram adotados para o desenvolvimento do cenário proposto:

1. As barreiras, ações, medidas de proteção e tempos de atraso são iguais aos definidos na Tabela 8, excetuando a porta 1 da área protegida (P1AP), que teve uma modificação implantada conforme descrito a seguir:

1.1. A substituição da Porta 1 da área protegida (pedestre). A porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6mm foi substituída por uma porta de metal reforçado. Como consequência, o tempo de atraso foi aumentado em 10 vezes para a ferramenta pé de cabra e mantido o mesmo para o explosivo.

2. Não houve alteração nas medidas de proteção (sensores, câmeras de vigilância, crachás), somente reforço da barreira física descrito no item anterior.

Desta forma, a alteração descrita na Tabela 16 será utilizada para avaliação do SPF.

Tabela 16 – Parâmetros para a P1AP referentes ao cenário 3

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Tempo de atraso Td (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
P1AP-1	Porta 1 da área protegida (pedestre)	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P1 do CME	120	25	Pé-de-cabra
P1AP-2			Explodir porta P1 do CME	114	28,5	Explosivo

Esses critérios visam garantir que a nova estrutura ofereça maior resistência e segurança, aumentando o tempo de atraso do adversário, e consequentemente elevando o nível de proteção das instalações.

Os resultados para as condições do cenário 3 estão representados na Figura 21 e na Figura 22.

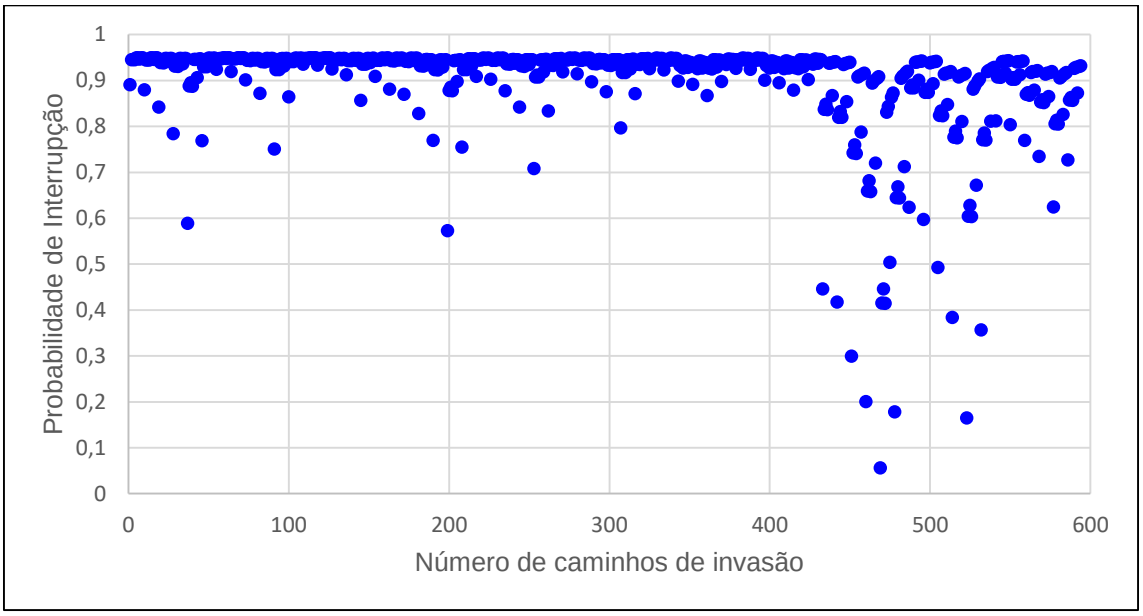


Figura 21 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 3

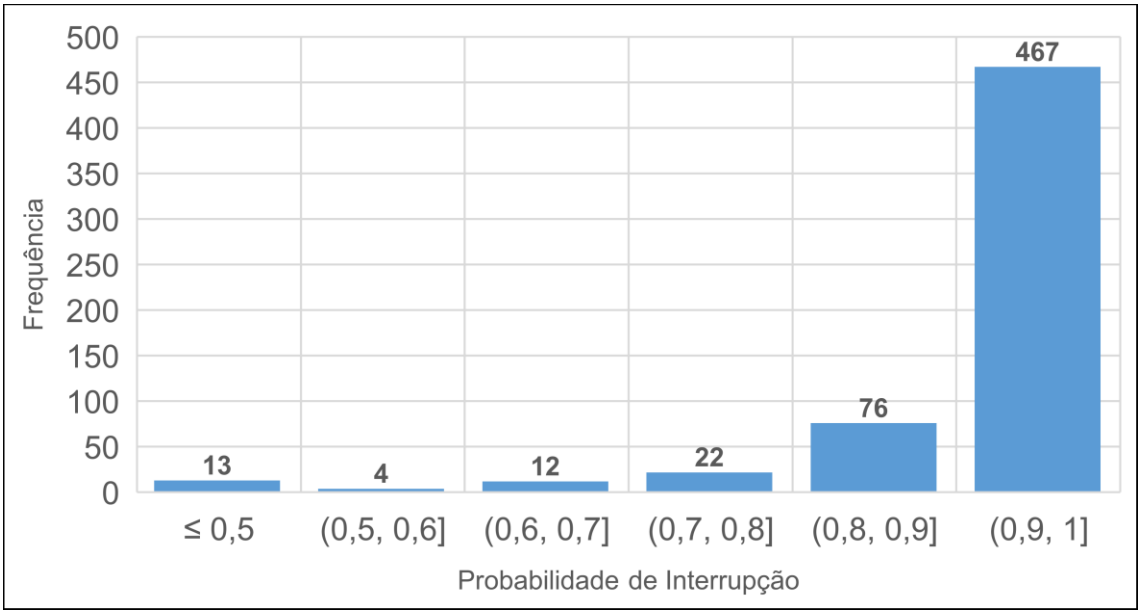


Figura 22 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 3

A Figura 23 amplifica a visualização entre os resultados de P_I compreendidos entre 0,9 e 0,96 para maior detalhamento e observação da faixa com maior concentração de pontos, 467 em sua totalidade.

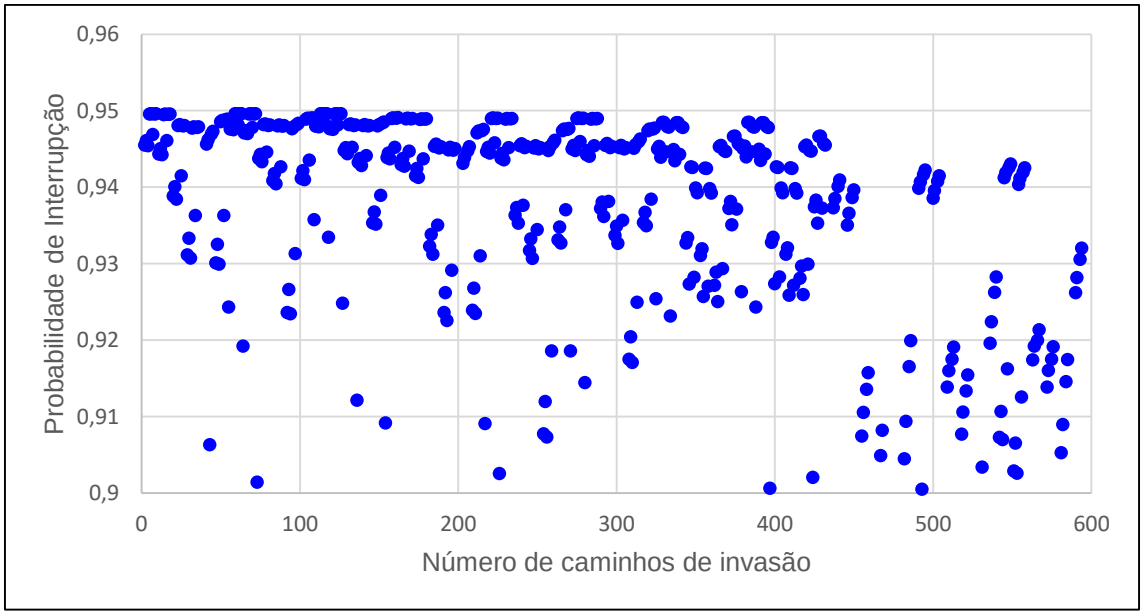


Figura 23 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 3

Em conformidade com os resultados apresentados, a substituição da porta 1 da área protegida (P1AP) trouxe uma melhora significativa para o SPF da BNH. A alteração do tipo de porta aumentou o tempo de atraso do adversário para a ferramenta pé de cabra em 10 vezes, e contribuiu para a elevação do índice de P_I do adversário.

Após a alteração realizada no cenário 3, os gráficos expuseram um aumento considerável nas probabilidades de interrupção alvo desse estudo, 78,6% das rotas são superiores à P_I de 0,9, mostrando que as barreiras devem ser resistentes e robustas, para primeiramente dissuadir os adversários, e em caso de invasão, retardar ao máximo suas ações de transpô-las para que a FR possa combatê-los em tempo suficiente.

No entanto, somente a substituição de uma porta não foi suficiente para eliminar os caminhos mais vulneráveis, ainda existem 13 rotas com P_I extremamente baixas para um SPF de uma instalação nuclear, conforme evidenciado no histograma da Figura 22. Esses caminhos críticos representam falhas que serão mitigados pelo fortalecimento das demais barreiras físicas da BNH.

6.3.1.4 Cenário 4: Substituição da porta 1 da área protegida (P1AP) e substituição da porta 3 do prédio da área protegida (P3PR)

No cenário 4 realiza-se um aprimoramento do cenário 3. A partir da configuração previamente descrita no cenário 3, será feita a substituição de uma porta por outra mais resistente com o intuito de aumentar o atraso oferecido por esta barreira. Os parâmetros a seguir serão utilizados no desenvolvimento do cenário previsto para esse capítulo.

1. As barreiras, ações, medidas de proteção e tempos de atraso são iguais aos definidos na Tabela 8, excetuando as seguintes barreiras físicas:

1.1. A substituição da Porta 1 da área protegida de pedestre (P1AP). A porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6 mm foi substituída por uma porta de metal reforçado (idêntico ao cenário 3);

1.2. A Substituição da Porta 3 do prédio da área protegida (P3PR-1). A porta de chapa metálica padrão industrial - 1,6 mm foi substituída pela porta de metal reforçado (idêntica à P1AP). E de maneira similar, aumentou em 10 vezes o tempo de atraso para a ferramenta pé de cabra e manteve-se o mesmo tempo para o explosivo.

2. Não houve alteração nas medidas de proteção (sensores, câmeras de vigilância, crachás), somente reforço das barreiras físicas descritos no item anterior.

As alterações supracitadas foram atualizadas na Tabela 17 e serão utilizadas para verificar a eficácia do SPF.

Tabela 17 – Parâmetros para a P1AP e P3PR referentes ao cenário 4

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Tempo de atraso Td (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
P1AP-1	Porta 1 da área protegida (pedestre)	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P1 do CME	120	25	Pé-de-cabra
P1AP-2			Explodir porta P1 do CME	114	28,5	Explosivo
P3PR-1	Porta 3 do prédio da área protegida	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P3 do prédio do CME	120	25	Pé-de-cabra
P3PR-1			Explodir porta P3 do prédio do CME	114	28,5	Explosivo

Os resultados para as condições do cenário 4 estão representados na Figura 24 e na Figura 25.

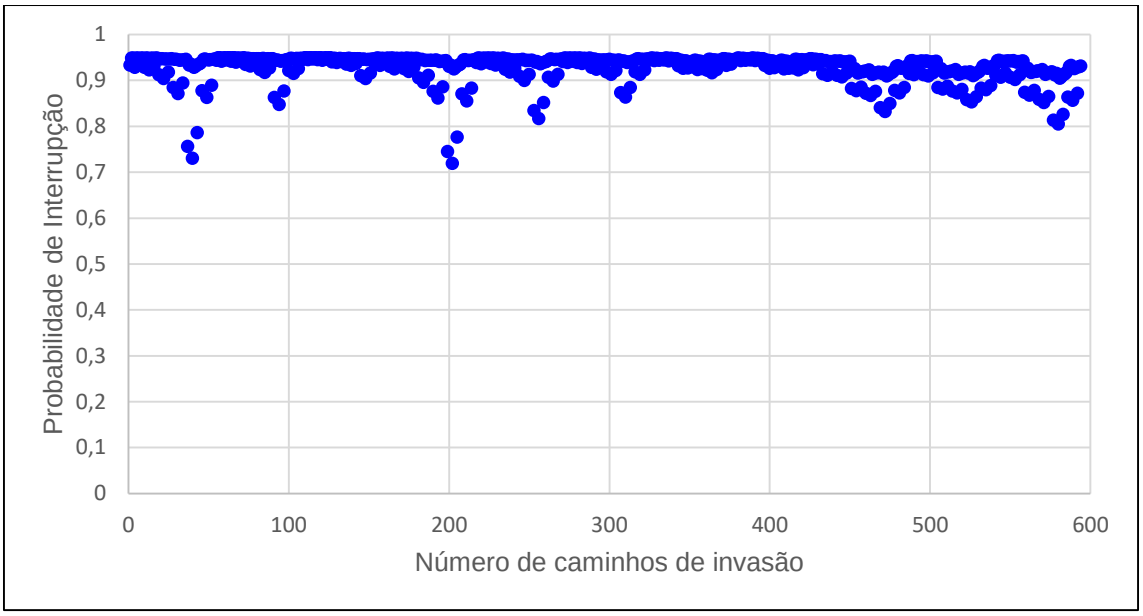


Figura 24 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 4

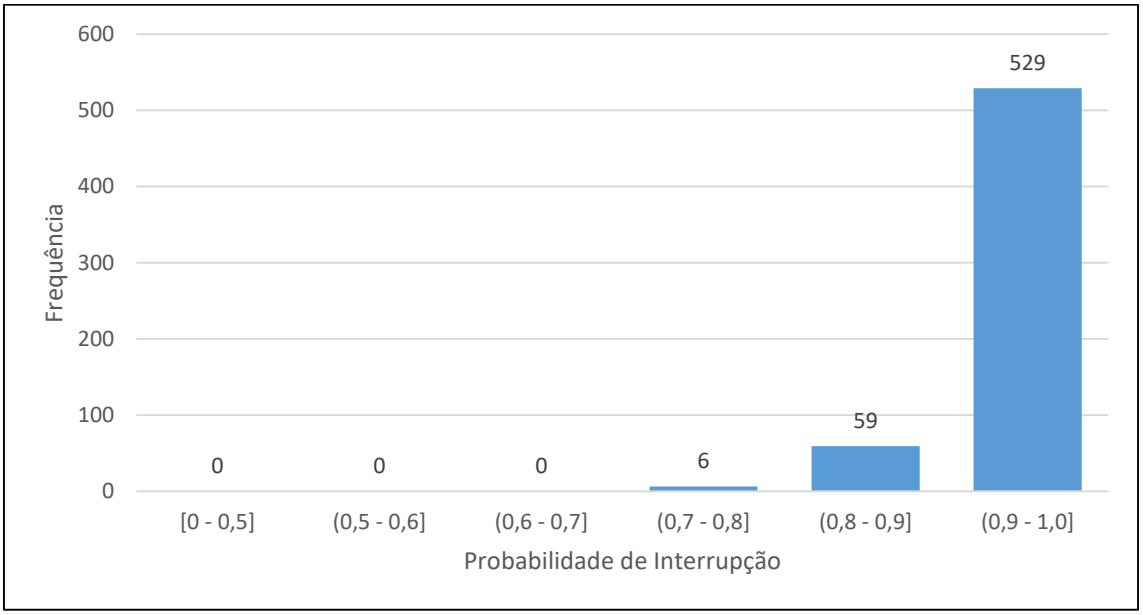


Figura 25 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 4

A Figura 26 amplifica a visualização entre os resultados de P_I compreendidos entre 0,9 e 0,96 para um maior detalhamento e observação da faixa com maior concentração de pontos, 529 em sua totalidade.

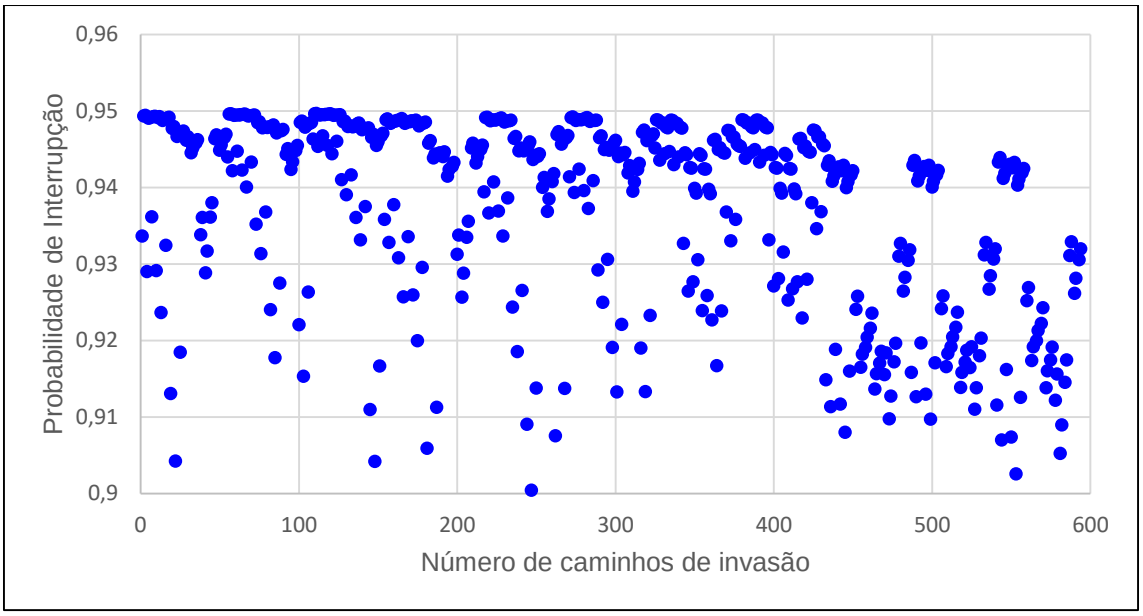


Figura 26 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 4

Os resultados demonstraram que a substituição da porta 3 do prédio da área protegida (P3PR), e também da porta 1 da área protegida (P1AP), por portas com material mais resistente, gerou o aumento no tempo de atraso das barreiras físicas mencionadas e contribuiu para o aumento do índice de P_I do adversário.

Após as alterações realizadas no cenário 4, os gráficos mostraram um aumento considerável nas probabilidades de interrupção alvo desse estudo, 89,1% das rotas possuem P_I superiores a 0,9.

6.3.1.5 Cenário 5: Substituição da porta 1 da área protegida (P1AP), substituição da porta 3 do prédio da área protegida (P3PR) e substituição da porta 4 da sala controlada (P4SC)

Intuitivamente, quanto mais as melhorias nas barreiras físicas, maior será o tempo de atraso imposto ao adversário, o que eleva a probabilidade de interrupção da ação. Como resultado, o Sistema de Proteção Física (SPF) torna-se mais eficiente, garantindo uma defesa mais robusta e aumentando as chances de interceptação de ameaças antes que alcancem áreas críticas.

O cenário 5 da BNH é um aperfeiçoamento do cenário 4, que envolve a substituição de três portas por outras mais resistentes, visando aprimorar a segurança das instalações. Os parâmetros listados serão adotados para o desenvolvimento do cenário previsto nesta seção.

1. As barreiras, ações, medidas de proteção e tempos de atraso são iguais aos definidos na Tabela 8, excetuando as seguintes barreiras físicas:

1.1. Substituição da Porta 1 da área protegida de pedestre (P1AP);

1.2. Substituição da Porta 3 do prédio da área protegida (P3PR-1); e

1.3. Substituição da Porta 4 da sala controlada (P4SC).

2. Sem alterações nas medidas de proteção (sensores, câmeras de vigilância, crachás), somente reforço das barreiras físicas descritos no item anterior.

As alterações supracitadas foram atualizadas na Tabela 18 e serão utilizadas para verificar a eficácia do SPF.

Tabela 18 – Parâmetros para a P1AP, P3PR e P4SC referentes ao cenário 5

Sigla	Barreira	Característica da barreira	Ação	Tempo de atraso Td (s)	Desvio padrão	Ferramenta utilizada para vencer a barreira
P1AP-1	Porta 1 da área protegida (pedestre)	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P1 do CME	120	25	Pé-de-cabra
P1AP-2			Explodir porta P1 do CME	114	28,5	Explosivo
P3PR-1	Porta 3 do prédio da área protegida	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P3 do prédio do CME	120	25	Pé-de-cabra
P3PR-1			Explodir porta P3 do prédio do CME	114	28,5	Explosivo
P4SC-1	Porta 4 da Sala Controlada	Porta de metal reforçado	Penetrar porta P4 da sala controlada	120	25	Pé-de-cabra
P4SC-2			Explodir porta P4 da sala controlada	114	28,5	Explosivo

Os resultados para as condições do cenário 5 estão representados na Figura 27 e Figura 28.

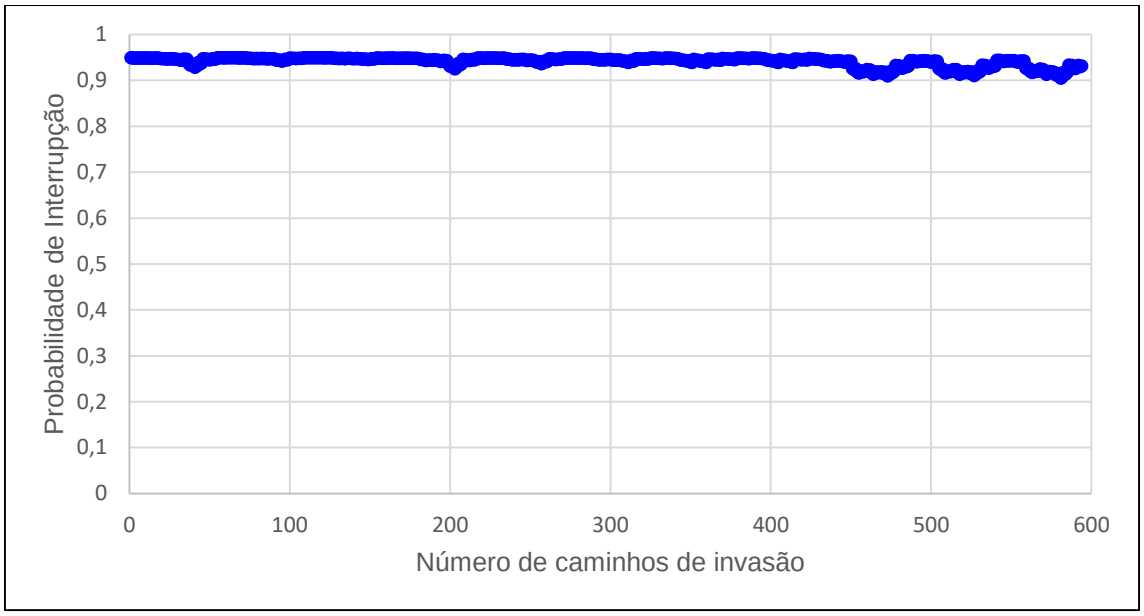


Figura 27 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário – cenário 5

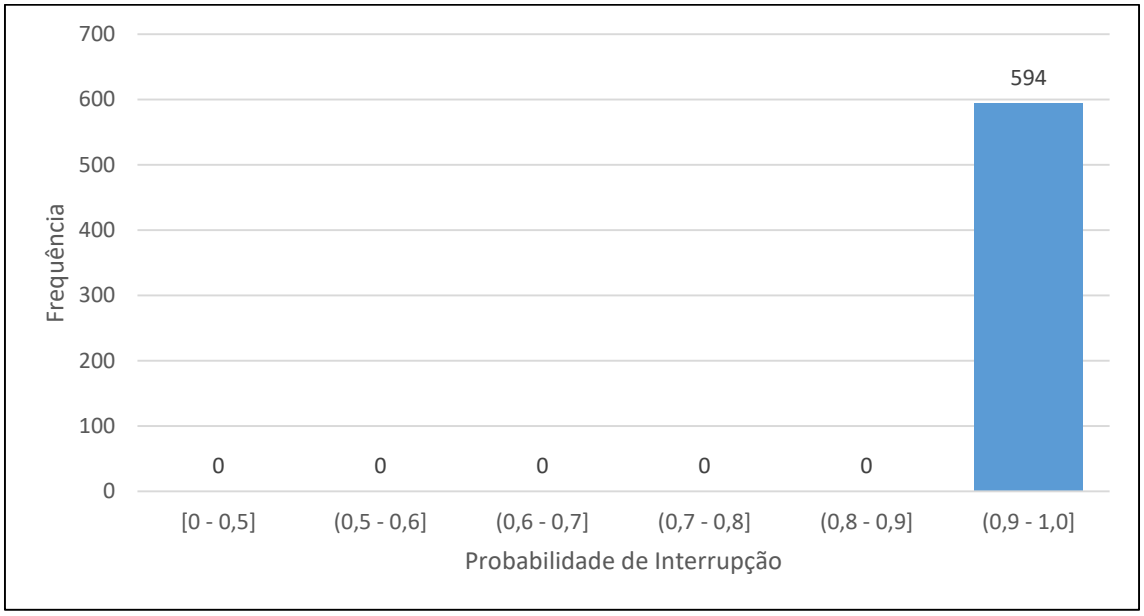


Figura 28 – Frequência das Probabilidades de Interrupção – cenário 5

A Figura 29 e a Figura 30 amplificam a visualização entre os resultados de P_I compreendidos entre 0,9 e 0,95 para um maior detalhamento e observação da concentração de todos os pontos nessa faixa.

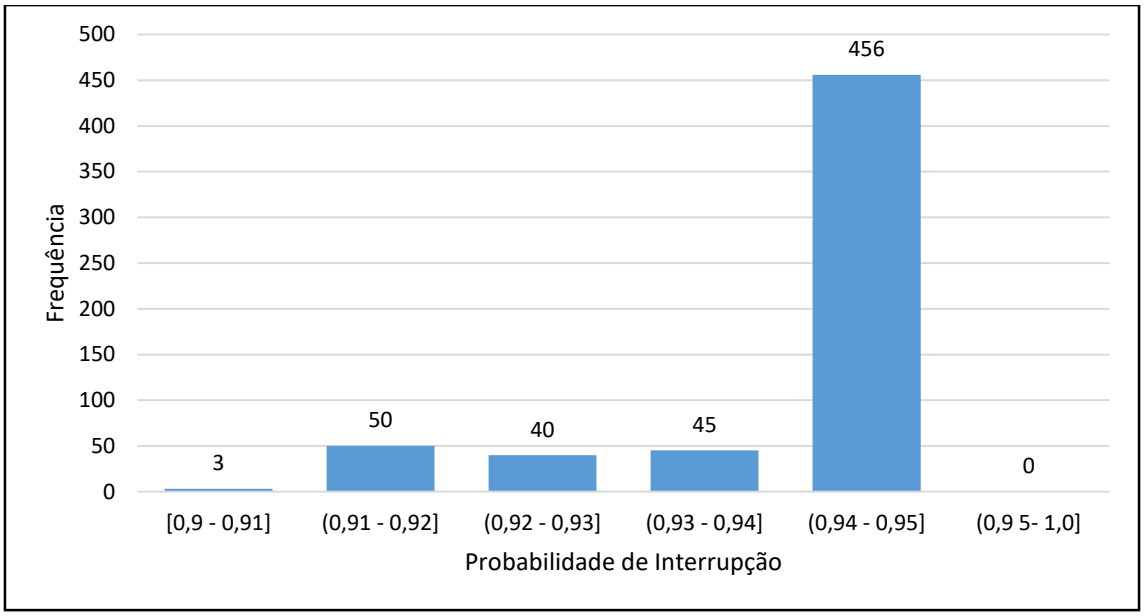


Figura 29 – Frequência das Probabilidades de Interrupção compreendidos entre 0,9 e 1 – cenário 5

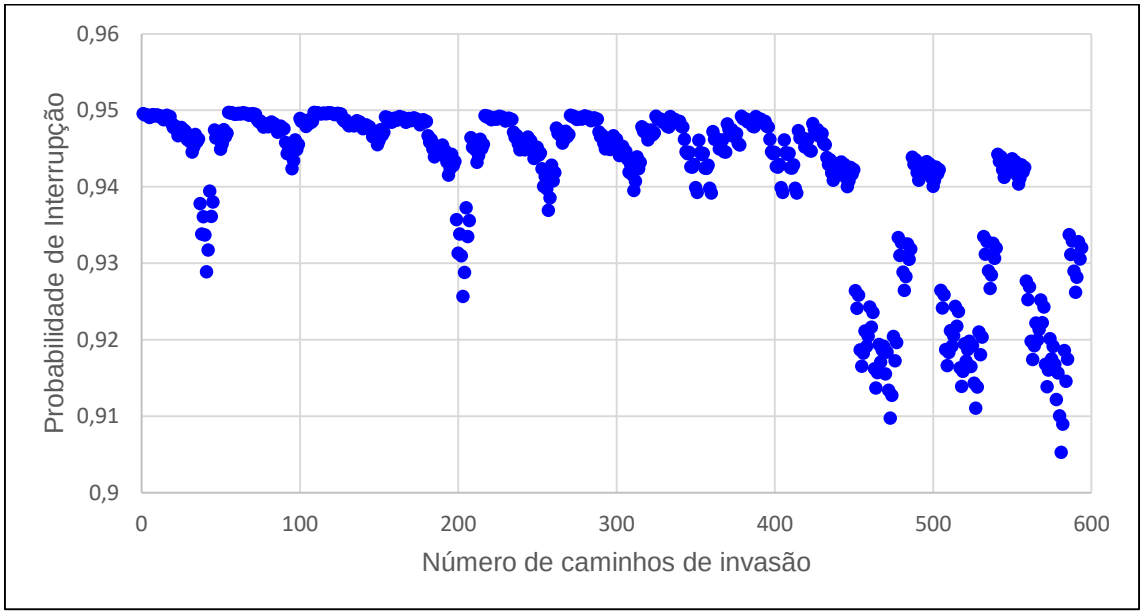


Figura 30 – Probabilidade de Interrupção dos caminhos do adversário no intervalo entre 0,90 e 0,96 – cenário 5

O menor valor de P_I, para o cenário 5, é o valor listado na equação (9).

$$P_I = 0{,}905 \tag{9}$$

A Tabela 19 apresenta um compilado das P_I para cada um dos cenários simulados subdivido em intervalos decimais. É notório o aumento na P_I à medida em que se reduz o tempo de resposta da FR (cenário 2) e substituem-se as barreiras físicas iniciais por outras mais resistentes (cenários 3, 4 e 5).

Tabela 19 – Compilação da frequência da Probabilidade de Interrupção por cenário

	Frequência da Probabilidade de Interrupção				
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
$P_I \leq 0{,}5$	113	17	13	0	0
$0{,}5 < P_I \leq 0{,}6$	34	9	4	0	0
$0{,}6 < P_I \leq 0{,}7$	55	14	12	0	0
$0{,}7 < P_I \leq 0{,}8$	90	28	22	6	0
$0{,}8 < P_I \leq 0{,}9$	165	94	76	59	0
$0{,}9 < P_I \leq 1{,}0$	137	432	467	529	594

A substituição de três portas (P1AP, P3PR e P4SC) por modelos mais reforçados no cenário 5 da BNH resultou em uma melhora expressiva nas probabilidades de interrupção das rotas de invasão. Após a implantação das novas portas, os gráficos indicaram que todas as P_I excederam 0,9, um aumento significativo em comparação com o cenário anterior. Esse avanço se deve à dilatação do tempo de atraso imposto pelas novas barreiras físicas, que dificultam o avanço de possíveis intrusos, dando à FR mais tempo para agir. A melhoria no desempenho das barreiras físicas reflete diretamente na elevação da capacidade de defesa do sistema.

Essa elevação na robustez do SPF indica que os ajustes feitos nas barreiras físicas foram eficazes. Ao aumentar o tempo de resposta disponível para a força de reação e dificultar o acesso do adversário, o nível de proteção das instalações foi significativamente ampliado. Com 100% das rotas de invasão agora apresentando PI superiores a 0,9, o SPF se mostra mais preparado para neutralizar ameaças, garantindo mais segurança e reduzindo as vulnerabilidades em pontos críticos da instalação. Esses resultados corroboram a importância de investimentos em barreiras físicas robustas para otimizar a eficácia de sistemas de proteção em ambientes de alta sensibilidade, como as instalações nucleares.

6.3.2 Análise da Probabilidade de Neutralização (P_N)

Conforme previamente exposto na seção 3.3, como parte integrante da definição da eficácia do SPF, outro fator relevante é a Probabilidade de Neutralização (P_N), que se refere à capacidade do SPF de impedir que uma ameaça adversária atinja seus objetivos críticos por meio de suas barreiras físicas, sensores de detecção e principalmente pela resposta da FR.

Inúmeros cenários podem ser propostos, o estudo versará sobre exemplos plausíveis levando-se em consideração a Ameaça Base de Projeto detalhada no capítulo 4.3 para o estabelecimento das premissas adversárias associadas às características da BNH. A Tabela 20 apresenta as informações principais do adversário selecionado para análise de neutralização.

Tabela 20 – Características do adversário

Parâmetro	Especificação
Adversário	Criminoso
Quantidade	5
Armamento	Fuzil, pistola
Explosivo	Sim
Ferramentas	Mecânicas e elétricas
Tempo do adversário	9:30 (min:seg)
	7:30 (min:seg)

O tempo do adversário para o cálculo da P_N será analisado em dois cenários considerados mais críticos, com base no SPF do cenário 5, que apresenta a configuração mais robusta (detalhada no capítulo 6.3.1.5).

Cenário A: Seleção do menor valor de P_I (pior caso) previamente obtido pela análise de multicaminhos, e verificação do tempo total do adversário para essa situação.

A Tabela 21 (extrato do Anexo B, para o cenário 5) indica o menor valor de P_I e o tempo do adversário correspondente, que aproximadamente é igual a 9:30 (nove minutos e trinta segundos), que equivale ao tempo total que o invasor demora para atravessar todas as barreiras físicas sem que haja a interrupção do mesmo, caracterizando

sucesso da missão e consequente furto de material nuclear. Ela também mostra o número do caminho, o valor de P_I e a sequência deste caminho com maior vulnerabilidade.

Tabela 21 – Tempo de adversário para o menor valor de PI para os caminhos do cenário 5

Nº do Caminho	P_I	Sequência	Tempo do adversário (s)	Tempo do adversário (min)	Tempo do adversário (min:seg)
581	0,905	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->CAFO	566,12	9,44	09:30

Cenário B: Seleção do menor tempo total do adversário, ou seja, o menor valor da soma de todas as tarefas para que a missão tenha sucesso e verificação do valor de P_I para essa situação.

A Tabela 22 indica o menor tempo do adversário, neste caso há duas sequências de caminho, e o valor de P_I correspondente a este tempo.

Tabela 22 – Menor tempo do adversário para os caminhos do cenário 5

Nº do Caminho	P_I	Sequência	Tempo do adversário (s)	Tempo do adversário (min)	Tempo do adversário (min:seg)
203	0,925	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->CAFO	448,2	7,47	07:25
41	0,929	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->CAFO	448,2	7,47	07:25

A dinâmica e organização da FR, definidas previamente na seção 5.3.3, é composta por 11 integrantes altamente treinados, equipados com fuzis (mesmo armamento que os adversários) que se deslocam até o local da área do CME por meio de viatura e percorrem o perímetro a pé. A BNH dispõe de torres de vigilância posicionadas ao redor de seu perímetro, e face a uma invasão, as sentinelas presentes poderão entrar em combate inicial até a chegada da FR.

O tempo de resposta da equipe de FR é o mesmo utilizado nos cenários 3, 4 e 5 no cálculo de P_I, o valor é igual a 287,2 s (Tabela 6), que é equivalente a 04:47 (quatro minutos e quarenta e sete segundos).

Mediante o exposto, obtêm-se os valores de P_N utilizando o programa de neutralização para ambos os cenários descritos. O resultado para ambos os casos foi idêntico conforme apresentado na equação (10) e visualizado na Figura 31e na Figura 32.

$$P_N = 0{,}996 \tag{10}$$

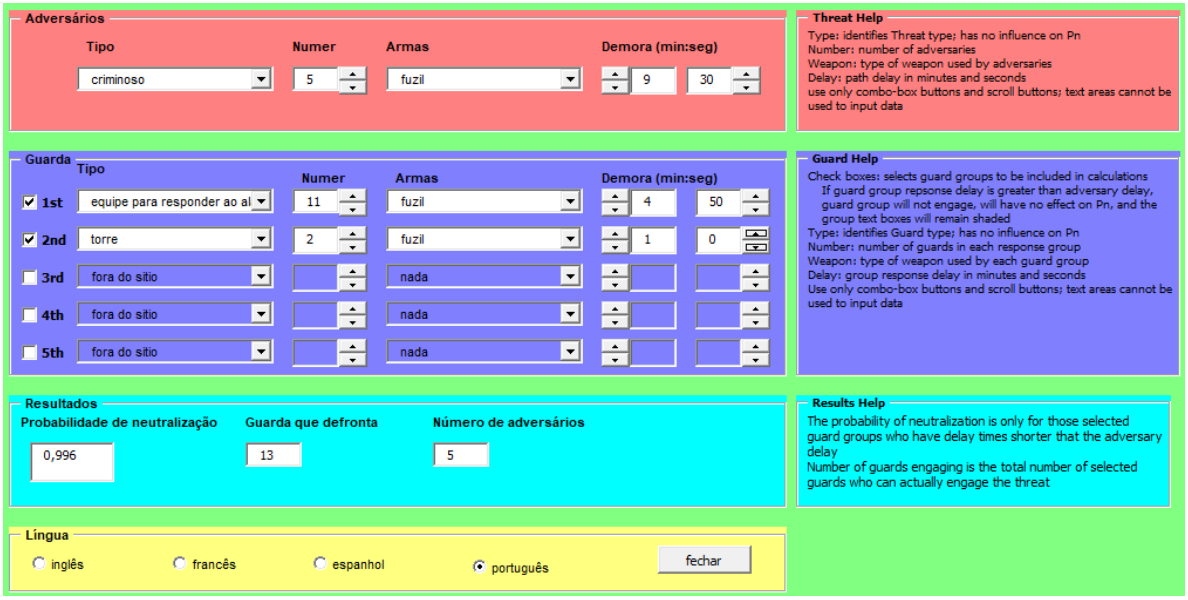


Figura 31 – Probabilidade de neutralização para o cenário A

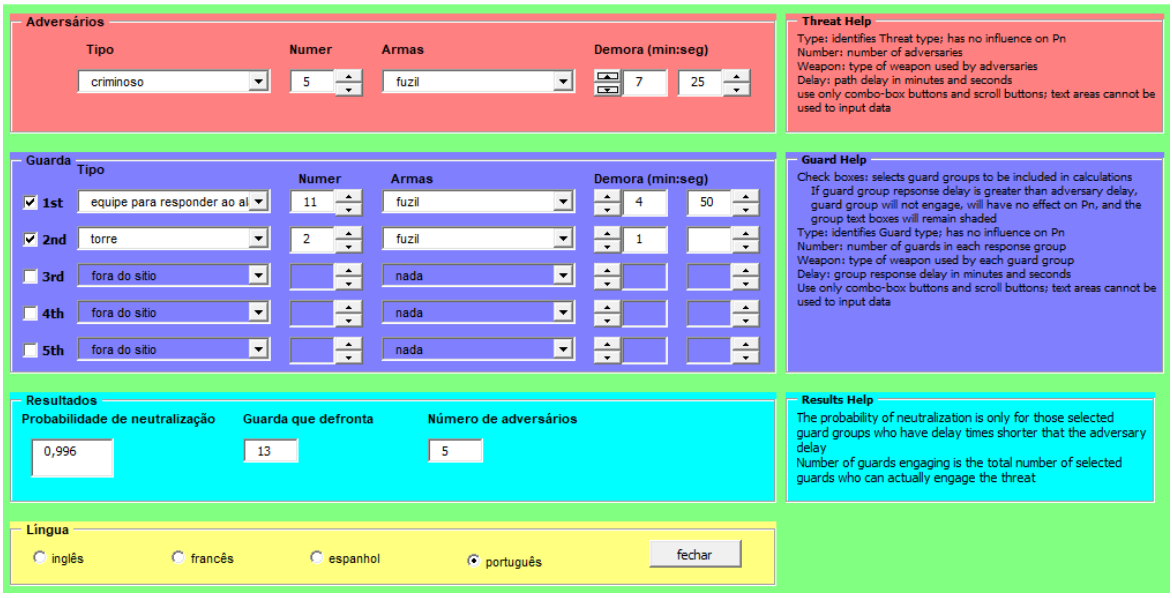


Figura 32 – Probabilidade de neutralização para o cenário B.

6.3.3 Estimativa de risco

A análise de risco é uma etapa fundamental para avaliar a segurança da BNH e compreender os potenciais impactos associados a eventos adversos. Nesta seção, a metodologia de avaliação de risco será detalhada e os resultados calculados para a BNH serão discutidos. Os dados e equações da seção 2.3.3 serão retomados para a estimativa do risco da BNH para o cenário específico de furto de material nuclear. A partir da equação (1), realiza-se o cálculo do risco, permitindo uma compreensão quantitativa do nível de segurança da instalação.

$$R = P_A * (1 - P_E) * C \tag{1}$$

1. **Probabilidade de ataque de um adversário (P_A)**

A frequência anual de ataque (P_A) é um parâmetro que representa a probabilidade de ocorrência de eventos adversos em instalações nucleares ao longo de um ano. Para a BNH, o valor adotado é o especificado na equação (11), (HAWILA, 2016).

$$P_A = 1 \cdot 10^{-3} \tag{11}$$

Esse valor equivale a um ataque a cada 1000 anos, refletindo uma estimativa de baixa probabilidade anual e amplamente aceito como referência para instalações com características similares à BNH.

2. **Probabilidade de sucesso do adversário $(\mathbf{1 - P_E})$**

A probabilidade de sucesso do adversário é o complemento da eficácia de um SPF. Assim, considerando o menor valor de P_I (equação (9)) e seu respectivo P_N (equação (10)), o cálculo do sucesso do adversário é obtido pela expressão apresentada na equação (14).

$$1 - P_E = 1 - P_I \cdot P_N \tag{12}$$

$$1 - P_E = 1 - 0{,}905 \cdot 0{,}996 \tag{13}$$

$$1 - P_E = 0{,}0986 \tag{14}$$

Esse resultado reflete uma alta probabilidade de eficácia do SPF da BNH.

3. Consequência (C)

A consequência reflete a severidade de um evento, já foi previamente determinada na seção 2.3.3. Seu resultado está expresso na equação (4), sendo igual a $C = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$.

A partir dos parâmetros calculados, é possível estimar o risco da instalação pelo produto das equações (11), (14) e (4), e seu resultado está apresentado na equação (16):

$$\mathrm{R} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0986 \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-3} \tag{15}$$

$$\mathrm{R} = 7{,}8896 \cdot 10^{-7} \tag{16}$$

Este valor pode ser interpretado que o risco de furto de material nuclear da BNH para as condições e consequências apresentadas corresponde a aproximadamente 8 casos em 10.000.000 anos, ou de forma simplificada, 1 caso em 1.250.000 anos.

A análise de risco realizada demonstra que a BNH possui um nível de segurança adequado e um risco extremamente baixo de eventos adversos significativos. Isso indica um comprometimento com a proteção física e a adoção de boas práticas no projeto e na operação da instalação.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho abordou aspectos referentes à segurança física de instalações nucleares (*security*), considerada um elemento essencial para a proteção e salvaguarda desses materiais. Um SPF tem como função prevenir o acesso não autorizado, o roubo, a sabotagem e outros atos maliciosos que possam comprometer a integridade física dessas instalações. Para isso, em conformidade com as regulamentações nacionais e internacionais, o SPF deve se utilizar de uma combinação de tecnologias, recursos humanos, materiais e práticas de segurança para assegurar a proteção eficaz e mitigar possíveis riscos à segurança.

Destaca-se a importância de um sistema de proteção física eficiente para mitigar ameaças à uma Base Naval Hipotética, considerando as devidas características específicas, a estratégia de proteção deve integrar tecnologias de detecção, medidas preventivas e capacidades de resposta rápida, abordando as ameaças previstas na ABP. As instalações nucleares, devido ao seu potencial de impacto em larga escala, demandam um enfoque rigoroso em suas vulnerabilidades e nas contramedidas adequadas.

Nessa conjuntura, o estudo concebeu uma planta de uma Base Naval Hipotética com armazenamento de material nuclear, caracterizando sua infraestrutura, funções operacionais, materiais nucleares presentes e identificação de principais ameaças. A partir destes aspectos, foi proposto um Sistema de Proteção Física preliminar fundamentado em três premissas principais, que colaboram de forma integrada para garantir a proteção física contra ameaças: detecção, atraso e resposta.

A partir do SPF preliminar, para medir sua eficácia e realizar a avaliação do risco, que envolve o cálculo matemático das probabilidades de interrupção e neutralização do adversário, utilizou-se o Diagrama de Sequência do Adversário. Este método tem como objetivo representar graficamente, identificar e quantificar os parâmetros das zonas, barreiras e sensores da instalação nuclear. As ferramentas (códigos computacionais) empregadas para essa análise foram o modelo EASI e outro dedicado à avaliação da neutralização.

Ao longo do estudo, observou-se que os PDC desempenham um papel essencial na defesa contra intrusões. Identificar e proteger esses pontos, utilizando sensores, sistemas de segurança e uma rede de segurança interconectada, é crucial para garantir que

qualquer atividade hostil seja detectada em tempo hábil. Além disso, as respostas a incidentes devem ser coordenadas de forma eficaz entre diversas equipes de segurança, garantindo uma capacidade de resposta robusta e integrada.

A análise dos múltiplos caminhos do adversário permitiu identificar e contabilizar as diversas rotas potenciais que um invasor poderia utilizar para acessar a Base Naval Hipotética. O resultado dessa avaliação sucedeu em 594 maneiras possíveis.

Os resultados iniciais indicaram uma baixa eficácia do SPF, devido ao tempo de resposta prolongado da Força de Reação e à presença de barreiras ligeiramente frágeis para a dimensão de uma instalação nuclear. No entanto, à medida melhorias foram implementadas, o SPF demonstrou um aumento significativo na probabilidade de detecção, refletindo na maior eficácia do sistema como um todo, atingindo o objetivo de 90% e risco estimado para furto de material nuclear igual a $7{,}89 \cdot 10^{-7}$.

Outro aspecto relevante é a dificuldade de obtenção de dados reais para alimentar os modelos computacionais, devido tanto à confidencialidade inerente aos sistemas de segurança quanto à escassez de estudos em laboratórios de metrologia que permitam precisar essas informações. Neste trabalho, assim como em outras referências, a base de dados utilizada foi proveniente do manual de pesquisas da SNL, baseado em situações hipotéticas. Portanto, para aplicações reais, torna-se necessário ajustar os parâmetros à realidade peculiar da instalação, o que pode exigir estudos adicionais ou adaptações baseadas em informações restritas àquele sítio.

Além disso, o estudo ressaltou a importância de alinhar as diretrizes de segurança física da BNH com os padrões internacionais de segurança nuclear, como os estabelecidos pela AIEA. A adoção de boas práticas internacionais fortalece a postura de segurança da instalação, garantindo conformidade e reduzindo riscos de falhas ou lacunas no sistema de proteção.

Por fim, é possível afirmar que a segurança de uma instalação nuclear não depende apenas de equipamentos de alta tecnologia, mas também da preparação humana e da organização estratégica. A combinação de tecnologias avançadas, gestão de risco bem estruturada e uma cultura de segurança forte é o caminho mais eficaz para garantir a proteção contínua de instalações nucleares.

A partir do estudo sobre a avaliação de risco de um Sistema de Proteção Física aplicado a uma Base Naval Hipotética, diversas propostas de trabalhos futuros podem ser exploradas para aprimorar os resultados alcançados e difundir o conceito de defesa em profundidade presente na engenharia nuclear. Algumas sugestões incluem:

- **Simulação de novos cenários:** alguns cenários de invasão não foram contemplados neste estudo, mas são relevantes e merecem análise em trabalhos futuros. Entre eles, destacam-se a sabotagem de material nuclear e o conluio entre um agente interno e um adversário externo para a subtração de materiais nucleares. Esses cenários representam ameaças significativas e demandam estratégias de mitigação específicas para fortalecer a segurança das instalações;
- **Validação experimental do SPF em cenários reais**: realizar experimentos práticos e simulações em campo que permitam testar o SPF em instalações reais ou ambientes simulados. Isso ajudaria a ajustar os parâmetros utilizados nos modelos computacionais e a confrontar os resultados obtidos no contexto da BNH;
- **Desenvolvimento de novas tecnologias de detecção e atraso**: pesquisar e implementar novas tecnologias de detecção, como sensores mais avançados e inteligentes, e melhorar os sistemas de barreiras físicas para aumentar a capacidade de atraso do adversário, talvez se utilizando de inteligência artificial para otimizar a resposta do sistema;
- **Estudos comparativos entre diferentes metodologias de análise de risco**: comparar o Diagrama de Sequência do Adversário com outras metodologias de análise de risco e neutralização em instalações nucleares, visando identificar qual abordagem é mais eficiente em termos de custos, eficácia e aplicabilidade em diferentes tipos de infraestrutura crítica;
- **Análise do impacto de ameaças cibernéticas no SPF**: investigar o impacto de possíveis ameaças cibernéticas em sistemas de segurança física, buscando desenvolver defesas integradas que combinem proteção física e cibernética, já que as infraestruturas nucleares dependem cada vez mais de sistemas informatizados;
- **Aprimoramento de base de dados para modelagem computacional**: propor a criação de uma base de dados mais robusta e precisa para alimentar os modelos computacionais, com a realização de estudos metrológicos e a obtenção de dados reais de

instalações nucleares. Isso permitiria uma maior precisão nas simulações e nas avaliações de risco; e

- **Integração do SPF com redes de colaboração internacional**: estudar a integração de sistemas de proteção física de instalações nucleares com redes de colaboração internacional, buscando melhores práticas e compartilhamento de dados sobre ameaças e segurança global, de acordo com normativas internacionais.

Essas propostas de pesquisa futura podem não apenas aprimorar o trabalho realizado, mas também contribuir significativamente para o avanço da proteção de instalações nucleares em nível global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. C. de. **Análise de risco considerando a segurança nuclear e proteção física de uma instalação nuclear hipotética**. 2018. 92 f. Dissertação de Mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/13166.

ANDIWIJAYAKUSUMA, D. "The Development of Multi-Path Adversary Analysis Tool for Vulnerability Assessment of Physical Protection Systems (MAVA)", **Journal of Engineering and Scientific Research**, v. 3, n. 3, dez. 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/99618665/The_Development_Of_Multi_Path_Adversary_Analysis_Tool_For_Vulnerability_Assessment_of_Physical_Protection_Systems_MAVA_. Acesso em: 1 mar. 2024.

CHAPMAN, G., DOWNES, R., ELDRIDGE, C., *et al.* **Security Culture: An Educational Handbook of Nuclear & Non-Nuclear Case Studies**. Londres, King's College London, ago. 2017. Acesso em: 11 nov. 2014.

CHAPMAN, G., HOBBS, C., HOMAN, Z., *et al.* **Radicalisation and Preventive Measures: An Educational Handbook of Insider Threat Case Studies**. Londres, King's College London, set. 2018. Disponível em: https://www.kcl.ac.uk/csss/assets/radicalisation-preventative-measures-handbook.pdf. Acesso em: 11 nov. 2024.

CHEIKH EL WELY, I., CHETAINE, A. "Analysis of physical protection system effectiveness of nuclear power plants based on performance approach", **Annals of Nuclear Energy**, v. 152, p. 107980, 1 mar. 2021.

CNEN. **Proteção Física de Materiais e Instalações Nucleares - CNEN NN 2.01**. Brasília, CNEN, 2019b. Disponível em: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/nrm201.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.

ECOLOGICAL FOOTPRINT. **Ecological Footprint**. 2024. Global Footprint Network. Disponível em: https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/. Acesso em: 4 nov. 2024.

FASTER CAPITAL. **Espionagem industrial como se defender contra roubo de segredo comercial**. 22 jun. 2024. Faster Capital. Disponível em: https://fastercapital.com/pt/contente/Espionagem-industrial--como-se-defender-contra-roubo-de-segredo-comercial.html. Acesso em: 4 nov. 2024.

FINCH, M. **What Is the Average Walking Speed and Jogging Speed?** 14 nov. 2022. Runner's World. Disponível em: https://www.runnersworld.com/training/a41725126/what-is-average-walking-speed/. Acesso em: 22 out. 2024.

GARCIA, M. L. **Design and Evaluation of Physical Protection Systems**. 2ª ed. Massachusetts, Elsevier Butterworth Heinemann, 2008.

GARCIA, M. L. **Vulnerability Assessment of Physical Protection Systems**. EUA, Elsevier Butterworth Heinemann, 2006.

HAWILA, M. A.-M. M. "Combined Safety and Security Risk Evaluation Considering Safety and Security-Type Initiating Events", 2016. Disponível em: https://oaktrust.library.tamu.edu/items/f1cc2db9-e072-4874-945f-c801a292a621/full. Acesso em: 20 out. 2024.

HOBBS, C., MORAN, M. **Insider Threats: An Educational Handbook of Nuclear & Non-Nuclear Case Studies**. Londres, King's College London, ago. 2015. Disponível em: https://www.kcl.ac.uk/csss/assets/insider-threats-handbook.pdf. Acesso em: 11 nov. 2014.

IAEA. **Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants**. IAEA Safety Standard Series No. SSG-61.Specific Safety Guide. Viena, IAEA, 2021a. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1884_web.pdf. Acesso em: 5 nov. 2024.

IAEA. **IAEA nuclear safety and security glossary: terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response**. 2022 (Interim) ed. Viena, Áustria, International Atomic Energy Agency, 2022.

IAEA. **Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities**. Viena, Áustria, IAEA, 2012. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1505_web.pdf. Acesso em: 4 jul. 2024.

IAEA. **Implementing Guide on Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities**. Viena, Áustria, IAEA, 2019a. v. 11-G.

IAEA. **INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual**. Viena, Áustria, IAEA, 2013. Disponível em: https://www.iaea.org/publications/10508/ines-the-international-nuclear-and-radiological-event-scale-users-manual. Acesso em: 2 nov. 2024.

IAEA. **International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)**. 31 maio 2019b. Disponível em: https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale. Acesso em: 2 nov. 2024.

IAEA. **National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements**. Viena, Áustria, IAEA, 2021b. v. 10-G.

IAEA. **Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5)**. Viena, Áustria, International Atomic Energy Agency, 2011. Disponível em: https://www.iaea.org/publications/8629/nuclear-security-recommendations-on-physical-protection-of-nuclear-material-and-nuclear-facilities-infcirc225revision-5. Acesso em: 4 nov. 2024.

IAEA. **Nuclear Security Report**. Viena, Áustria, IAEA, 2017. Disponível em: https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc61-14_en.pdf.

KIM, D., KWAG, S., HAHM, D., *et al.* "Investigating Natural Disaster-Related External Events at Nuclear Power Plants: Towards Climate Change Resilience", **International Journal of Energy Research**, v. 2024, n. 1, p. 3921093, jan. 2024. DOI: 10.1155/2024/3921093.

KUHN, G. F. "Evaluation and Assessment of Security Indicators for Physical Protection Systems", **Journal of Physical Security**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2012.

NORRIS, J. R. **Markov Chains**. 1. ed., Cambridge University Press, 1997. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511810633/type/book. Acesso em: 19 nov. 2024.

PHILIPS, G. "New Vulnerability Assessment Technologies vs the Old VA Tools", **New Meets Old**, National Security Program Office. 2004.

ROHR, A. **Saiba como age o vírus que invadiu usinas nucleares no Irã e na Índia**. 2 out. 2010. Tecnologia e Games. Disponível em: https://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2010/10/saiba-como-age-o-virus-que-invadiu-usinas-nucleares-no-ira-e-na-india.html. Acesso em: 4 nov. 2024.

ROSS, S. M. **A first course in probability**. Tenth edition ed. Boston, Pearson, 2019.

SNELL, M. **Report on Project Action Sheet PP05 task 3 between the U.S. Department of Energy and the Republic of Korea Ministry of Education, Science, and Technology (MEST)**, nº SAND2013-0039, 1088052, 452395. Califórnia, EUA, Sandia National Laboratories, 1 jan. 2013. Disponível em: https://www.osti.gov/servlets/purl/1088052/. Acesso em: 22 nov. 2023.

SNL. **"Hypothetical Facility Exercise Data Handbook", The Twenty-Seventh International Training Course**. EUA, SNL, 2017. Disponível em: https://vdocuments.mx/hypothetical-atomic-research-institute-hari-hypothetical-2019-11-08-hypothetical.html. Acesso em: 22 nov. 2023.

SNL. **Joint Conflict and Tactical Simulation (JCATS) at Sandia National Laboratories**. Fact Sheet, nº SAND2006-7256P. Novo México, Califórnia, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2006.

SNL. "National Security Program Office", **Sandia Corporation**, White Paper EUA. 2005.

SNL. **SAVI: Systematic Analysis of Vulnerability to Intrusion**. , nº SAND-89-0926/1, 7110077, ON: DE90008574, 1 dez. 1989. Disponível em: https://www.osti.gov/servlets/purl/7110077/. Acesso em: 14 nov. 2024.

WACKERNAGEL, M., LIN, D., EVANS, M., *et al.* "Defying the Footprint Oracle: Implications of Country Resource Trends", **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 2164, jan. 2019. DOI: 10.3390/su11072164.

ZAKARIYA, N. I., KAHN, M. T. E. "Safety, security and safeguard", **Annals of Nuclear Energy**, v. 75, p. 292–302, 1 jan. 2015. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.08.051.

ZOU, B., YANG, M., GUO, J., *et al.* "Insider threats of Physical Protection Systems in nuclear power plants: Prevention and evaluation", **Progress in Nuclear Energy**, v. 104, p. 8–15, 1 abr. 2018. DOI: 10.1016/j.pnucene.2017.08.006.

ANEXO A

Código escrito em *Microsoft Visual Basic®* para o cálculo das Probabilidades de Interrupção das maneiras possíveis de invasão da BNH.

```
Sub CalculoMultiplosCaminhos()
        Dim vetor1() As String
        Dim vetor2() As String
        Dim vetor3() As String
        Dim vetor4() As String
        Dim vetor5() As String
        Dim linha As Integer
        Dim contador As Integer
        Dim totalPares As Integer
        Dim matriz() As Variant
        Dim valorE22 As Double

        ' Definição dos elementos para cada vetor
        vetor1 = Split("POVE-1,POVE-2,POVE-3,POPE-1,POPE-2,POPE-3,CEES-1,CEES-2,CEDI-1,CEDI-2,AGUA", ",")
        vetor2 = Split("CAES,CADI,CAFR,CAFU", ",")
        vetor3 = Split("P1AP-1,P1AP-2,P2AP-1,P2AP-2,CEAP-1,CEAP-2", ",")
        vetor4 = Split("CAAP", ",")
        vetor5 = Split("P3PR-1,P3PR-2,PAPR", ",")
        vetor6 = Split("P4SC-1,P4SC-2,PASC", ",")
        vetor7 = Split("COFO", ",")

        'limpar registros de possíveis valores anteriores
         Range("A9:A20").ClearContents
        Range("A24:G700").ClearContents
        'Atraso para poder observar a montagem dos vetores online
        Application.Wait Now + TimeValue("0:00:01")

'''''''''''''''''''INÍCIO DA ESCRITA DOS VETORES''''''''''''''''''''''''''''
        ' Escrever os elementos do vetor1, começando na célula A25
        linha = 25   ' Inicialize a variável para a linha da planilha
```

```
  For i = LBound(vetor1) To UBound(vetor1)
    Planilha1.Cells(24, 1).Value = "vetor1"
    Planilha1.Cells(24, 1).Font.Bold = True
    Planilha1.Cells(linha, 1).Value = vetor1(i)
    linha = linha + 1
Next i

' Escrever os elementos do vetor2, começando na célula B25
linha = 25
Planilha1.Cells(24, 2).Value = "vetor2"
For i = LBound(vetor2) To UBound(vetor2)
    Planilha1.Cells(linha, 2).Value = vetor2(i)
    linha = linha + 1
Next i

' Escrever os elementos do vetor3, começando na célula C25
Planilha1.Cells(24, 3).Value = "vetor3"
linha = 25
For i = LBound(vetor3) To UBound(vetor3)
    Planilha1.Cells(linha, 3).Value = vetor3(i)
    linha = linha + 1
Next i

' Escrever os elementos de vetor4, começando na célula D25
Planilha1.Cells(24, 4).Value = "vetor4"
linha = 25
For i = LBound(vetor4) To UBound(vetor4)
    Planilha1.Cells(linha, 4).Value = vetor4(i)
    linha = linha + 1
Next i

' Escrever os elementos de vetor5, começando na célula A39
Planilha1.Cells(38, 1).Value = "vetor5"
linha = 39
For i = LBound(vetor5) To UBound(vetor5)
```

```
    Planilha1.Cells(linha, 1).Value = vetor5(i)
    linha = linha + 1
Next i

' Escrever os elementos de vetor6, começando na célula B39
Planilha1.Cells(38, 2).Value = "vetor6"
linha = 39
For i = LBound(vetor6) To UBound(vetor6)
    Planilha1.Cells(linha, 2).Value = vetor6(i)
    linha = linha + 1
Next i

    ' Escrever os elementos de vetor7, começando na célula C39
Planilha1.Cells(38, 3).Value = "vetor7"
Planilha1.Cells(38, 3).Font.Bold = True
linha = 39
For i = LBound(vetor7) To UBound(vetor7)
    Planilha1.Cells(linha, 3).Value = vetor7(i)
    linha = linha + 1
Next i
```

"""""""""’’’"""’’’"FIM DA ESCRITA DOS VETORES"""""""""""""""

```
' Calculando o número total de pares de vetores
totalPares = (UBound(vetor1) - LBound(vetor1) + 1) * _
            (UBound(vetor2) - LBound(vetor2) + 1) * _
            (UBound(vetor3) - LBound(vetor3) + 1) * _
            (UBound(vetor4) - LBound(vetor4) + 1) * _
            (UBound(vetor5) - LBound(vetor5) + 1)
' Redimensionando a matriz para armazenar os pares de vetores
ReDim matriz(1 To totalPares, 1 To 3)

' Loop para formar todos os pares possíveis
contador = 1
linha = 25
cont = 0
For i = LBound(vetor1) To UBound(vetor1)
```

```
For j = LBound(vetor2) To UBound(vetor2)
    For k = LBound(vetor3) To UBound(vetor3)
        For l = LBound(vetor4) To UBound(vetor4)
            For m = LBound(vetor5) To UBound(vetor5)
                For n = LBound(vetor6) To UBound(vetor6)
                    For o = LBound(vetor7) To UBound(vetor7)
                    ' Aplicar restrições específicas
                If (vetor1(i) = "POVE-1" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "POVE-2" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "POVE-3" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "POPE-1" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "POPE-2" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "POPE-3" And vetor2(j) = "CAFR") Or _
                  (vetor1(i) = "CEES-1" And vetor2(j) = "CAES") Or _
                  (vetor1(i) = "CEES-2" And vetor2(j) = "CAES") Or _
                  (vetor1(i) = "CEDI-1" And vetor2(j) = "CADI") Or _
                  (vetor1(i) = "CEDI-2" And vetor2(j) = "CADI") Or _
                  (vetor1(i) = "AGUA" And vetor2(j) = "CAFU") Then

                    'Escrever os vetores nas células correspondentes
                    Planilha1.Cells(9, 1).Value = vetor1(i)
                    Planilha1.Cells(10, 1).Value = vetor2(j)
                    Planilha1.Cells(11, 1).Value = vetor3(k)
                    Planilha1.Cells(12, 1).Value = vetor4(l)
                    Planilha1.Cells(13, 1).Value = vetor5(m)
                    Planilha1.Cells(14, 1).Value = vetor6(n)
                    Planilha1.Cells(15, 1).Value = vetor7(o)

                    'Ler o valor da célula E22 (célula com valor da probabilidade de interrupção)
                    valorE22 = Planilha1.Range("E22").Value

"""""""""""""""""ESCRITA COLUNAS DE SAÍDA"""""""""""""""
                    Planilha4.Range("c1").Value = "Número de caminhos possíveis: " & contador
```

```
'COLUNA 1
Planilha4.Range("a2").Value = "caminho"
Planilha4.Range("a2").Offset(contador, 0).Value = contador

'COLUNA 2
Planilha4.Range("b2").Value = "PI"
Planilha4.Range("b2").Offset(contador, 0).Value = valorE22

'COLUNA 3
Planilha4.Range("c2").Value = "Sequência"
Planilha4.Range("c2").Offset(contador, 0).Value = vetor1(i) & "->" & vetor2(j) & "->" & vetor3(k) & "->" & vetor4(l) & "->" & vetor5(m) & "->" & vetor6(n) & "->" & vetor7(o)
```

’’’’’’’’’’’’INÍCIO DA FILTRAGEM dos RESULTADOS RUINS’’’’’’’’’’’’

```
  'Range("L1:X24").ClearContents
If valorE22 >= 0 And valorE22 <= 0.5 Then
  Planilha4.Range("L2").Value = "Pi <= 0,5"
  Planilha4.Range("L3").Offset(cont, 0).Value = contador
  Planilha4.Range("N3").Offset(cont, 0).Value = vetor1(i) & "->" & vetor2(j) & "->" & vetor3(k) & "->" & vetor4(l) & "->" & vetor5(m) & "->" & vetor6(n) & "->" & vetor7(o)
  Planilha4.Range("M3").Offset(cont, 0).Value = valorE22
  cont = cont + 1
End If

If valorE22 > 0.5 And valorE22 <= 0.6 Then
  Planilha4.Range("O2").Value = "Pi entre 0,5 e 0,6"
  Planilha4.Range("O3").Offset(cont2, 0).Value = contador
  Planilha4.Range("Q3").Offset(cont2, 0).Value = vetor1(i) & "->" & vetor2(j) & "->" & vetor3(k) & "->" & vetor4(l) & "->" & vetor5(m) & "->" & vetor6(n) & "->" & vetor7(o)
  Planilha4.Range("P3").Offset(cont2, 0).Value = valorE22
  cont2 = cont2 + 1
End If
```

```
                    If valorE22 > 0.6 And valorE22 <= 0.7 Then
                        Planilha4.Range("R2").Value = "Pi entre 0,6 e 0,7"
                        Planilha4.Range("R3").Offset(cont3, 0).Value = contador
                        Planilha4.Range("T3").Offset(cont3, 0).Value = vetor1(i) & "->" & vetor2(j) & "->" & vetor3(k) & "->" & vetor4(l) & "->" & vetor5(m) & "->" & vetor6(n) & "->" & vetor7(o)
                        Planilha4.Range("S3").Offset(cont3, 0).Value = valorE22
                        cont3 = cont3 + 1
                    End If

                    If valorE22 > 0.7 And valorE22 <= 0.8 Then
                        Planilha4.Range("U2").Value = "Pi entre 0,7 e 0,8"
                        Planilha4.Range("U3").Offset(cont4, 0).Value = contador
                        Planilha4.Range("W3").Offset(cont4, 0).Value = vetor1(i) & "->" & vetor2(j) & "->" & vetor3(k) & "->" & vetor4(l) & "->" & vetor5(m) & "->" & vetor6(n) & "->" & vetor7(o)
                        Planilha4.Range("V3").Offset(cont4, 0).Value = valorE22
                        cont4 = cont4 + 1
                    End If
```

’’’’’’’’’’’’’’’’FIM da FILTRAGEM dos RESULTADOS RUINS’’’’’’’’’’’’’’’’

```
                ' Avançar para a próxima linha
                    contador = contador + 1
                    linha = linha + 1
                    'End If
                End If
                    Next o
                Next n
            Next m
        Next l
    Next k
  Next j
Next i
End Sub
```

ANEXO B

1. CENÁRIO 1

Resultados da Probabilidade de Interrupção para valores compreendidos entre 0,5 e 0,8.

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$0,5 < P_I \leq 0,6$	7	0,531	POVE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	43	0,532	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	73	0,537	POVE-2->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	169	0,518	POPE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	205	0,520	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	218	0,580	POPE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	219	0,599	POPE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	220	0,580	POPE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	226	0,579	POPE-2->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	254	0,583	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	256	0,583	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	298	0,570	POPE-3->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	316	0,552	POPE-3->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	464	0,521	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	465	0,543	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	467	0,584	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	482	0,506	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	483	0,529	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	485	0,572	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	486	0,593	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	494	0,540	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	495	0,560	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	502	0,528	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	530	0,541	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	531	0,562	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	542	0,521	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	543	0,537	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	544	0,521	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	547	0,568	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	550	0,519	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	578	0,523	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	579	0,540	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	580	0,523	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	583	0,571	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
$0,6 < P_I \leq 0,7$	29	0,655	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	30	0,674	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	31	0,655	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	47	0,637	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	48	0,656	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	49	0,637	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	52	0,692	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	56	0,617	POVE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
	57	0,636	POVE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	58	0,617	POVE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	61	0,671	POVE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	64	0,616	POVE-2->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	92	0,621	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	93	0,640	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	94	0,621	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	97	0,676	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	136	0,636	POVE-3->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	154	0,618	POVE-3->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	191	0,642	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	192	0,660	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	193	0,642	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	196	0,694	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	209	0,624	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	210	0,643	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	211	0,624	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	214	0,679	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	223	0,635	POPE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	255	0,602	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	259	0,639	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	272	0,699	POPE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	274	0,699	POPE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	280	0,697	POPE-3->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	289	0,639	POPE-3->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	325	0,625	CEES-1->CAES->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	361	0,628	CEES-1->CAES->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	446	0,673	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	447	0,690	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	455	0,605	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	456	0,624	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	458	0,661	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	459	0,678	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	468	0,604	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	518	0,653	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	519	0,670	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	536	0,642	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	537	0,661	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	539	0,695	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	569	0,656	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	570	0,668	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	571	0,655	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	574	0,691	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	587	0,645	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	588	0,657	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	589	0,645	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	592	0,682	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$0,7 < P_I \leq 0,8$	5	0,784	POVE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	6	0,796	POVE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	11	0,782	POVE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	12	0,794	POVE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	13	0,782	POVE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	20	0,726	POVE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	21	0,742	POVE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	22	0,726	POVE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	25	0,770	POVE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	34	0,708	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	41	0,790	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	83	0,773	POVE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	84	0,786	POVE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	85	0,773	POVE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	101	0,760	POVE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	102	0,774	POVE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	103	0,760	POVE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	106	0,799	POVE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	110	0,759	POVE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	111	0,772	POVE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	112	0,759	POVE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	115	0,795	POVE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	118	0,759	POVE-3->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	127	0,704	POVE-3->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	146	0,765	POVE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	147	0,777	POVE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	148	0,765	POVE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	151	0,800	POVE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	167	0,773	POPE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	168	0,785	POPE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	173	0,768	POPE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	174	0,781	POPE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	175	0,768	POPE-1->CAFR->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	182	0,713	POPE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	183	0,728	POPE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	184	0,713	POPE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	187	0,757	POPE-1->CAFR->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	203	0,779	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	204	0,791	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	236	0,793	POPE-2->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	238	0,793	POPE-2->CAFR->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	245	0,740	POPE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	246	0,753	POPE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	247	0,740	POPE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	250	0,779	POPE-2->CAFR->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	263	0,727	POPE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	264	0,741	POPE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	265	0,726	POPE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
	268	0,768	POPE-2->CAFR->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	273	0,712	POPE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	277	0,738	POPE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	308	0,703	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	309	0,717	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	310	0,703	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	313	0,743	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	343	0,777	CEES-1->CAES->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	352	0,739	CEES-1->CAES->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	370	0,732	CEES-1->CAES->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	379	0,711	CEES-2->CAES->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	406	0,794	CEES-2->CAES->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	415	0,715	CEES-2->CAES->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	424	0,790	CEES-2->CAES->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	449	0,722	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	450	0,736	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	500	0,764	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	501	0,776	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	503	0,798	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	509	0,718	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	510	0,732	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	512	0,758	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	513	0,770	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	521	0,702	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	522	0,717	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	540	0,711	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	545	0,747	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	546	0,757	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	548	0,775	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	549	0,783	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO
	551	0,737	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	552	0,746	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	553	0,737	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	556	0,762	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	560	0,703	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	561	0,713	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	562	0,703	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	565	0,732	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	581	0,750	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->COFO
	582	0,759	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->COFO
	584	0,776	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-2->COFO
	585	0,785	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->PAPR->PASC->COFO

2. CENÁRIO 2

Resultados da Probabilidade de Interrupção para valores compreendidos entre 0 e 0,8.

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$P_I \leq 0,5$	433	0,066	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	434	0,418	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	435	0,447	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	436	0,418	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	442	0,407	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	451	0,299	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	460	0,201	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	469	0,056	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	470	0,414	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	471	0,444	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	472	0,412	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	478	0,177	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	487	0,176	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	505	0,493	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	514	0,384	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	523	0,164	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	532	0,356	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
$0,5 < P_I \leq 0,6$	1	0,584	POVE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	37	0,588	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	163	0,569	POPE-1->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	199	0,573	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	439	0,503	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	475	0,500	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	488	0,598	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	490	0,598	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	496	0,586	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
$0,6 < P_I \leq 0,7$	461	0,659	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	462	0,682	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	463	0,658	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	479	0,637	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	480	0,660	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	481	0,635	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	489	0,621	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	493	0,665	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	524	0,602	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	525	0,626	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	526	0,601	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	529	0,668	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	541	0,619	AGUA->CAFU->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	577	0,625	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
$0,7 < P_I \leq 0,8$	28	0,784	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	46	0,769	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	55	0,741	POVE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	91	0,750	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	190	0,769	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
	208	0,753	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	217	0,700	POPE-2->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	253	0,708	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	271	0,791	POPE-3->CAFR->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	307	0,796	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	443	0,794	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	445	0,794	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	452	0,743	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	453	0,760	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	454	0,741	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	457	0,788	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	466	0,720	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	484	0,702	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->COFO
	515	0,776	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	516	0,790	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	517	0,775	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	533	0,763	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->COFO
	534	0,778	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->COFO
	535	0,762	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->COFO
	550	0,791	AGUA->CAFU->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	559	0,769	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	568	0,735	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO
	586	0,726	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->COFO

3. CENÁRIO 3

Resultados da Probabilidade de Interrupção para valores compreendidos entre 0 e 0,8.

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$P_I \leq 0,5$	433	0,446	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	442	0,418	CEDI-1->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	451	0,299	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	460	0,201	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	469	0,056	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	470	0,415	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	471	0,446	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	472	0,415	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	478	0,178	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	505	0,493	CEDI-2->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	514	0,384	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	523	0,164	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	532	0,357	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
$0,5 < P_I \leq 0,6$	37	0,589	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	199	0,573	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	475	0,504	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	496	0,597	CEDI-2->CADI->P1AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$0,6 < P_I \leq 0,7$	461	0,659	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	462	0,682	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	463	0,658	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	479	0,644	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	480	0,669	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	481	0,644	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	487	0,624	CEDI-2->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	524	0,604	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	525	0,628	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	526	0,603	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	529	0,672	CEDI-2->CADI->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	577	0,625	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
$0,7 < P_I \leq 0,8$	28	0,784	POVE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	46	0,769	POVE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	91	0,751	POVE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	190	0,769	POPE-1->CAFR->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	208	0,754	POPE-1->CAFR->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	253	0,708	POPE-2->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	307	0,797	POPE-3->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	452	0,743	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	453	0,760	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	454	0,741	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	457	0,788	CEDI-1->CADI->P2AP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	466	0,720	CEDI-1->CADI->P2AP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	484	0,712	CEDI-1->CADI->CEAP-2->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	515	0,776	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	516	0,790	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	517	0,775	CEDI-2->CADI->P2AP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	533	0,771	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-2->CAFO
	534	0,786	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->PASC->CAFO
	535	0,770	CEDI-2->CADI->CEAP-2->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	559	0,769	AGUA->CAFU->P2AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	568	0,735	AGUA->CAFU->P2AP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	586	0,727	AGUA->CAFU->CEAP-2->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO

4. CENÁRIO 4

Resultados da Probabilidade de Interrupção para valores compreendidos entre 0 e 0,8.

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$0,7 < P_I \leq 0,8$	433	0,756	CEDI-1->CADI->P1AP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	37	0,731	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	40	0,787	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	43	0,745	POVE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO
	199	0,719	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-1->P4SC-1->CAFO
	202	0,777	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-1->CAFO
	205	0,756	POPE-1->CAFR->CEAP-1->CAAP->PAPR->P4SC-1->CAFO

5. CENÁRIO 5

Resultados da Probabilidade de Interrupção para valores compreendidos entre 0,90 e 0,91.

Intervalo	Caminho	P_I	Sequência
$0,90 < P_I \leq 0,91$	473	0,910	CEDI-1->CADI->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->CAFO
	581	0,905	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->P4SC-2->CAFO
	582	0,909	AGUA->CAFU->CEAP-1->CAAP->P3PR-2->PASC->CAFO