

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUÍS ANDRÉ GARCIA DA SILVA

**Arquiteturas Redundantes em Subestações Elétricas para Cargas
Críticas: Aplicação em *Data Centers* e Estudo de Caso no Controle
do Espaço Aéreo Brasileiro**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUÍS ANDRÉ GARCIA DA SILVA

**Arquiteturas Redundantes em Subestações Elétricas para Cargas
Críticas: Aplicação em *Data Centers* e Estudo de Caso no Controle
do Espaço Aéreo Brasileiro**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para aprovação na unidade
curricular TCC22009.

Orientador:
Prof. Marco Aurélio Moreira Saran, Me.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

DA SILVA, LUIS ANDRÉ GARCIA

Arquiteturas Redundantes em Subestações Elétricas
para Cargas Críticas: Aplicação em Data Centers e Estudo de
Caso no Controle do Espaço Aéreo Brasileiro / LUIS
ANDRÉ GARCIA DA SILVA; orientação de Marco Aurélio
M. Saran. - Florianópolis, SC, 2025.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Subestações Elétricas. 2. Cargas Críticas. 3.
Redundância de Sistemas Elétricos. 4. Data Centers. 5.
Confiabilidade. I. Saran, Marco Aurélio M. . II. Instituto
Federal de Santa Catarina. III. Arquiteturas
Redundantes em Subestações Elétricas para Cargas Críticas:
Aplicação em Data Centers e Estudo de Caso no Controle

ARQUITETURAS REDUNDANTES EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS PARA CARGAS CRÍTICAS: APLICAÇÃO EM *DATA CENTERS* E ESTUDO DE CASO NO CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

LUIS ANDRÉ GARCIA DA SILVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 31 de dezembro, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARCO AURELIO MOREIRA SARAN**
Data: 10/01/2026 14:32:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marco Aurélio Moreira. Saran, Mestre
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL TENFEN**
Data: 04/02/2026 09:17:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Tenfen, Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **FABIO VICTOR SCHREIBER**
Data: 12/01/2026 14:45:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fabio Victor Schreiber, Mestre
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

É com imenso sentimento de gratidão que chego ao fim desta etapa da minha formação e não poderia deixar de registrar meus agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e a seus profissionais, que disponibilizaram a estrutura necessária ao meu desenvolvimento acadêmico.

Aos meus professores e orientador, agradeço pelos conhecimentos transmitidos e pela inspiração científica que guiou minhas decisões nos momentos mais complexos. Aos colegas de turma, obrigado pela parceria, pelas trocas intelectuais e pelo apoio que tornou a jornada mais leve e enriquecedora.

Não posso deixar de demonstrar minha profunda gratidão à minha mãe, Maria Elizabeth, cujo amor, sacrifício e incentivo constante foram a base da minha trajetória. Aos irmãos e filhos, agradeço pelo apoio e pelo interesse genuíno em meu progresso.

À minha esposa, Daiane Castilho, dedico minha homenagem mais sincera. Sua paciência, renúncia e apoio incondicional sustentaram cada etapa deste processo. Você reorganizou rotinas, ouviu minhas angústias, manteve o equilíbrio do nosso lar e acreditou em mim quando eu mesmo desacreditei. Cada conquista deste trabalho carrega sua presença e dedicação. Obrigado por ser minha maior incentivadora. Este diploma é nosso, e seguiremos juntos na construção das próximas metas.

Por fim, agradeço aos amigos que compreenderam minhas ausências e aos autores e pesquisadores que fundamentaram esta investigação. Que este trabalho represente uma modesta contribuição ao campo científico e reafirme o valor do apoio coletivo. A todos, meu sincero e eterno obrigado.

RESUMO

Este trabalho analisa a importância da redundância elétrica em subestações destinadas ao atendimento de cargas críticas, com ênfase em *data centers* do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Inicialmente, são apresentados os fundamentos das subestações para cargas críticas, seus principais equipamentos e sua função na transformação, distribuição e proteção da energia elétrica. A pesquisa incorpora os requisitos normativos aplicáveis a *data centers*, incluindo a NBR ISO/IEC 22237, o *Uptime Institute* (Tier I–IV), a *Telecommunications Industry Association* (TIA-942), a *American National Standards Institute / Building Industry Consulting Service International* (ANSI/BICSI) e a Instrução do Comando da Aeronáutica ICA 66-36 do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

O estudo contempla um exame detalhado do esquema unifilar e a identificação da topologia redundante da subestação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Morro da Igreja (DTCEA-MDI), incluindo seus componentes, caminhos alternativos de alimentação e elementos que garantem a continuidade operacional. Para avaliação do desempenho, são utilizados indicadores de engenharia de confiabilidade, como o *Mean Time Between Failures* (MTBF), o *Mean Time To Repair* (MTTR) e a função de confiabilidade, bem como métodos probabilísticos, com destaque para a Simulação de Monte Carlo.

Foi desenvolvido um código em Python para modelagem de cenários de falha, processamento de dados e estimativa da disponibilidade da instalação. Os resultados evidenciam a relevância da redundância para assegurar a operação ininterrupta de *data centers* e sistemas de controle aéreo, demonstrando que a metodologia aplicada pode ser replicada em outras subestações que atendem cargas críticas.

Palavras-chave: Subestações Elétricas. Cargas Críticas. Redundância de Sistemas Elétricos. Data Centers. Confiabilidade.

ABSTRACT

This work analyzes the importance of electrical redundancy in substations designed to supply critical loads, with emphasis on data centers of the Brazilian Airspace Control System (SISCEAB). Initially, the fundamentals of substations for critical loads are presented, including their main equipment and their role in the transformation, distribution, and protection of electrical energy. The research incorporates the regulatory requirements applicable to data centers, including ABNT NBR ISO/IEC 22237, the Uptime Institute classification (Tier I–IV), the Telecommunications Industry Association standard (TIA-942), the American National Standards Institute / Building Industry Consulting Service International standard (ANSI/BICSI), and the Aeronautical Command Instruction ICA 66-36 issued by the Department of Airspace Control (DECEA).

The study includes a detailed examination of the single-line diagram and the identification of the redundant topology of the substation installed at the Morro da Igreja Airspace Control Detachment (DTCEA-MDI), covering its components, alternative power supply paths, and elements that ensure operational continuity. To evaluate system performance, reliability engineering indicators such as Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), and the reliability function are employed, along with probabilistic methods, with emphasis on Monte Carlo Simulation.

A Python-based code was developed for failure scenario modeling, data processing, and estimation of the facility's availability. The results highlight the relevance of redundancy in ensuring uninterrupted operation of data centers and air traffic control systems, demonstrating that the applied methodology can be replicated in other substations supplying critical loads.

Keywords: Electrical Substations. Critical Loads. Power System Redundancy. Data Centers. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.....	21
Figura 2 - Entrada de serviço de uma unidade consumidora de alta-tensão.....	24
Figura 3 - Detalhes construtivos dos para-raios de distribuição.....	25
Figura 4 - Disjuntor de média tensão	26
Figura 5 - Chave seccionadora tripolar.....	26
Figura 6 - Transformador de Força	27
Figura 7 - Mufla	28
Figura 8 - Cabo de média tensão	28
Figura 9 - Barramento de média tensão.....	29
Figura 10 - Diagrama de blocos de KF tipo 0	40
Figura 11 - Diagrama de blocos de KF tipo I.....	41
Figura 12 - Diagrama de blocos de KF tipo II- e II	42
Figura 13 - Diagrama de blocos de KF tipo II+	44
Figura 14 - Diagrama de blocos de KF tipo III-.....	45
Figura 15 - Diagrama de blocos de KF tipo III	46
Figura 16 - Diagrama de blocos de KF tipo IV.....	48
Figura 17 - Recorte do esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI	55
Figura 18- Esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI reestruturada como um grafo de nós numerados	60
Figura 19- Análise da disponibilidade do componente e dos caminhos	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos elementos do esquema unifilar	56
Tabela 2 - Legenda de codificação dos dispositivos do esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI.	61
Tabela 3 - Sequência numérica dos Caminhos Possíveis.....	63
Tabela 4 - Dados gerais dos componentes da Subestação	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BICSI	<i>Building Industry Consulting Service International</i>
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Espaço Aéreo
CPD	Centrais de Processamento de Dados
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DTCEA	Destacamento de Controle do Espaço Aéreo
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
KF	Casa de Força
MDI	Morro da Igreja
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
PBT	Painel de Baixa Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PTA	Painel de Transmissão Automática
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIGE	Sistema de Gerenciamento de Energia
SILOMS	Sistema Integrado de Logística de Materiais e Serviços
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UGE	Unidade de Gerenciamento de Energia
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Subestações	20
2.1.1	Nível de Tensão de Conexão ao Sistema Elétrico	21
2.1.2	Subestação de Consumidor de Acordo com a Forma Construtiva.....	22
2.1.2.1	Subestação Abrigada.....	23
2.1.2.2	Subestação Blindada	23
2.1.3	Equipamentos de uma Subestação	23
2.1.3.1	Ramal de Entrada	24
2.1.3.2	Para-Raios	24
2.1.3.3	Chave Disjuntora.....	25
2.1.3.4	Chave Seccionadora.....	26
2.1.3.5	Transformadores.....	26
2.1.3.6	Muflas.....	27
2.1.3.7	Cabos.....	28
2.1.3.8	Barramentos.....	28
2.1.4	Equipamentos de Proteção das Subestações Elétricas.....	29
2.2	Data Center	29
2.2.1	Classificação de Infraestrutura de um Data Center.....	30
2.2.1.1	Disponibilidade.....	31
2.2.1.2	Confiabilidade	32
2.2.1.3	Redundância.....	33
2.3	Normas para Classificação de Data Centers	34
2.3.1	Classificação Uptime Institute Tiers	35
2.3.1.1	Data Center Tier I- Infraestrutura Básica.....	35
2.3.1.2	Data Center Tier II- Componentes Redundantes	35
2.3.1.3	Data Center Tier III- Manutenção e Operação Simultânea	35
2.3.1.4	Data Center Tier IV- Tolerante a falhas.....	36
2.3.2	Classificação ANSI/TIA-942	36
2.3.2.1	Data Center tipo “N” - Requisito Base-Tier 1.....	37
2.3.2.2	Data Center com Redundância N+1- Tier 2	37
2.3.2.3	Data Center com Redundância N+2- Tier 3.....	37
2.3.2.4	Data Center com Redundância 2N- Tier 4	37
2.3.2.5	Data Center Redundância 2(N+1) - Tier 4	37
2.3.3	Classificações dos Data Center para Disponibilidade de Acordo com ANSI/BICSI-002.	38
2.3.4	Classificações dos Data Center para Disponibilidade de Acordo com NBR ISO/IEC 22237-23.....	38
2.4	Subestações de Acordo com a ICA 66-36 (DECEA, 2019)	38
2.4.1	Subestação Tipo 0	39
2.4.2	Subestação Tipo I	41
2.4.3	Subestação Tipo II- e II	41
2.4.4	Subestação Tipo II+	43

2.4.5	Subestação Tipo III-	44
2.4.6	Subestação Tipo III	46
2.4.7	Subestação Tipo IV	47
2.5	Análise de Confiabilidade pelo Método de Monte Carlo	49
3	ESTUDO DE CASO: SUBESTAÇÃO REDUNDANTE NO DESTACAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO DO MORRO DA IGREJA.....	51
3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	52
3.2	Topologia Redundante da Subestação até as Cargas Críticas.....	53
3.3	Esquema Unifilar Simplificado da Subestação	55
3.4	Análise Estrutural da Redundância por Simulação de Monte Carlo....	57
3.5	Análise de Disponibilidade Sistêmica via Indicadores MTBF, MTTR e Confiabilidade	58
3.5.1	Conceitos de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade	58
3.6	Simulação de Monte Carlo para Quantificação da Confiabilidade e Disponibilidade	59
3.7	Análise dos Caminhos Possíveis de Alimentação e Redundância da Subestação.....	62
3.8	Código Python para Análise de Disponibilidade e Confiabilidade da Subestação	65
3.8.1	Tabela dos Componentes	67
3.8.2	Confiabilidade dos Caminhos.....	69
3.8.3	Confiabilidade Global do Sistema	69
3.8.4	Gráficos e Visualizações	70
3.8.5	Análise Crítica	70
4	CONCLUSÃO	72
4.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	ANEXOS	79
	ANEXO A – Código Fonte Sobre Confiabilidade e Disponibilidade	79

1 INTRODUÇÃO

As subestações compreendem uma coleção de condutores, dispositivos e equipamentos concebidos para modificar as propriedades da energia elétrica, tais como tensão e corrente, para facilitar sua distribuição aos pontos de consumo em níveis apropriados de utilização. De forma geral, as subestações podem ser agrupadas em categorias, incluindo centrais de transmissão, receptoras de transmissão, subtransmissão e subestações de consumidores (Mamede Filho, 2017).

Aquelas construídas em propriedade particular suprida por alimentadores de distribuição primários, originados das subestações de subtransmissão, que suprem os pontos finais de consumo são conceituadas de subestações de consumidor (Mamede Filho, 2017).

Pode-se inferir que as subestações elétricas de consumidor são a ponte entre a rede elétrica externa e o sistema interno de distribuição de energia. Elas desempenham um papel vital na garantia de que haverá energia necessária para operação de diversos modelos de cargas, entre esses os *data centers*.

Segundo a NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023a), *data centers* são complexos ou conjuntos de edificações projetadas para abrigar, conectar e operar tecnologias de informação e redes de telecomunicações, fornecendo serviços de armazenamento, processamento e transmissão de dados. Eles incluem todas as instalações necessárias, infraestrutura de distribuição de energia e controle ambiental, além dos níveis exigidos de segurança e recuperação para garantir a disponibilidade de serviço desejada

De acordo com Barroso, Hölzle, Ranganathan (2019), o projeto de um *data center* é frequentemente classificado usando um sistema de quatro níveis. baseados em conceitos da *Uptime Institute* e da *Telecommunications Industry Association* (TIA), ambas defendem uma classificação em níveis na distribuição de energia, fonte de alimentação ininterrupta, fornecimento de resfriamento e redundância do centro de dados, além das instituições citadas a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023). A referida norma destaca que é fundamental que os *data centers* ofereçam instalações e infraestrutura modulares, escaláveis e flexíveis para acomodar e atender com agilidade e eficiência às necessidades em constante evolução do mercado (ABNT, 2023a).

A distribuição de energia é crucial para a operação de um *data center*. Distúrbios como variações de tensão, corrente e frequência no fornecimento de energia têm um impacto direto na segurança e disponibilidade da infraestrutura (ABNT, 2023b).

Dentro do sistema de controle do espaço aéreo brasileiro a Instrução do comando da Aeronáutica (ICA) publicou a instrução 66-36 (DECEA, 2019) reportando que ao longo dos últimos anos o movimento de aeronaves vem crescendo substancialmente e, em consequência, o sistema de controle de tráfego aéreo tem sido cada vez mais exigido. Ao mesmo tempo, a evolução tecnológica dos equipamentos que fornecem suporte às áreas operacionais tem requerido infraestrutura de sistemas elétricos que atenda aos crescentes requisitos de confiabilidade, disponibilidade e de qualidade. A garantia desses requisitos, por sua vez, requer condições mínimas de padronização da infraestrutura de sistemas elétricos e, em especial, redundâncias de componentes de modo a propiciar a realização de manutenções programadas ou correção de falhas sem a interrupção de serviços essenciais.

Destaca-se que sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo necessitam de resiliência operacional, pois o sistema exige confiabilidade e disponibilidade e, por isso, precisam de fontes alternativas de energia disponíveis em caso de falha, oferecendo camadas extras de proteção e garantindo assim a continuidade das operações.

As regras e nomenclaturas definidas para as arquiteturas de subestações de consumidor, comumente chamadas de casa de Força ou, apenas, de KF, buscam correlacioná-las com as tipologias definidas pelo *The Uptime Institute* para o processo de certificação *TIER* (I a IV). A título de exemplo as subestações definidas como tipo III, visam ao atendimento de requisito *TIER III*, para o qual se exige duplicidade de caminho e de equipamentos de modo a permitir a simultaneidade das atividades de operação dos sistemas críticos e de manutenção dos equipamentos que os suportam, ICA 66-36 (DECEA, 2019).

1.1 Justificativa

De acordo com uma matéria intitulada "Curto-circuito interrompeu energia no Cindacta-4" no ano de 2006 houve falha no sistema de alimentação e interrupção

do fornecimento de energia no Quarto Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (Cindacta-4), em Manaus. Um curto-circuito comprometeu as operações de controle de tráfego aéreo, provocando um efeito cascata nos aeroportos de todo o país. Segundo a Aeronáutica, no momento da falha, havia 17 aviões em voo, dos quais nove prosseguiram para seus destinos e oito tiveram as rotas modificadas (G1, 2006).

A Portaria 78 do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) aprovou a edição da norma técnica ICA 66-36 (DECEA, 2019) para implantação ou substituição de sistemas de energia para o Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro.

A ICA 66-36 (DECEA, 2019), passou a estabelecer critérios técnicos mínimos para a configuração de redundância de sistemas de energia que alimentam os *data centers*, comumente chamados de sala técnica, que compõem o controle do espaço aéreo brasileiro visando o serviço de manutenção programada ou à resposta às falhas, sem impacto às cargas críticas que sustentam as operações aéreas.

A implementação de redundâncias nos equipamentos das subestações que energizam *data centers* do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB) podem garantir a continuidade das operações. Sem essas redundâncias, a instabilidade e o risco de interrupções podem prejudicar significativamente as atividades do controle do espaço aéreo brasileiro.

1.2 Definição do Problema

Um problema crucial na operação de *data center*, especialmente quando aplicados ao sistema de controle do espaço aéreo, é a necessidade de redundância de equipamentos da subestação. A redundância desses refere-se à disponibilidade de sistemas alternativos que podem assumir as funções dos equipamentos principais em caso de falha ou interrupção.

De acordo com NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023), *data centers* variam em termos da disponibilidade dos serviços, provisionamento e objetivos. Os projetos em termos de construção e distribuição de energia são diretamente influenciados pelas suas necessidades.

Nesse contexto, entender as interligações entre todos os componentes que compõem as subestações de consumidor que energizam *data centers* é primordial

para se compreender os níveis de confiabilidade e disponibilidade em especial quando voltados ao sistema do controle do espaço aéreo brasileiro

Ao aplicar esses princípios ao sistema de controle do espaço aéreo, onde a segurança e a eficiência operacional são de suma importância, a redundância de equipamentos da subestação desempenha um papel fundamental na garantia da continuidade das operações. Interrupções no fornecimento de energia podem afetar diretamente a operação dos sistemas de controle de tráfego aéreo, colocando em risco a segurança dos voos e a coordenação do espaço aéreo.

Esse trabalho tem como proposição entender os conceitos das subestações de consumidor, explorar as funcionalidades dos equipamentos, como transformadores, geradores, disjuntores, *Nobreak* e suas adaptações, além disso, busca compreender as interligações e formas de redundâncias quando aplicadas para energização de *data centers*.

Por fim, busca-se compreender as formas de redundâncias com a finalidade de garantir a disponibilidade contínua de energia em *data centers* como os dos sistemas de controle do espaço aéreo brasileiro, pois esses necessitam de eficiência para as operações aéreas.

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a importância das redundâncias dos equipamentos em subestações de consumidor quando aplicados na distribuição de energia para *data centers*, especialmente quando utilizadas nos sistemas de controle do espaço aéreo brasileiro tendo como requisitos os conceitos da *Uptime Institute*, *TIA 942*, *ANSI/BICSI-002* e da NBR ISO/IEC 22237 da ABNT.

1.4 Objetivos Específicos

Para analisar a complexidade e importância das subestações elétricas de consumidor, assim como sua interação com os *data centers* aplicados ao sistema de controle do espaço aéreo brasileiro, é essencial:

- a) investigar os conceitos, equipamentos e funcionalidades das subestações elétricas de consumidor, destacando sua importância na

distribuição de energia para os centros de dados e sua relevância para a operação do sistema de controle do espaço aéreo brasileiro;

- b) verificar as camadas de redundâncias dos sistemas elétricos que energizam *data centers* baseados nos conceitos da *Uptime Institute*, *TIA-942*, *ANSI/BICSI-002* e a NBR ISO/IEC 22237 da ABNT, com foco na distribuição de energia, fonte de alimentação ininterrupta, grupos geradores, painéis de distribuição, entre outros;
- c) verificar as formas de redundância aplicadas às subestações de consumidor e aos *data centers*, considerando a duplicidade de caminho e equipamentos para permitir a simultaneidade das atividades operacionais e de manutenção, conforme exigido pela norma ICA 66-36 do DECEA;
- d) avaliar a implementação das camadas de redundância nos sistemas elétricos que energizam os *data centers* das diferentes subestações que compõem o SISCEAB, identificando como cada camada foi implementada e seu impacto na segurança e confiabilidade das operações aéreas no Brasil.
- e) aplicar os conceitos e critérios normativos estudados em um estudo de caso de uma subestação elétrica de consumidor pertencente ao SISCEAB, analisando sua arquitetura elétrica, os níveis de redundância adotados e sua aderência aos requisitos de confiabilidade e continuidade operacional.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos. Após a introdução, apresentada no Capítulo 1, o Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica, na qual são abordados os conceitos relacionados às subestações elétricas, com ênfase nas subestações de cargas críticas e em seus principais equipamentos, bem como as normas aplicáveis às redundâncias nos sistemas de energia de *data centers*. Adicionalmente, são apresentados os requisitos normativos do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), fundamentados nos conceitos do *Uptime Institute* relacionados à redundância em *data centers*.

No Capítulo 3, é apresentado o estudo de caso da subestação instalada no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Morro da Igreja, descrevendo seus principais equipamentos, a configuração de alimentação elétrica e as soluções de redundância adotadas para garantir o funcionamento das cargas críticas. O capítulo também apresenta uma proposta inicial de análise de confiabilidade, desenvolvida por meio de um código em *Python*, utilizado como ferramenta para avaliação dos caminhos de alimentação, com possibilidade de aprimoramento em etapas futuras do trabalho.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta a conclusão do trabalho, reunindo as principais observações e resultados obtidos a partir das análises realizadas, além de sugestões para o aprimoramento e continuidade do estudo. Após a conclusão, são apresentadas as referências bibliográficas, contendo livros, documentos técnicos, normas e demais fontes consultadas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo fornecer o suporte conceitual e técnico necessário para a análise da redundância elétrica em subestações destinadas a cargas críticas, como data centers e unidades do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Ela constitui a base para a metodologia adotada e para o estudo de caso apresentado no capítulo 4, garantindo consistência acadêmica e prática.

Inicialmente, são abordados os conceitos de subestações de consumidor, incluindo suas formas construtivas, unidades consumidoras em média e alta tensão e os componentes essenciais, como transformadores, disjuntores, seccionadoras, painéis de média e baixa tensão, geradores e sistemas de alimentação ininterrupta (UPS). Destaca-se a importância da redundância elétrica, detalhando diferentes topologias (N+1, 2N e variantes), caminhos alternativos de alimentação e dispositivos de proteção, fundamentais para reduzir falhas sistêmicas e assegurar continuidade operacional.

Em seguida, apresentam-se os conceitos relacionados a data centers, sua classificação e arquitetura, considerando normas técnicas aplicáveis, como a NBR ISO/IEC 22237-1:2023, *Uptime Institute* (Tier I–IV), *Telecommunications Industry Association* (TIA-942), ANSI/BICSI e a Instrução do Comando da Aeronáutica ICA 66-36 (DECEA, 2019). Esses padrões estabelecem critérios para a configuração de sistemas elétricos redundantes e infraestrutura confiável, garantindo operação contínua de serviços críticos, como controle de tráfego aéreo.

A fundamentação também aborda a utilidade do esquema unifilar para análise da topologia da subestação, permitindo identificar elementos, caminhos redundantes e interligações críticas. Essa representação é essencial para compreender a organização da rede, localizar pontos vulneráveis e apoiar a modelagem de cenários de falha.

Por fim, são apresentados os métodos de confiabilidade e disponibilidade, incluindo indicadores clássicos (MTBF, MTTR e função de confiabilidade) e métodos probabilísticos, com destaque para a Simulação de Monte Carlo, que permitem estimar o comportamento do sistema frente a falhas aleatórias. Esses conceitos e métodos formam a base para o estudo de caso da subestação do DTCEA-MDI, integrando análise documental, modelagem computacional em *Python* e simulações

probabilísticas, assegurando uma visão robusta e sistêmica da confiabilidade elétrica aplicada a cargas críticas.

2.1 Subestações

A eficiência de um sistema de potência reside na interação equilibrada entre seus três segmentos essenciais: geração, transmissão e distribuição. A energia gerada precisa ser transportada e distribuída até o consumidor final. Para isso, subestações são imprescindíveis em cada segmento.

Todo sistema de potência é constituído de três diferentes segmentos: geração, transmissão e distribuição. Para que a energia gerada no primeiro segmento chegue ao seu destino final, que é o consumidor que está ligado no sistema de distribuição, é necessário também que exista em cada um desses segmentos uma subestação que possa elevar e reduzir a tensão em diferentes níveis (Mamede Filho, 2021, p. 11).

Uma subestação é composta por um conjunto de equipamentos interconectados que têm como objetivo controlar o fluxo de energia, modificar os níveis de tensão e corrente elétrica, além de fornecer proteção e controle ao Sistema Elétrico de Potência (SEP). Na verdade, pode-se afirmar que uma subestação desempenha um papel crucial no SEP, pois atua como um ponto de encontro entre as linhas de transmissão e distribuição de energia. Em essência, as principais funções de uma subestação são transformação, regulação e chaveamento (Carleto, 2017).

A subestação de energia elétrica, seja estação geradora ou transmissão e distribuição, continua sendo um dos campos mais desafiadores e emocionantes da engenharia de energia elétrica. Desenvolvimentos tecnológicos recentes tiveram um impacto tremendo em todos os aspectos do projeto e operação de subestações. (McDonald, 2011, p. 7)

Carleto (2017), ainda descreve que as subestações são responsáveis pela distribuição da energia elétrica. A eletricidade gerada nas usinas percorre um sistema de transmissão que inclui essas estações, onde transformadores ajustam a tensão, aumentando-a ou diminuindo-a conforme necessário. Para que a energia chegue às residências e estabelecimentos comerciais de forma segura, ela passa por transformadores menores instalados nos postes das ruas, que diminuem ainda mais a tensão. Todo esse processo é parte de um grande e complexo sistema composto por subestações, linhas de transmissão e usinas.

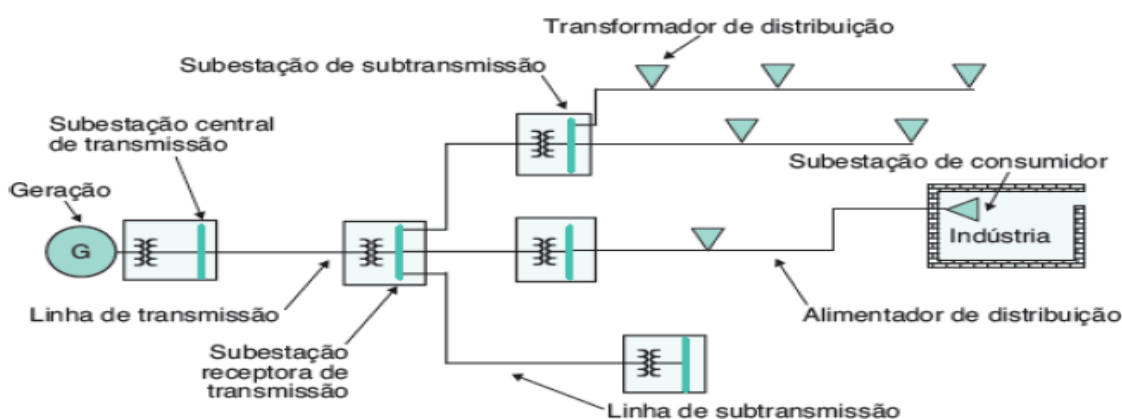
Subestação pode ainda ser conceituada de acordo com o procedimento de distribuição módulo 1 (ANEEL, 2021) como parte do sistema de potência que compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios, abrangendo as obras civis e estruturas de montagem.

De acordo com Mamede Filho (2021), as subestações podem ser classificadas por suas funções sendo central de transmissão, receptora de transmissão, subtransmissão e de consumidor.

Uma subestação de consumidor é alimentada por alimentadores de distribuição primária provenientes de subestações de subtransmissão, que fornecem energia diretamente aos pontos finais de consumo. Essas subestações podem ser classificadas como industriais, quando situadas em áreas industriais; comerciais, quando localizadas em empreendimentos comerciais como shoppings e edifícios de escritórios; e residenciais, quando instaladas em prédios destinados à moradia (Mamede Filho, 2021).

A Figura 1 mostra o caminho da energia desde a geração até a chegada nas subestações de consumidor.

Figura 1 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.



Fonte: Mamede Filho (2021).

2.1.1 Nível de Tensão de Conexão ao Sistema Elétrico

A resolução normativa 1000 (ANEEL, 2021), dispõe que a distribuidora deve determinar o grupo e o nível de tensão de conexão ao sistema elétrico para as unidades consumidoras, definindo que:

a) para o Grupo A, se a carga ou a potência instalada de geração na unidade consumidora forem maiores que 75 kW e a maior demanda a ser contratada for menor ou igual a 2.500 kW, tensão maior ou igual a 2,3 kV e menor que 69 kV

b) Para o Grupo A, se a maior demanda a ser contratada for maior que 2.500 kW, tensão maior ou igual a 69 kV.

De acordo com o PRODIST (Procedimentos de Distribuição) Módulo 1 (ANEEL, 2021), unidade consumidora pode ser definida como um conjunto composto por instalações, ramal de entrada, equipamentos elétricos, condutores, acessórios e, no caso de conexão em tensão maior ou igual a 2,3 kV, a subestação, sendo caracterizado por:

- a) recebimento de energia elétrica em apenas um ponto de conexão;
- b) medição individualizada;
- c) pertencente a um único consumidor; e
- d) localizado em um mesmo imóvel ou em imóveis contíguos.

2.1.2 Subestação de Consumidor de acordo com a Forma Construtiva.

Segundo Barros e Gedra (2018), as subestações de consumidor podem ser conectadas em tensão menor, igual ou superior a 69 kV. As subestações com tensões menores que 69 kV dividem-se, basicamente, em dois tipos: simplificadas e convencionais.

As subestações simplificadas podem ser de uso interno ou externo e a sua forma construtiva pode ser de alvenaria, blindada ou do tipo poste. Destaca-se que esse modelo de subestação é aplicado para potência máxima de 300 kVA.

Ainda de acordo com Barros e Gedra (2018), as subestações convencionais são adaptadas para potências maiores podendo ser previsto um ou mais cubículos e sua forma construtiva pode ser de alvenaria ou blindada.

De acordo com Mamede Filho (2021), existe grande quantidade de tipos construtivos de subestações de média tensão, ou seja, são aquelas que se aplicam a pequenos e médios empreendimentos industriais, comerciais e residenciais cuja demanda máxima contratada não supere o valor exigido pela legislação, cujo limite é de 2500 kW e ainda descrevem que:

- a) as subestações mais comumente utilizadas são, subestação abrigada em alvenaria, Subestações de instalação ao tempo e Subestações blindadas.
- b) a escolha do tipo da subestação a ser adotada depende de muitos fatores, entre eles a disponibilidade de espaço na área do empreendimento e grandeza da carga a ser suprida pela subestação.

2.1.2.1 Subestação Abrigada

São aquelas cujos equipamentos são instalados no interior de uma edificação normalmente feita com estrutura de concreto armado. Nesse tipo de subestação todos os equipamentos são instalados no interior de uma construção que pode ser totalmente fechada com ventilação ou parcialmente fechada (Mamede filho, 2021).

2.1.2.2 Subestação Blindada

De acordo com Ferreira e Gedra (2018), São unidades blindadas desenvolvidas para uso em entradas consumidoras, exigindo a aprovação prévia do projeto pela distribuidora de energia elétrica local. Essas unidades se destacam por alojar seus equipamentos e montagens eletromecânicas em cubículos construídos com chapas de aço, com a instalação sendo feita de maneira subterrânea.

2.1.3 Equipamentos de uma Subestação

A subestação é crucial para garantir que as instalações recebam a energia elétrica necessária de forma eficiente e segura. Ela deve proporcionar segurança ao sistema, aos equipamentos e aos profissionais.

A subestação deve atender às necessidades de fornecimento de energia elétrica das instalações por ela alimentadas, permitindo sempre a flexibilidade de manobras, a acessibilidade para manutenções, a confiabilidade quanto a proteção e a operação, e a segurança para o sistema, equipamentos e para os profissionais envolvidos em suas tarefas (Barros, Borelli, Gedra, 2014, p. 40).

Quando da exigência normativa, cabe ao responsável pela unidade consumidora, em qualquer ponto de ligação, construir uma subestação que receba a energia elétrica no nível de tensão contratado e realize os processos de transformação necessários para alcançar a tensão de utilização (Barros, Borelli, Gedra, 2014).

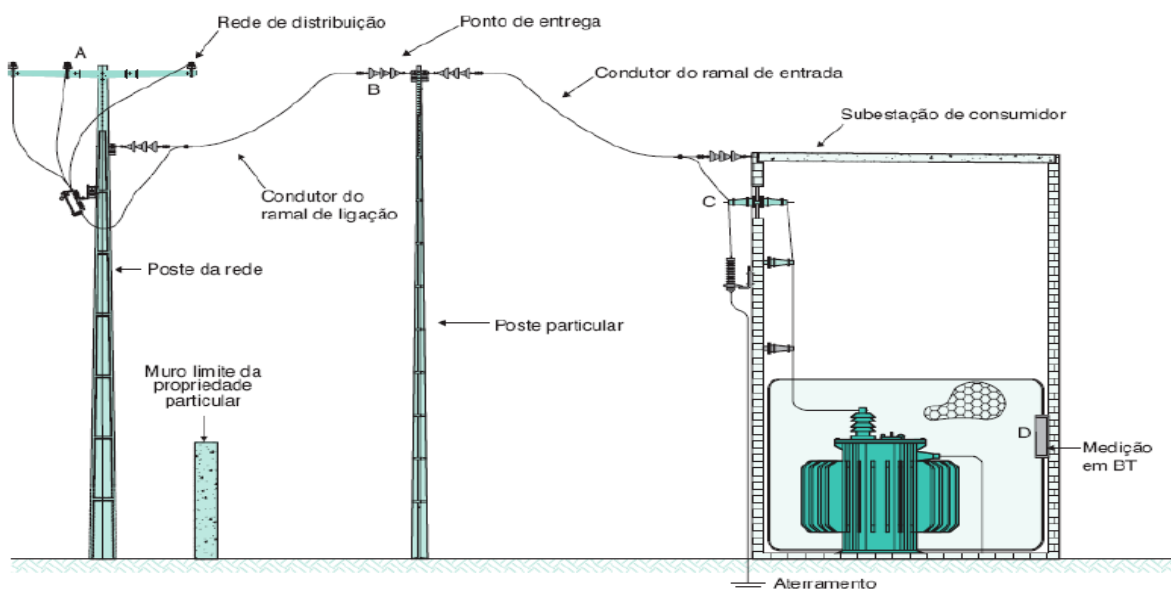
Para que o processo de rebaixamento da classe de tensão seja realizado, é necessário que as subestações possuam equipamentos eletromecânicos que garantam a segurança do sistema e das pessoas envolvidas.

Barros, Borelli, Gedra (2014), destacam alguns dos principais tipos de equipamentos utilizados nas subestações de média e alta tensão entre esses:

2.1.3.1 Ramal de Entrada

A Figura 2, tem como objetivo demonstrar que ramal de entrada é o conjunto de condutores, com os respectivos materiais necessários para sua fixação, que interligam o ponto de entrega da transmissora ou distribuidora aos terminais de entrada da subestação, podendo ser aéreo ou subterrâneo.

Figura 2 - Entrada de serviço de uma unidade consumidora de alta-tensão.



Fonte: Mamede Filho (2021).

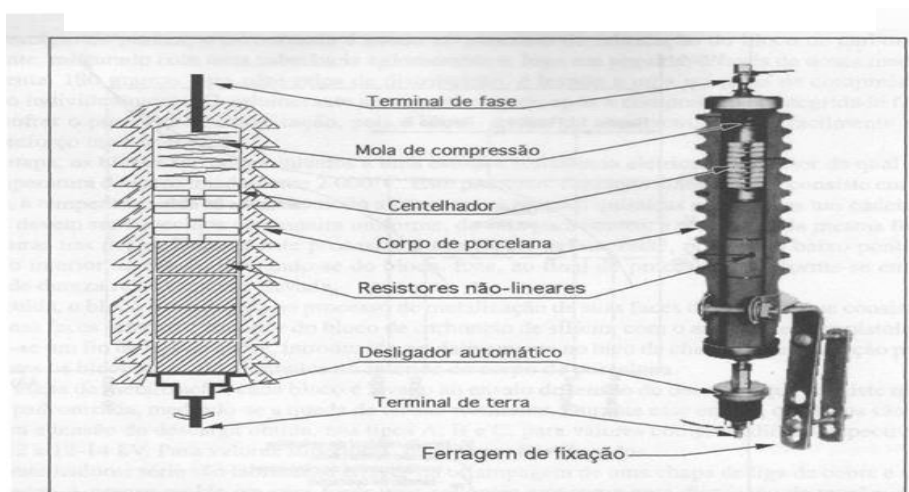
2.1.3.2 Para-Raios

As instalações e equipamentos pertencentes às subestações são vulneráveis às variações provocadas por descargas elétricas atmosféricas quando

estas atingem o sistema, provocando elevação e ou afundamento de tensão e sobrecorrente, entre outras anomalias, podendo ocasionar a avaria de equipamentos. Por esse motivo, é importante e necessária a proteção das instalações e dos equipamentos contra estes eventos.

De acordo com a NBR 14039 (ABNT, 2003), as sobretensões nas instalações elétricas de média tensão não devem comprometer a segurança das pessoas, nem a integridade das próprias instalações e dos equipamentos servidos, dessa forma, o uso adequado de para-raios, Figura 3, de resistência não linear é considerado uma medida de proteção contra sobretensão de origem atmosférica.

Figura 3 - Detalhes construtivos dos para-raios de distribuição.



Fonte: Mamede Filho (2004).

2.1.3.3 Chave Disjuntora.

A chave disjuntora, ou disjuntor, conforme Figura 4, é um equipamento eletromecânico destinado a interromper correntes elétricas de um circuito em condições normais de operação ou quando na ocorrência de curto-circuito, sobrecorrentes ou anomalias existentes no sistema. O disjuntor permite que seja feita essa interrupção, mesmo com elevadas correntes, controlando a ocorrência de arcos elétricos, de tal forma a não causar nenhum dano.

Figura 4 - Disjuntor de média tensão



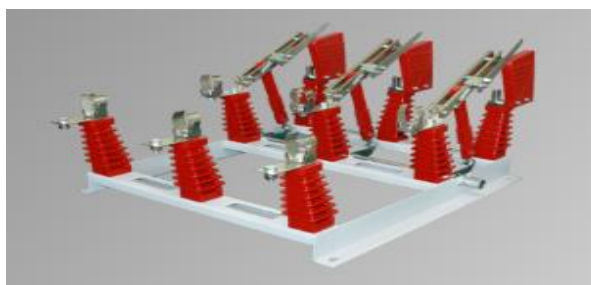
Fonte: WEG (2024).

2.1.3.4 Chave Seccionadora.

Chaves seccionadoras são dispositivos eletromecânicos destinados a realizar manobras de abertura e fechamento de um circuito elétrico sem carga, ou seja, sem corrente elétrica. Quanto ao aspecto construtivo as seccionadoras podem ser unipolares ou tripolares.

Na Figura 5, é apresentada uma seccionadora de média tensão de energia elétrica, componente fundamental para o controle e a segurança em sistemas de distribuição de energia. Este equipamento é utilizado para isolar seções do circuito elétrico, permitindo a realização de manutenções.

Figura 5 - Chave seccionadora tripolar



Fonte: Rehtom (2025).

2.1.3.5 Transformadores

Para que a subestação cumpra seu principal papel de alterar valores de tensão são utilizados os transformadores. Transformador é uma máquina estática que,

por meio de indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um circuito (primário) para outros circuitos (secundários e/ou terciários) mantendo a mesma frequência, mas geralmente com valores de tensão e corrente diferentes (Barros, Borelli, Gedra, 2014).

Na Figura 6, é apresentado um transformador normalmente instalado em uma subestação elétrica de consumidor. Esse equipamento desempenha papel crucial na adequação dos níveis de tensão elétrica. Projetado para operar com elevados índices de eficiência e confiabilidade, constitui um dos principais componentes das subestações de consumidores, sendo responsável por transformar a tensão que alimentará os *data centers*.

Figura 6 - Transformador de Força



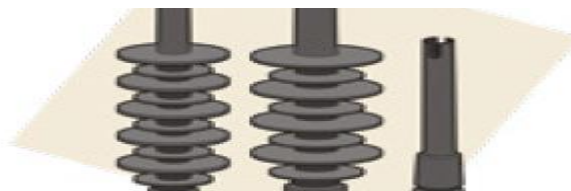
Fonte: I-Tensão (2024).

2.1.3.6 Muflas

Carleto (2017), destaca que são utilizadas para manter as condições de isolamento elétrico nas conexões entre cabos, condutores e barramentos. Esse item é essencial nas instalações de uma subestação devido à complexidade da isolação em um SEP. Basicamente, existem dois tipos de muflas, as de porcelana e as poliméricas.

Esses dispositivos são essenciais para garantir conexões seguras e confiáveis em instalações elétricas, protegendo as emendas dos fios contra umidade, poeira e outros agentes externos. As muflas são frequentemente empregadas em ambientes industriais, comerciais e residenciais, onde a segurança elétrica é uma prioridade, conforme e Figura 7.

Figura 7 - Mufla



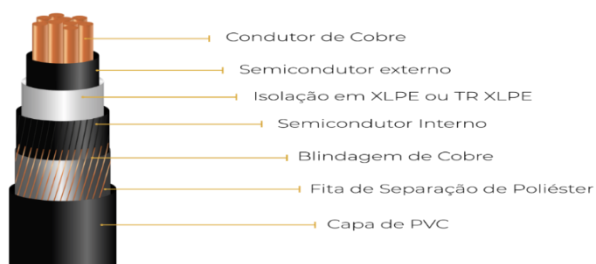
Fonte: Carleto (2018).

2.1.3.7 Cabos

são indicados para instalações elétricas que operem em média tensão, como o nome já entrega. A categorização é definida de acordo com a norma NBR 14039, que considera instalações elétricas de média tensão as tensões nominais entre 1,0 kV a 36,2 kV (CONDUSCAMP, 2024).

É apresentado um cabo elétrico, na Figura 8, utilizado em sistemas industriais e outras aplicações complexas. Este cabo é fundamental para a transmissão de energia elétrica, garantindo o funcionamento eficiente e seguro de equipamentos e infraestrutura.

Figura 8 - Cabo de média tensão



Fonte: Mesh engenharia.

2.1.3.8 Barramentos

A função do barramento é interligar os circuitos e os equipamentos existentes na subestação. A sua composição física deve atender as especificações técnicas do circuito e suportar os esforços de tração impostos pela estrutura da subestação (Carleto, 2018).

A Figura 9 mostra um barramento de energia elétrica, um componente fundamental para a distribuição de eletricidade. Este dispositivo é crucial para a condução e distribuição de corrente elétrica entre diferentes partes de uma instalação,

Figura 9 - Barramento de média tensão



Fonte: Freepik (2024).

2.1.4 Equipamentos de Proteção das Subestações Elétricas.

Em uma subestação alguns dispositivos têm a função de atuar de forma coordenada para a proteção dos sistemas elétricos, e conforme (Barros e Gedra 2018). Esses equipamentos são:

- a) transformadores para instrumentos;
- b) disjuntores;
- c) relés;
- d) fusíveis.

2.2 Data Center

Segundo a norma *ANSI/BICSI-002 (BICSI, 2019)* um *data center* pode ser considerado um edifício ou parte de um edifício, com a função principal de abrigar uma sala de computador e sua área suporte.

Data centers são conhecidos como ambientes de missão crítica, responsáveis por armazenarem diversas estruturas e equipamentos, destinados ao processamento, armazenamento e proteção das informações vitais para a sequência dos negócios e, conseqüentemente, da continuidade das operações de uma organização (Marin, 2011).

Apesar de o termo *datacenter* ser usado, na maioria das vezes, para se referir aos espaços onde os equipamentos críticos de TI estão instalados, um *data center* é a infraestrutura do site como um todo. O espaço especificamente usado para abrigar os equipamentos críticos de TI é denominado sala de equipamentos ou sala de computadores (Marin, 2011, p. 19).

Um *data center* é uma instalação usada para abrigar sistemas de computador e componentes associados, como sistemas de telecomunicações e armazenamento. Geralmente inclui fontes de alimentação redundantes ou de *backup*, conexões de comunicação de dados redundantes, controles ambientais (por exemplo, ar condicionado, supressão de incêndio) e vários dispositivos de segurança (Ghorpade, 2024)

Conforme Marin (2011), os *data centers* atuais podem ser comparados aos antigos centros de processamento de dados, embora a densidade de equipamentos ativos e críticos de tecnologia da informação nas instalações modernas seja maior do que a encontrada nos antigos Centrais de Processamentos de Dados (CPD) assim, os *data centers* compreendem:

- a) sala de computadores;
- b) ar condicionado e controle ambiental;
- c) automação do edifício;
- d) detecção e supressão de incêndios;
- e) segurança e controle;
- f) distribuição elétricas e UPS (*Uninterruptible Power Supply*), entre outros.

2.2.1 Classificação de Infraestrutura de um *Data Center*

A classificação da infraestrutura de um *data center* é fundamental para estabelecer métricas que auxiliem projetistas e usuários a mensurar seu desempenho, disponibilidade e confiabilidade. Essas classificações são essenciais, pois oferecem referências e orientações para alcançar o menor *downtime* (tempo em que o sistema permanece inativo) possível (Francalossi Junior, 2015).

Um *data center*, por ser um ambiente de missão crítica, deve ser instalado de maneira a operar com níveis de disponibilidade próximos a 100%. Isso significa que, mesmo em situações de falhas de hardware ou interrupções no fornecimento de energia, deve haver garantia de continuidade dos serviços. Ele é principalmente

avaliado por suas características de disponibilidade, confiabilidade e redundância (Marin, 2011).

De acordo com o que foi estabelecido pelo *The Uptime Institute*, a classificação tem como objetivo oferecer aos envolvidos no projeto e na gestão de *data centers* uma referência para identificar o desempenho das topologias de projetos de infraestrutura de fornecimento de energia elétrica entre outros (Franalossi Junior, 2015).

2.2.1.1 Disponibilidade

De acordo com Marin (2011), a disponibilidade de um sistema pode ser calculada conforme a Equação (1), sendo definida como a razão entre o tempo em que o sistema permanece em operação e o tempo total em que deveria estar operando. Destaca-se, ainda, a Equação (2), que representa o *Mean Time Between Failures* (MTBF), parâmetro fundamental para a análise de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas.

Como exemplificação do conceito podemos considerar a seguinte situação. Um *data center* teve um tempo de parada para manutenção preventiva de cinco horas, período de 100 dias:

Tempo de operação esperado = 100 dias (2400 horas)

Tempo de indisponibilidade = 5 horas

Tempo de operação = 2400-5 = 2395h

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{\text{tempo do sistema em operação}}{\text{tempo total em que o sistema existe entre falhas}} \quad (1)$$

$$\text{MTBF} = \frac{(\text{Tempo total} - \text{Tempo perdido})}{\text{Quantidade de paradas}} \quad (2)$$

Onde:

MTBF= tempo médio entre falhas;

MTTR= tempo médio de reparo.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{2395}{2400} = 99,79\%$$

O ideal é que a disponibilidade de um *data center* seja de no mínimo 99,9% ("três noves"), o que significa um *downtime* de 8,76 horas ao longo de um ano. No geral o valor mínimo de disponibilidade deve ser de 99,67% (Marin, 2011)

Para identificar a garantia de disponibilidade oferecida por um provedor de *data center*, é importante verificar a certificação *tier* que ele possui. Esta certificação varia de I a IV, sendo a IV a mais avançada (ODATA, 2024)

E, assim, os níveis da certificação se referem aos seguintes percentuais de *Uptime*:

- a) **Tier I** – 99,671% – em torno de 28,8 horas de *downtime* em um ano;
- b) **Tier II** – 99,741% – cerca de 22 horas de *downtime* em um ano;
- c) **Tier III** – 99,982% – por volta de 1,5 horas de *downtime* em um ano;
- d) **Tier IV**- 99,995% – em torno de 26.3 minutos de *downtime* em um ano.

Destaca-se que para sistemas híbridos, série ou paralelo a formulação se apresenta de forma mais complexa que a exemplificada acima.

2.2.1.2 Confiabilidade

A confiabilidade geralmente se refere a um componente ou subsistema e é definida como a probabilidade de um dispositivo ou sistema executar sua função programada por um período específico de tempo. A confiabilidade deve ser calculada estatisticamente. (ABB, 2024)

De acordo com *Asea Brown Boveri*, ABB (2024), dentro de um *data center*, há três tipos gerais ou classes de confiabilidade:

Confiabilidade dos componentes – a confiabilidade de cada peça física individual do hardware no *data center*.

Confiabilidade do sistema elétrico – a confiabilidade geral de todos os componentes e de suas interconexões que gerenciam a eletricidade da rua até o servidor.

Confiabilidade do processo – se relaciona aos processos nos *data centers*, incluindo o sistema de climatização e outros sistemas relacionados à infraestrutura.

Como informa Marin (2011), a confiabilidade pode ser compreendida como a distribuição do tempo entre falhas de um sistema ou de seus componentes sendo normalmente especificada pelo tempo médio entre falhas. Um sistema altamente confiável contém muitos componentes confiáveis que, juntos, formam um sistema robusto.

Dessa forma, a confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema operar sem falhas durante um período específico de horas (t), conforme Equação 3.

$$\text{Confiabilidade} = e^{-\frac{t}{\text{MTBF}}} \quad (3)$$

Onde:

t = tempo em horas;

MTBF= tempo médio entre falhas, em horas.

2.2.1.3 Redundância

A redundância em um *data center* envolve a duplicação de equipamentos críticos que realizam a mesma função. Se um equipamento falhar, outro automaticamente assume sua função. O objetivo é evitar que problemas com equipamentos ou falhas no fornecimento de energia interrompam o funcionamento do *data center*, prevenindo os chamados “*downtimes*”. Aumentar o número de camadas de repetição eleva a redundância do *data center*, melhorando sua confiabilidade e protegendo-o contra falhas e paralisações inesperadas. (Zeittec, 2024)

De acordo com ODATA (2024) A redundância de *data centers* é fundamental para garantir que a rede corporativa de qualquer organização funcione de maneira segura, eficiente e sem interrupções. A indisponibilidade de serviços pode afetar diretamente a estabilidade da instituição, a produtividade e a segurança das informações.

Segundo a *Uptime Institute* e a *Telecommunications Industry Association* (TIA) , o projeto de um *data center* é frequentemente classificado usando um sistema de quatro níveis baseada na distribuição de energia, fonte de alimentação ininterrupta (UPS), fornecimento de resfriamento e redundância do centro de dados.

Como informa Marin (2011, p. 41), a redundância:

em *data center* pode ser entendida como a duplicidade de partes, módulos, encaminhamentos, componentes e sistemas com a finalidade de evitar ao *downtime* (tempo de parada) seja for falas técnicas, falhas humanas, manutenção preventiva ou corretiva.

O objetivo da classificação, de acordo com o que foi estabelecido pelo *The Uptime Institute*, é oferecer aos envolvidos com projeto e gerências de *data centers*, uma referência para identificação de desempenho das topologias de projetos de infraestrutura de climatização e fornecimento de energia elétrica.

2.3 Normas para Classificação de *Data Centers*

Marin (2011), o *The Uptime Institute* desenvolveu a classificação de *data centers* em *tiers* (camadas), categorizando a infraestrutura com base em suas características de redundância e tolerância a falhas. A partir desse conceito, outras instituições passaram a adotar esse sistema ou variações dele para classificar *data centers*, Veras (2011) complementa dizendo que o *Uptime Institute* não especifica detalhes de projeto. A criticidade deve ser sempre obedecida em todos os critérios especificados.

Veras (2011), ainda destaca que a norma TIA 942 permite definir o nível de criticidade de um *data center* sendo a norma, sem dúvida, padrão mais utilizada para classificação de *data centers* no mundo, pois indica os requisitos desde a construção até a pronta ativação.

Por sua vez, Marin (2011) explica que existem outras normas para infraestrutura de *data center*, como a TIA-492, a qual aplica originalmente os conceitos desenvolvidos pelo *The Uptime Institute*.

A NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023a) define uma série de princípios gerais fundamentais para o *design*, construção e operação eficiente de *data centers*. Esses princípios abrangem uma variedade de aspectos, desde a infraestrutura física até a eficiência operacional e a sustentabilidade.

Conforme Clarity (2024), a NBR ISO/IEC 22237 (ANBT, 2023a) define classificações de disponibilidade para *data centers* em quatro níveis, que vão de 1 a 4. Essas classificações, baseadas na estrutura, redundância e capacidades

operacionais do *data center*, refletem a capacidade progressiva de um *data center* de funcionar sem interrupções significativas.

2.3.1 Classificação *Uptime Institute Tiers*

Existem diferentes *tiers* que classificam a disponibilidade necessária de um sistema. Essas classificações servem como métodos para comparar o desempenho de uma infraestrutura com outra.

2.3.1.1 *Data Center Tier I- Infraestrutura Básica*

Um *data center tier I* básico conta com componentes de capacidade sem redundância e um único caminho de distribuição, também não redundante, para suportar o ambiente crítico. A infraestrutura tier I compreende: um espaço exclusivo para sistemas de TI; uma *Uninterruptible Power Supply (UPS)* para filtrar picos, flutuações e interrupções momentâneas de energia; equipamentos de refrigeração dedicados e a capacidade de produção de energia no local (como geradores ou células de combustível) para proteger as operações de TI contra quedas prolongadas de energia (*Uptime Institute*, 2024)

2.3.1.2 *Data Center Tier II- Componentes Redundantes*

Embora possua componentes redundantes, este sistema depende de uma única infraestrutura de distribuição de energia e ar condicionado sem quaisquer redundâncias para suportar cargas críticas. Como resultado, o sistema é vulnerável a interrupções causadas por atividades programadas ou causas acidentais. Erros operacionais e falhas em subsistemas ou componentes da infraestrutura podem, portanto, levar a interrupções em sua operação. (Marin, 2011)

2.3.1.3 *Data Center Tier III- Manutenção e Operação Simultânea*

Os centros de dados possuem um meio ativo e uma alternativa para a distribuição de serviços. Cada rota contém elementos duplicados e podem ser

mantidos ao mesmo tempo. Juntos, eles garantem que a manutenção seja realizada sem interferência (Barroso, Hölzle, Ranganathan, 2019)

De acordo com o *The Uptime Institute*, um *data center* com manutenção simultânea possui partes com capacidade redundante e diversos caminhos independentes de distribuição para garantir a estabilidade do ambiente crítico. Embora um único caminho seja suficiente para atender às necessidades do ambiente crítico em relação à rede principal de energia elétrica e ao percurso mecânico de entrega. A rede principal de energia elétrica inclui o trajeto pelo qual a energia é distribuída, desde sua origem no sistema gerador (como um grupo ou célula de combustível) até chegar à *Uninterruptible Power Supply (UPS)* utilizada aos equipamentos críticos.

2.3.1.4 Data Center Tier IV- Tolerante a falhas

Segundo Marin (2011), um *data center* tolerante a falhas tem vários caminhos de sistemas independentes isolados com componentes redundantes, além de diversos caminhos independentes para distribuição que atendem simultaneamente os equipamentos críticos.

Um *data center* tolerante a falhas é equipado com múltiplos sistemas fisicamente isolados que fornecem componentes de capacidade redundantes e vários caminhos de distribuição ativos. Esses recursos trabalham juntos para garantir um ambiente crítico em pleno funcionamento no caso de qualquer falha de infraestrutura, configurando componentes de capacidade redundantes e diversos caminhos de distribuição capazes de fornecer energia e resfriamento. (*Uptime Institute*, 2024)

2.3.2 Classificação ANSI/TIA-942

Especifica os requisitos para a infraestrutura em *data centers*, cobrindo aspectos essenciais para a redundância e confiabilidade das operações. Sistemas elétricos com fontes de alimentação redundantes e ininterruptas são detalhados, assim como outros sistemas.

2.3.2.1 Data Center tipo “N” - Requisito Base-Tier 1

Um sistema tipo “N” é considerado básico e não possui redundância. Atende apenas aos requisitos básicos. (Marin, 2011).

2.3.2.2 Data Center com Redundância N+1- Tier 2

De acordo com a TIA-942 A redundância N+1 fornece uma unidade adicional, módulo, caminho ou sistema, além do mínimo necessário para satisfazer o requisito base. A falha ou manutenção de qualquer unidade, módulo ou caminho não interromperá as operações.

2.3.2.3 Data Center com Redundância N+2- Tier 3

A redundância N+2 fornece duas unidades adicionais, módulos, caminhos ou sistemas, além do mínimo necessário para satisfazer o requisito base. A falha ou manutenção de quaisquer duas unidades, módulos ou caminhos únicos não interromperá as operações (TIA-492).

2.3.2.4 Data Center com Redundância 2N- Tier 4

A redundância 2N oferece dois módulos, caminhos ou sistemas para cada módulo necessário para um site básico. A falha ou a manutenção de uma unidade, modulo, encaminhamento ou sistema não causam a interrupção das operações. (Marin, 2011).

2.3.2.5 Data Center Redundância 2(N+1) - Tier 4

A redundância 2(N+1) oferece duas unidades completas de módulos, caminhos ou sistemas. Em caso de falha ou manutenção em uma unidade, módulo ou caminho. A redundância será fornecida e as operações não serão interrompidas (TIA-492).

2.3.3 Classificações dos *Data Center* para Disponibilidade de Acordo com ANSI/BICSI-002.

Conforme Marin, 2011 os níveis operacionais são definidos em função do tempo de operação. Existem cinco classes operacionais sendo a mais baixa F0 e a mais alta F4.

2.3.4 Classificações dos *Data Center* para Disponibilidade de Acordo com NBR ISO/IEC 22237-23.

A NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023a), é um guia abrangente para o desenvolvimento de *data centers*, cobrindo desde a fase de concepção inicial até a operação e manutenção contínua. Seu objetivo é garantir que essas infraestruturas essenciais sejam projetadas e construídas para otimizar a disponibilidade, segurança e eficiência energética. Isso é vital em um contexto onde a dependência de dados e serviços digitais está crescendo rapidamente (Clarity, 2024)

Conforme a NBR ISO/IEC 22237 (ABNT, 2023a) pode verificar as seguintes classes:

Classe 1: Representa o nível mais fundamental de disponibilidade, contando com uma única distribuição e sem elementos redundantes. É apropriado para operações que podem tolerar interrupções.

Classe 2: Incorpora componentes redundantes em um único caminho de distribuição, mitigando o risco de interrupções devido a falhas de um único componente.

Classe 3: Disponibiliza múltiplas vias de distribuição, com apenas uma ativa e componentes redundantes, ideal para operações que requerem alta disponibilidade.

Classe 4: Maior disponibilidade, com diversas vias de distribuição ativas e redundância de componentes, garante a operação ininterrupta mesmo durante manutenções e falhas.

2.4 Subestações de Acordo com a ICA 66-36 (DECEA, 2019)

A referida Instrução do Comando da Aeronáutica busca definir critérios técnicos mínimos para a configuração de sistemas de energia, incluindo a capacidade de redundância, visando permitir a manutenção programada ou resposta a falhas sem

comprometer as cargas críticas que suportam as operações de controle do tráfego aéreo.

Para atender a esses requisitos, são necessárias condições mínimas de padronização da infraestrutura dos sistemas elétricos e, sobretudo, redundâncias de componentes para permitir a realização de manutenções programadas ou a correção de falhas sem interromper os serviços essenciais.

A Instrução do Comando da Aeronáutica ainda descreve que as cargas críticas são aquelas para as quais não é possível a interrupção do fornecimento de energia elétrica, sendo, portanto, alimentadas de forma ininterrupta.

A norma se baseia nos conceitos criado pelo *The Uptime Institute* como meio de avaliar efetivamente a infraestrutura das subestações que alimentam os *data centers* do SISCEAB em termos de disponibilidade esperada de sistemas (ICA 66-36).

De acordo com a ICA 66-36, as cargas críticas são alimentadas por fontes de energia contínuas, que podem ser alternadas, como as UPS, ou contínuas, como as unidades retificadoras.

Entre as cargas críticas definidas pelo SISCEAB estão vários equipamentos, muitos desses, em *data centers*, comumente chamados de salas técnicas. Dentre esses equipamentos destacam-se sistemas de canalização de dados, sistema de tratamento e visualização de dados (STVD) – estações de trabalho, servidores, roteadores, sistema de supervisão, comando e controle dos equipamentos elétricos que alimentam cargas críticas ou emergenciais, entre outros.

Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo, desempenham funções importantes, mas apresentam consequências distintas na prestação do serviço, quando expostos a problemas de disponibilidade de meios técnicos e operacionais. Dessa forma, procurou-se estabelecer uma correlação entre as arquiteturas das subestações com maior disponibilidade esperada e os destacamentos de controle de maior relevância tendo como base o anuário estatístico de tráfego aéreo, classe do destacamento de controle e índice de priorização dos aeródromos (ICA 66-36).

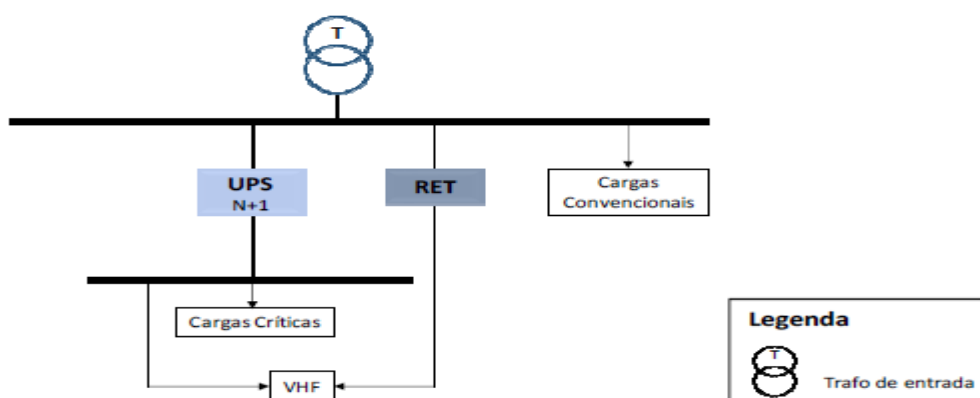
2.4.1 Subestação Tipo 0

De acordo com a ICA 66-36 (DECEA, 2019), a fonte principal de energia vem da rede de energia comercial em um único alimentador.

Modificador de entrada. A fonte reserva não existe e os bancos de baterias são projetados para terem uma maior autonomia.

A arquitetura de KF do tipo 0, ilustrada na Figura 10, é utilizada em projetos de modernização ou substituição de equipamentos de estações de telecomunicações instaladas em locais específicos, nos quais se leva em consideração o histórico de instabilidades no fornecimento de energia comercial. A entrada de energia comercial será composta por um transformador trifásico implantado em poste.

Figura 10 - Diagrama de blocos de KF tipo 0



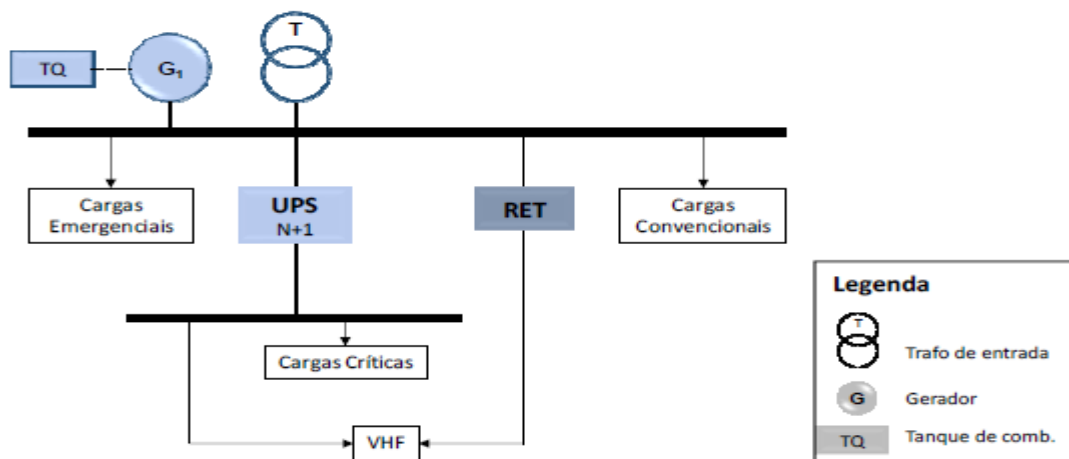
Fonte: DECEA, (2019).

A subestação será composta por *Uninterruptible Power Supply* (UPS), Banco de baterias, unidade retificadora, monitoramento por meio da unidade de gerenciamento de energia (UGE) e supervisão remota através do sistema de gerenciamento de energia (ICA 66-36, 2019).

2.4.2 Subestação Tipo I

A fonte principal é proveniente da rede de energia comercial, através de um único alimentador com transformador de entrada.

Figura 11 - Diagrama de blocos de KF tipo I



Fonte: DECEA, (2019).

A fonte de reserva é composta por um grupo gerador, alimentado por um único tanque de combustível. Normalmente, instaladas em locais com histórico de energia comercial instável.

Analisando a Figura 11 observa que a subestação do tipo I possui grupo gerador, UPS, banco de baterias, unidade retificadora. Deverá possuir ainda monitoramento por meio da unidade de gerenciamento de energia (UGE) e supervisão remota através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE).

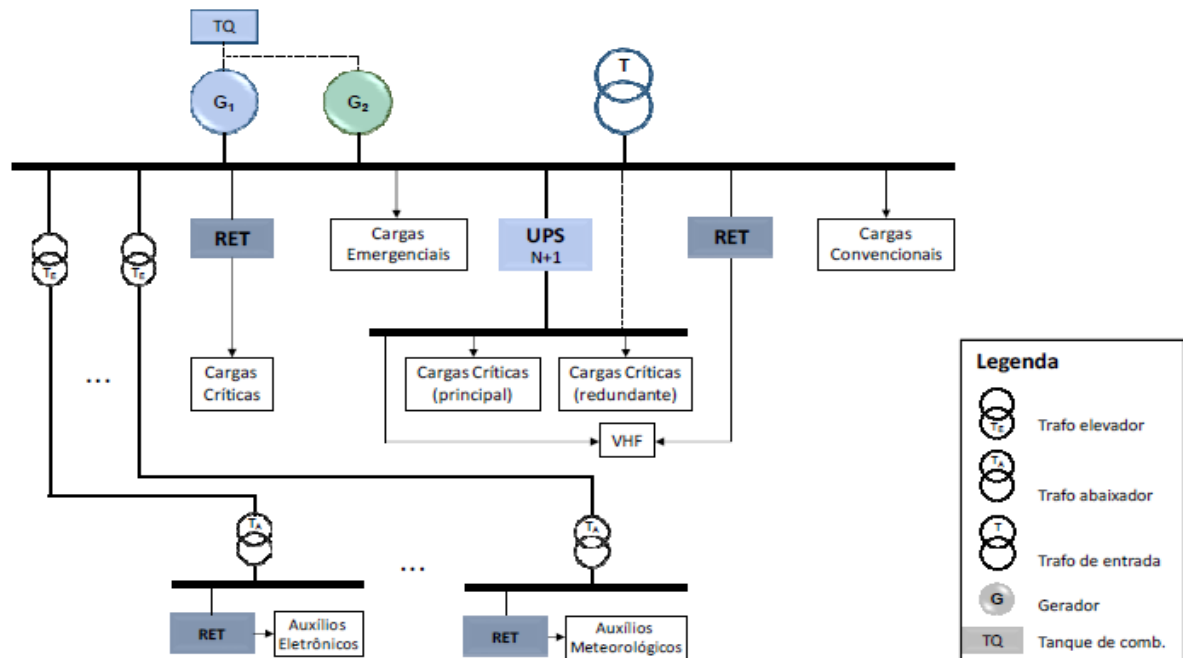
Observa-se certa redundância no sistema com a inclusão de grupo geradores e UPS N+1.

2.4.3 Subestação Tipo II- e II

A partir dessa arquitetura, Figura 12, observa-se mais facilmente o processo de redundância da subestação, pois segundo a ICA 66-36 (DECEA, 2019), descreve que a fonte principal é proveniente da rede de energia comercial em um único alimentador com um transformador de entrada. A fonte de reserva é composta por dois grupos geradores que são alimentados por um único tanque de combustível.

A arquitetura apresenta equipamentos com componentes redundantes para alimentar cargas críticas.

Figura 12 - Diagrama de blocos de KF tipo II- e II



Fonte: DECEA, (2019).

De acordo com a instrução do Comando da aeronáutica essa arquitetura deverá conter os seguintes equipamentos:

- a) grupos Geradores;
- b) unidades retificadas;
- c) UPS N+1;
- d) painel de transferência automática (PTA);
- e) relé de proteção;
- f) unidades de supervisão de corrente alternada (USCA);
- g) quadros de distribuição duplicados para as cargas ligadas à barra crítica
- h) banco de capacitores trifásico e automático;
- i) operação automatizada do PTA, por meio de unidade de gerenciamento de energia (UGE), permitindo ao sistema operar pela UGE e através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE);
- j) banco de baterias;
- k) etc.

Observa-se que para essa arquitetura o nível de exigência é alto. Essa arquitetura é aplicada a destacamentos de controle do espaço aéreo como os de Santa Maria, Canoas, Morro da Igreja entre outros.

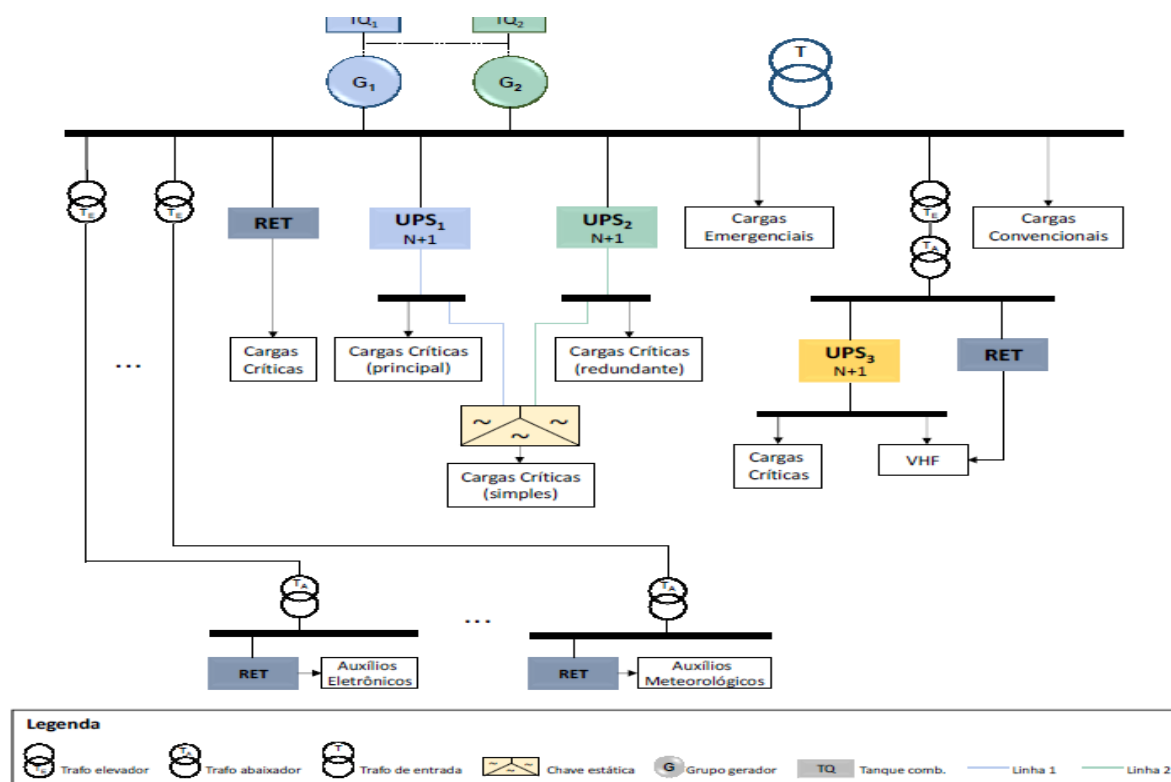
2.4.4 Subestação Tipo II+

De acordo com ICA 66-36 (DECEA, 2019), A fonte principal é proveniente da rede de energia comercial, através de um único alimentador com transformador de entrada. A fonte é composta por dois grupos geradores, com um tanque de combustível cada um. Esta arquitetura prevê uma divisão de equipamentos com componentes redundantes para a alimentação de cargas críticas.

Na figura 13, observa-se que a instrução do Comando da aeronáutica ICA 66-36 (DECEA, 2019) destaca os seguintes equipamentos nessa arquitetura.

- a) transformador a seco;
- b) dois grupos Geradores;
- c) duas unidades retificadas (N+1);
- d) duas UPS 2(N+1);
- e) painel de transferência automática (PTA);
- f) painel de Baixa Tensão Alimentado pelo (PTA)
- g) relé de proteção;
- h) chave estática
- i) unidades de supervisão de corrente alternada (USCA);
- j) quadros de distribuição duplicados para as cargas ligadas à barra crítica
- k) banco de capacitores trifásico e automático;
- l) operação automatizada do PTA, por meio de unidade de gerenciamento de energia (UGE), permitindo ao sistema operar pela UGE e através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE);
- m) duplo banco de baterias;
- n) etc.

Figura 13 - Diagrama de blocos de KF tipo II+



Fonte: DECEA, (2019).

Observa-se que para essa arquitetura o nível de exigência é alto. Essa arquitetura é aplicada a destacamentos de controle do espaço aéreo como os de Florianópolis, Belém, Fortaleza, entre outros.

2.4.5 Subestação Tipo III-

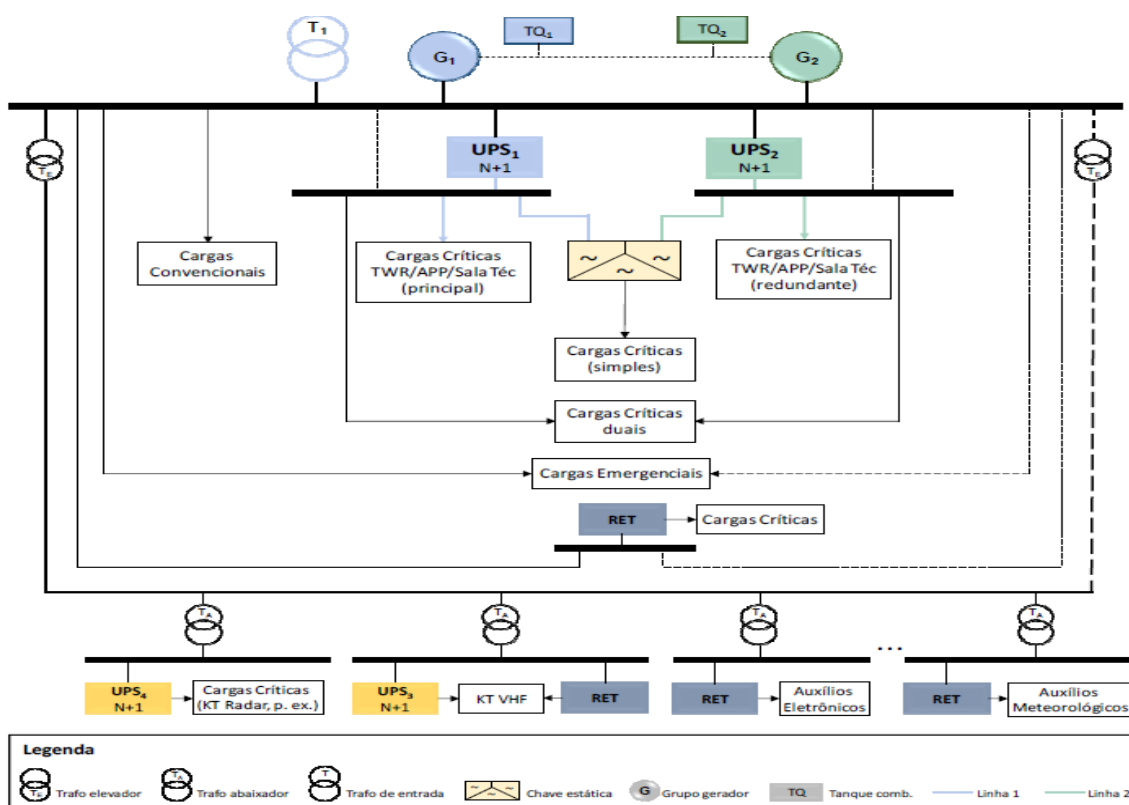
A fonte principal é proveniente da rede de energia comercial em um único alimentador com um transformador de entrada. A fonte de reserva é composta por dois grupos geradores com um tanque de combustível cada um. A arquitetura prevê uma variedade de equipamentos com componentes redundantes e uma variedade de caminhos de distribuição para alimentação das cargas críticas.

De acordo com a instrução do Comando da aeronáutica essa arquitetura deverá conter os seguintes equipamentos, conforme Figura 14:

- um transformador a seco;
- único ramal de entrada;
- dois grupos Geradores;

- d) duas unidades retificadas (N+1);
- e) duas UPS 2(N+1);
- f) painel de transferência automática (PTA);
- g) painel de Baixa Tensão Alimentado pelo (PTA)
- h) relé de proteção;
- i) uma chave estática
- j) unidades de supervisão de corrente alternada (USCA);
- k) quadros de distribuição duplicados para as cargas ligadas à barra crítica
- l) banco de capacitores trifásico e automático;
- m) operação automatizada do PTA, por meio de unidade de gerenciamento de energia (UGE), permitindo ao sistema operar pela UGE e através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE);
- n) duplo banco de baterias para UPS;
- o) dois tanques de combustível
- p) by pass entre tanques de combustíveis
- q) etc.

Figura 14 - Diagrama de blocos de KF tipo III-



Fonte: DECEA, (2019).

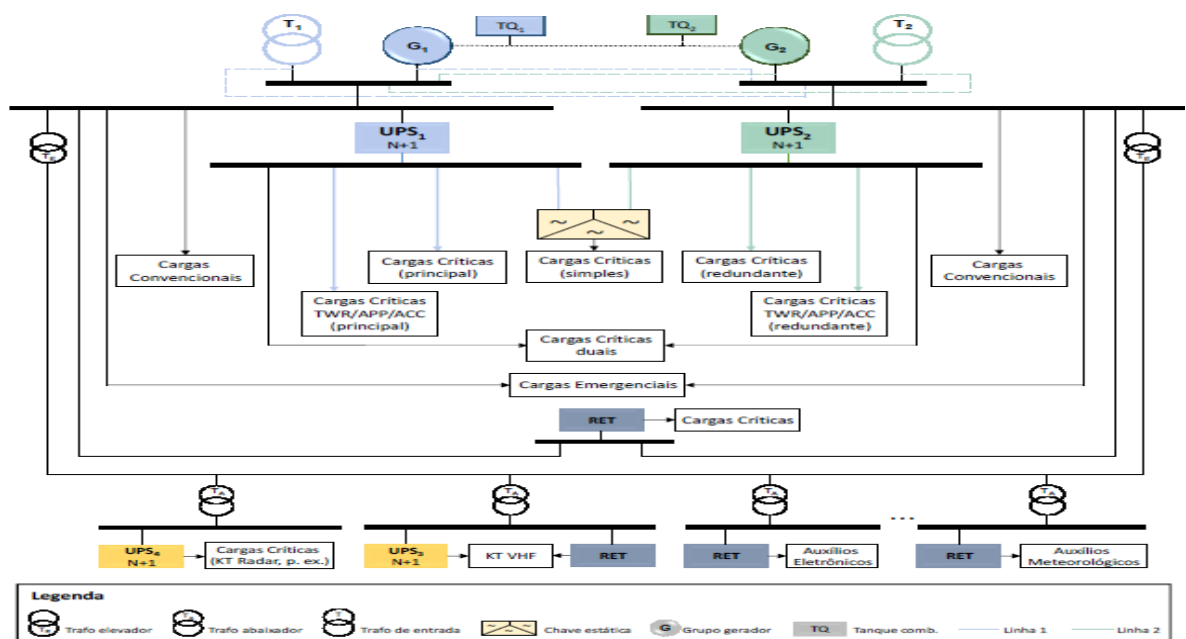
Observa-se que para essa arquitetura o nível de exigência é alto. Essa arquitetura é aplicada a destacamentos de controle do espaço aéreo como os de Curitiba, Porto Alegre, entre outros.

A principal fonte de energia vem da rede comercial composta por dois alimentadores de uma mesma subestação e dois transformadores de entrada. A fonte reserva é composta por dois grupos geradores, com um tanque de combustível cada um deles. Esta arquitetura prevê uma variedade de equipamentos com componentes repetíveis e caminhos de distribuições independentes para a alimentação de cargas críticas.

2.4.6 Subestação Tipo III

A principal fonte de energia vem da rede comercial composta por dois alimentadores de uma mesma subestação e dois transformadores de entrada. A fonte reserva é composta por dois grupos geradores, com um tanque de combustível cada um deles. Esta arquitetura prevê uma variedade de equipamentos com componentes repetíveis e caminhos de Distribuições independentes para a alimentação de cargas críticas como se pode observar na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama de blocos de KF tipo III



Fonte: DECEA, (2019).

A entrada de energia comercial será composta por dois transformadores trifásicos a seco e automatismo por meio de disjuntores de média tensão interligados e intertravados eletricamente. A partir da entrada comercial, o sistema de energia será dividido em linhas 1 e linha 2, que são completamente equivalentes e integradas.

- a) dois transformadores a seco;
- b) duplo ramal de entrada;
- c) dois grupos Geradores paralelizáveis com rede comercial;
- d) duas unidades retificadas (N+1);
- e) duas UPS 2(N+1);
- f) painel de transferência automática (PTA) com 4 fontes de alimentação;
- g) dois Painéis de Baixa Tensão (PBT) alimentado pelo (PTA);
- h) relé de proteção;
- i) uma chave estática;
- j) unidades de supervisão de corrente alternada (USCA);
- k) quadros de distribuição duplicados para as cargas ligadas à barra crítica
- l) banco de capacitores trifásico e automático;
- m) operação automatizada do PTA, por meio de unidade de gerenciamento de energia (UGE), permitindo ao sistema operar pela UGE e através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE);
- n) duplo banco de baterias para UPS;
- o) dois tanques de combustível.

2.4.7 Subestação Tipo IV

Na Figura 16, tem-se que a principal fonte de energia vem da rede comercial, composta por dois alimentadores de subestações diferentes e dois transformadores de entrada. A fonte de reserva é composta por dois grupos geradores na configuração 2(N+1), com dois tanques de combustível cada um. A arquitetura prevê, além do fornecimento de energia proveniente de duas subestações distintas, a duplicação de equipamentos com componentes redundantes. Existem caminhos de distribuição independentes para a alimentação de cargas críticas.

- c) dois grupos Geradores paralelizáveis com rede comercial;
- d) duas unidades retificadas (N+1);
- e) duas UPS 2(N+1);
- f) painel de transferência automática (PTA) com 4 fontes de alimentação;
- g) dois Painéis de Baixa Tensão (PBT) alimentado pelo (PTA);
- h) relé de proteção;
- i) uma chave estática;
- j) unidades de supervisão de corrente alternada (USCA);
- k) quadros de distribuição duplicados para as cargas ligadas à barra crítica
- l) banco de capacitores trifásico e automático;
- m) operação automatizada do PTA, por meio de unidade de gerenciamento de energia (UGE), permitindo ao sistema operar pela UGE e através do sistema de gerenciamento de energia (SIGE);
- n) duplo banco de baterias para UPS;
- o) dois tanques de combustível.

Destaca-se que a instrução do comando da aeronáutica ICA 66-36 (2019) não expõe em quais unidades do controle do espaço aéreo essa arquitetura será utilizada.

2.5 Análise de Confiabilidade pelo Método de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo é uma excelente alternativa para descobrir a confiabilidade de sistemas complexos onde os métodos tradicionais não dão conta de todas as variáveis. Em vez de se apegar a números fixos, essa técnica cria inúmeros cenários simulados, como se fosse um teste de estresse virtual, permitindo observar como o sistema reage a falhas, reparos e imprevistos.

No mundo dos *data centers*, isso é vital, já que essas instalações vivem de infraestrutura redundante para garantir que a operação nunca pare. Ao simular diferentes combinações de panes em transformadores, UPS, geradores ou linhas de energia, a ferramenta nos mostra até que ponto a redundância é suficiente para o nível de disponibilidade que precisamos.

Essa análise se torna ainda mais crucial em estruturas como as ligadas ao Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, onde a energia elétrica é considerada essencial.

Uma paralisação, mesmo que breve, afeta diretamente a comunicação e a vigilância. Por isso, a confiabilidade elétrica precisa ser tratada com o máximo de critério.

A Simulação de Monte Carlo, então, oferece uma visão muito mais realista da operação. Ela ajuda a comparar diferentes configurações, avaliar o impacto de falhas simultâneas e guiar decisões de melhoria. Mais do que isso, os resultados ajudam a identificar pontos fracos (gargalos), justificar investimentos e comprovar a necessidade de aumentar a disponibilidade, especialmente em lugares onde a interrupção é inaceitável.

Com isso, a técnica sai do campo puramente acadêmico e se transforma em uma ferramenta prática de apoio à análise e à decisão em ambientes de missão crítica.

3 ESTUDO DE CASO: SUBESTAÇÃO REDUNDANTE NO DESTACAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO DO MORRO DA IGREJA

A subestação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Morro da Igreja (DTCEA-MDI) é classificada como Tipo II+, conforme estabelecido pela Instrução ICA 66-36 do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2019). Esta classificação corresponde a uma arquitetura intermediária, porém com elevado grau de confiabilidade, concebida para garantir a continuidade da operação de sistemas críticos mesmo durante manutenções programadas ou falhas. A subestação recebe alimentação primária proveniente da concessionária CELESC, em 23,1 kV, que é processada internamente por meio de dois painéis de transferência automática (PTA), identificados pelas cores verde e azul. Essa configuração permite que tanto a alimentação da CELESC quanto qualquer um dos dois grupos geradores instalados possa fornecer energia a ambos os Painéis de Baixa Tensão (PBT), assegurando flexibilidade e redundância plena na distribuição.

O sistema conta com transformadores de potência, responsáveis pela conversão da tensão de média para baixa tensão, dimensionados para operar em paralelo ou em regime de reserva, conforme a demanda e condição operacional. Disjuntores de média e baixa tensão estão instalados nas entradas e saídas dos transformadores, painéis e geradores, permitindo a proteção, o seccionamento e a manobra segura dos circuitos. Além disso, a subestação dispõe de seccionadoras motorizadas e manuais, utilizadas para isolação e segurança durante manutenções ou intervenções técnicas, proporcionando flexibilidade operacional em condições de contingência.

O sistema também incorpora uma chave estática, que monitora continuamente as entradas provenientes dos painéis verde e azul. Em caso de falha na linha ativa, essa chave realiza a comutação instantânea para a linha redundante, garantindo continuidade no fornecimento e evitando o desligamento das cargas críticas. A infraestrutura da subestação inclui ainda duas Unidades Retificadoras configuradas em N+1 e duas UPS em arquitetura 2(N+1), assegurando alimentação ininterrupta mesmo diante de falhas múltiplas. Um duplo banco de baterias garante a autonomia necessária às UPS em caso de perda total da alimentação externa. A distribuição interna conta com quadros duplicados e painéis independentes, monitorados por meio da Unidade de Gerenciamento de Energia (UGE), com

supervisão remota pelo Sistema Integrado de Gerenciamento de Energia (SIGE), conforme exigências normativas.

Ressalta-se que, para fins de análise de confiabilidade apresentada neste trabalho, nem todos os elementos constituintes da subestação foram considerados de forma individualizada, como barramentos, transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Tal decisão foi adotada em função da elevada complexidade desses sistemas, bem como do escopo definido para o estudo, que prioriza os equipamentos e caminhos diretamente associados à continuidade do fornecimento das cargas críticas. Destaca-se ainda que, no período analisado, não foram registrados eventos de falha ou indisponibilidade significativa nos equipamentos da subestação, sendo os parâmetros utilizados baseados em dados operacionais e premissas conservadoras para fins de modelagem e simulação.

A estrutura da subestação foi projetada com base em conceitos equivalentes ao *Tier III* do *Uptime Institute*, assegurando a realização de manutenções simultâneas sem interrupção do fornecimento e elevada disponibilidade energética. Essa robustez é essencial para garantir a continuidade das operações dos sistemas de controle do tráfego aéreo, evitando perdas operacionais críticas.

3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo concentra-se na análise da subestação elétrica do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Morro da Igreja (DTCEA-MDI), tomando como base a organização física e funcional de seus sistemas de alimentação redundante. O procedimento metodológico integra o levantamento documental, a interpretação técnica do esquema unifilar e a aplicação de métodos quantitativos destinados à avaliação da confiabilidade e disponibilidade da instalação.

A primeira etapa consiste na identificação da topologia redundante da subestação até a carga crítica (*data center*), realizada por meio da análise do esquema unifilar simplificado. Esse levantamento permite compreender a organização dos elementos, a disposição das rotas alternativas de suprimento e a configuração dos dispositivos responsáveis pela continuidade energética.

Em seguida, a partir de um recorte do esquema unifilar da subestação, são identificados os componentes principais e analisado se possuem redundâncias, permitindo avaliar de que forma as configurações de operação e as alternativas de

suprimento contribuem para a robustez da instalação e para a mitigação de interrupções.

Na sequência, desenvolve-se a análise estrutural da redundância utilizando a Simulação de Monte Carlo, método adequado para estimar o desempenho de sistemas sujeitos a falhas aleatórias. Essa abordagem permite projetar o comportamento estocástico da subestação, levando em conta a independência entre caminhos redundantes, a taxa de falha dos componentes, os tempos de reparo e as possíveis combinações de eventos de contingência. Em complemento, são aplicados indicadores clássicos de engenharia de confiabilidade, como MTBF, MTTR e função de confiabilidade, a fim de quantificar a disponibilidade sistêmica.

A metodologia também contempla a avaliação dos possíveis caminhos de alimentação e das redundâncias estruturais da subestação, identificando como diferentes configurações de operação podem manter o atendimento às cargas essenciais mesmo sob condições de falha. Essa etapa permite determinar o impacto relativo de cada componente na robustez do sistema e localizar pontos críticos que podem comprometer o desempenho global da instalação.

Por fim, o estudo emprega um código Python desenvolvido especificamente para este trabalho, responsável por processar os dados, modelar cenários de falha, calcular índices de confiabilidade e disponibilidade e representar os resultados de forma sistemática. A integração entre análise documental, modelagem computacional e simulação probabilística constitui o núcleo metodológico utilizado para compreender e avaliar a performance da subestação do DTCEA-MDI.

3.2 Topologia Redundante da Subestação até as Cargas Críticas.

Para análise da subestação do DTCEA-MDI, será apresentado um recorte do esquema unifilar simplificado, destacando os principais caminhos de alimentação com suas respectivas redes redundantes, desde as fontes de energia (concessionária e grupos geradores) até as cargas críticas. Este esquema evidencia a topologia da instalação, permitindo avaliar as rotas alternativas de suprimento, os elementos de comutação automática (como os painéis de transferência automática e a chave estática), e os módulos de energia ininterrupta (UPS e banco de baterias), fundamentais para garantir a continuidade operacional dos sistemas de controle do tráfego aéreo mesmo em cenários de falha.

A representação simplificada facilita a identificação da estrutura lógica da redundância e serve como base para o mapeamento das conexões energéticas principais. Cada elemento da cadeia — como transformadores, disjuntores e seccionadoras — será considerado na construção do modelo de conectividade, evidenciando como a operação pode ser mantida em condições de contingência. A análise também possibilita examinar a independência entre os caminhos redundantes, fator essencial para alcançar alta disponibilidade.

O esquema da subestação redundante serve como base para aplicação de técnicas avançadas de análise probabilística de sistemas. Neste estudo, adotou-se a Simulação de Monte Carlo para modelagem da confiabilidade, método que permite avaliar o comportamento estocástico do sistema frente a falhas aleatórias dos componentes.

Esta abordagem considera:

- A topologia funcional da rede (representada pelos 34 nós);
- As taxas de falha individuais de cada equipamento;
- As interdependências críticas entre componentes.

Através de iterações estatísticas massivas, o modelo simula milhares de cenários operacionais, calculando a probabilidade de sucesso do sistema mediante diferentes combinações de falhas. Os chamados 'caminhos de operação' (frequentemente confundidos com 'caminhos mínimos') emergem naturalmente desta análise como sequências de componentes cuja integridade conjunta garante o fluxo energético contínuo para as cargas essenciais.

Esta metodologia quantifica não apenas a robustez estrutural da subestação, mas também identifica:

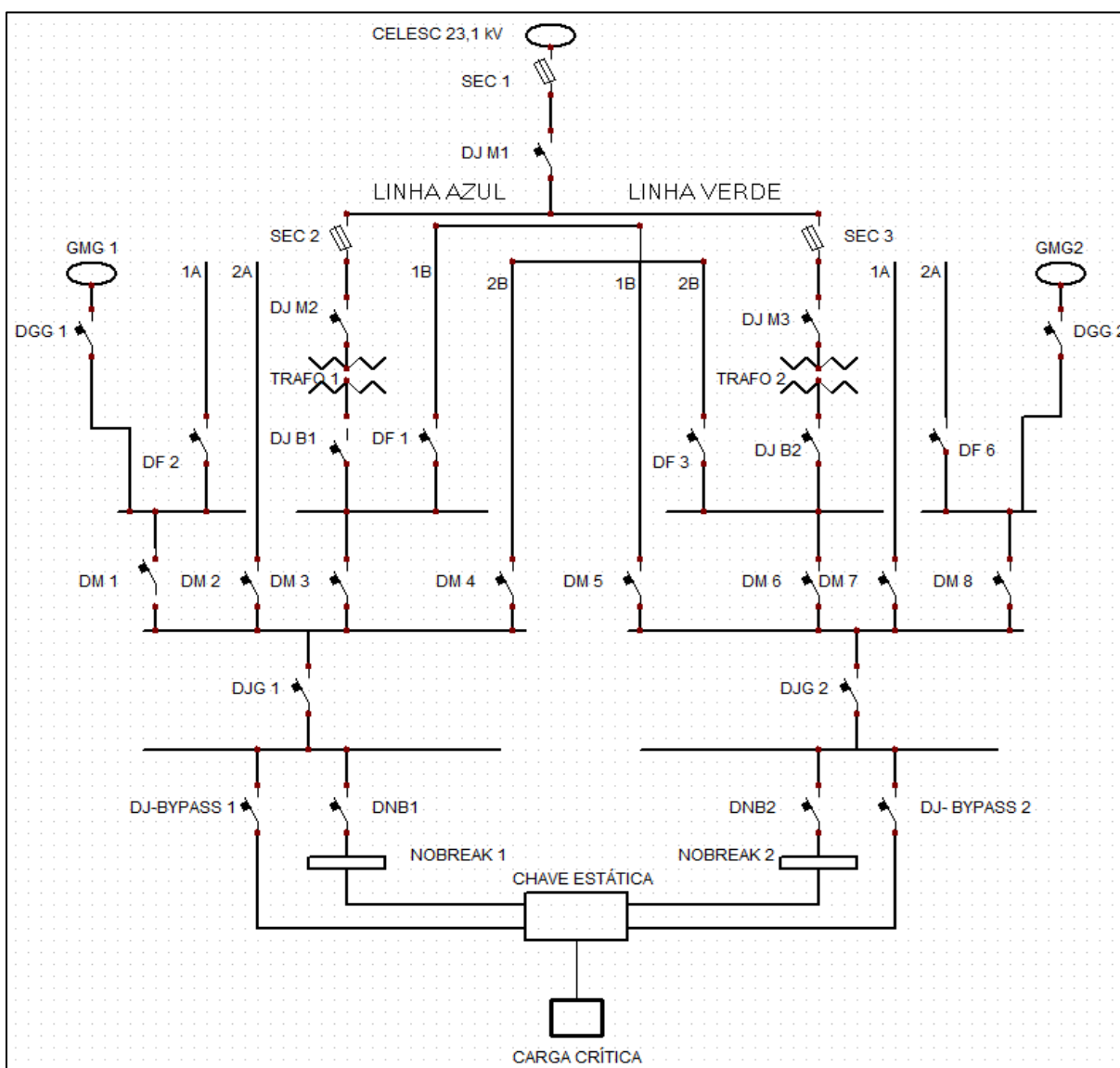
- a) componentes com maior impacto sistêmico (*single points of failure*)
- b) configurações ótimas de redundância
- c) cenários críticos de falha em cascata

Os resultados subsidiarão propostas de reengenharia da arquitetura, reforçando a segurança das operações de controle do espaço aéreo através de decisões baseadas em evidências probabilísticas.

3.3 Esquema Unifilar Simplificado da Subestação

A seguir, a Figura 17, apresenta o recorte do esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI, ilustrando os caminhos redundantes de alimentação desde as fontes primárias (CELESC e grupos geradores) até as cargas críticas. Essa representação permite observar a configuração dos painéis PTA, a atuação dos transformadores, o arranjo dos disjuntores e seccionadoras, bem como os módulos UPS redundantes, a chave estática e os ramos de alimentação paralelos. A topologia evidenciada possibilita avaliar a confiabilidade da infraestrutura.

Figura 17 - Recorte do esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI



Fonte: Adaptado de diagrama técnico do sistema elétrico interno do DTCEA-MDI, (2025).

Tabela 1 - Descrição dos elementos do esquema unifilar

Elemento	Tipo	Função	Redundância
CELESC	Concessionária de energia	Entrada principal 23,1 kV	Não
DJ M1	Disjuntor de alta tensão do painel de entrada	Proteção e seccionamento	Não
SEC 1/ SEC 2 / SEC 3	Seccionadoras de alta tensão com fusíveis	Seccionamento para proteção e manutenção	Sim
DJ M2 / DJ M3	Disjuntores de alta tensão (PTA azul e verde)	Proteção da linha azul e verde	Sim
TRAFO 1 / TRAFO 2	Transformadores	Conversão de 23,1 kV para 380/220V	Sim
DJ B1 / DJ B2	Disjuntores de baixa tensão PTA azul e verde	Alimentação barramento de baixa tensão no PTA.	Sim
DF 1 a 4	Disjuntores fixos de baixa tensão	Disjuntores fixos para interligação entre PTA azul e verde	Sim
DM1 a DM8	Disjuntores motorizados de baixa tensão	Disjuntores motorizados para interligação entre PTA azul e verde	Sim
GMG 1 / GMG 2	Grupo gerador	Suprimento alternativo	Sim
DGG1 / DGG2	Disjuntores dos grupos geradores	Seccionamento e proteção dos ramos	Sim
DJG1 / DJG2	Disjuntores de alimentação painel de baixa tensão (PBT)	Disjuntor para alimentação dos painéis de baixa tensão azul e verde.	Sim
DJ-BYPASS 1 / 2	Disjuntores de bypass	Disjuntor para alimentação direta da carga ou para manutenção das UPS,	Sim
DNB 1 / DNB 2	Disjuntores dos nobreaks	Disjuntor de proteção e isolamento dos nobreaks	sim
NOBREAK 1 / 2	UPS (configuração (N+1)	Energia ininterrupta	Sim
Chave Estática	Comutador automático	Troca automática entre UPS Verde e Azul	Sim
Carga Crítica	Data Center	Sistema de tráfego aéreo	Não

Fonte: Adaptado de diagrama técnico do sistema elétrico interno do DTCEA-MDI, (2025).

3.4 Análise Estrutural da Redundância por Simulação de Monte Carlo

A análise de confiabilidade de sistemas elétricos críticos requer ferramentas capazes de lidar com a incerteza inerente ao processo de falhas e reparos. Nesse contexto, o método de Monte Carlo apresenta-se como uma abordagem robusta, amplamente utilizada em engenharia elétrica e em sistemas de missão crítica. Sua principal vantagem é permitir a modelagem probabilística do comportamento do sistema, considerando a aleatoriedade dos tempos de falha e de reparo de cada componente.

No presente trabalho, a subestação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Morro da Igreja (DTCEA-MDI) foi modelada com base nos principais equipamentos que compõem sua arquitetura elétrica, tais como transformadores, disjuntores, seccionadoras, UPS e grupos geradores. Para cada componente foram atribuídos parâmetros de confiabilidade, como o *Mean Time Between Failures* (MTBF) e o *Mean Time To Repair* (MTTR), obtidos a partir de dados técnicos e literatura especializada.

A simulação de Monte Carlo foi então aplicada para reproduzir milhares de cenários possíveis de operação, considerando falhas e reparos ao longo do tempo. Dessa forma, foi possível estimar a disponibilidade global da instalação, identificar componentes críticos que impactam de forma mais significativa na continuidade do fornecimento e avaliar a robustez do sistema diante de falhas múltiplas.

Os resultados dessa abordagem evidenciam se a configuração elétrica da subestação atende aos requisitos de alta disponibilidade previstos pela ICA 66-36 (DECEA, 2019), além de permitir comparações com os níveis de classificação de *data centers* definidos por instituições como o *Uptime Institute* e a TIA-942. Assim, a simulação de Monte Carlo fornece uma visão quantitativa mais realista do desempenho da subestação, superando análises puramente determinísticas e demonstrando a resiliência elétrica exigida em sistemas de missão crítica.

Assim, a aplicação da simulação de Monte Carlo permitiu avaliar probabilisticamente a confiabilidade e a disponibilidade do sistema elétrico da subestação do DTCEA-MDI, considerando diferentes cenários de falha e reparo dos componentes. A etapa seguinte consiste em apresentar os resultados obtidos, organizados em tabelas e gráficos, de forma a quantificar os indicadores-chave de desempenho: MTBF, MTTR, disponibilidade e confiabilidade do sistema. Esses

resultados serão comparados às exigências normativas (ICA 66-36/DECEA, 2019) e às classificações de infraestrutura definidas pelo *Uptime Institute* e pela TIA-942, possibilitando verificar se a arquitetura analisada atende aos requisitos de sistemas de missão crítica.

3.5 Análise de Disponibilidade Sistêmica via Indicadores MTBF, MTTR e Confiabilidade

A análise de disponibilidade sistêmica é essencial para avaliar o desempenho operacional de sistemas críticos, como subestações de energia, redes de controle do tráfego aéreo e data centers, onde falhas podem gerar impactos significativos em serviços, segurança e continuidade operacional. Para quantificar a robustez de um sistema, utilizam-se indicadores como *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), confiabilidade e disponibilidade, que permitem avaliar o desempenho global da infraestrutura (RAUSAND, 1998; O'CONNOR, 2012; SOEIRO, 2017).

3.5.1 Conceitos de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade

Confiabilidade é a capacidade de um sistema ou componente desempenhar sua função requerida sob condições específicas e por um período determinado, sem ocorrência de falhas (RAUSAND, 1998). Para sistemas com falha aleatória e distribuição exponencial do tempo de vida, a confiabilidade $R(t)$ é calculada por meio das Equações (4) e (5).

$$R(t) = e^{(-\lambda t)} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (5)$$

onde:

MTBF= tempo médio entre falhas,

t= tempo de operação considerado.

O MTBF indica o tempo médio esperado entre falhas sucessivas, permitindo identificar componentes com maior propensão a falhas. Em sistemas

críticos e *data centers*, componentes com MTBF elevado são estratégicos para garantir a continuidade operacional.

Manutenibilidade refere-se à facilidade e rapidez com que um sistema ou componente pode ser restaurado após falha. O MTTR indica o tempo médio necessário para reparo ou substituição (O'CONNOR, 2012), sendo fundamental para minimizar impactos em sistemas de missão crítica.

A disponibilidade combina confiabilidade e manutenibilidade, representando a probabilidade de um componente ou sistema estar operacional quando necessário. A disponibilidade individual de um componente A_i , Equação 6, é dada por:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

Essa métrica é essencial para identificar gargalos, priorizar manutenção preventiva, detectar componentes críticos e dimensionar redundâncias, garantindo alta disponibilidade em *data centers*, subestações e outros sistemas críticos (HAYES; PATTON, 1998; SOEIRO, 2017).

3.6 Simulação de Monte Carlo para Quantificação da Confiabilidade e Disponibilidade

Para a avaliação detalhada da confiabilidade e disponibilidade da subestação do DTCEA-MDI, foi desenvolvido um código em Python que permite calcular os principais indicadores do sistema, incluindo MTBF, MTTR, disponibilidade individual de cada componente e disponibilidade global da subestação.

A fim de simplificar a modelagem e a visualização da arquitetura elétrica, a subestação foi reestruturada como um grafo de nós numerados (N1, N2 ... N34), conforme Figura 18, representando os elementos críticos da instalação, como disjuntores, transformadores, grupos geradores e UPS. Essa representação possibilitou:

Identificar todos os caminhos possíveis entre as fontes de energia (CELESC, GMG1 e GMG2) e as cargas críticas;

Determinar os componentes em série dentro de cada caminho, nos quais a falha de qualquer elemento compromete temporariamente a operação do trajeto;

A Tabela 2 apresenta a legenda completa com a descrição de cada código utilizado.

Tabela 2 - Legenda de codificação dos dispositivos do esquema unifilar da subestação do DTCEA-MDI.

Código	DISPOSITIVO	Descrição do Dispositivo
N1	CELESC	Alimentação do Concessionária em 23,1 kV
N2	SEC 1	Seccionadora do Painel de Alta Tensão
N3	DJ M1	Disjuntor Alta Tensão
N4	SEC 2	Seccionadora da Linha Azul
N5	DJ M2	Disjuntor Alta Tensão Linha Azul
N6	TRAFO 1	Transformador 1 de 23,1 kV para 380/220 V
N7	DJ B1	Disjuntor de Baixa Tensão Linha Azul
N8	DM 3	Disjuntor Motorizado Linha Azul
N9	DJG 1	Disjuntor Geral Linha Azul
N10	DNB 1	Disjuntor Nobreak Linha Azul
N11	NOBREAK 1	Fonte Ininterrupta de Energia Linha Azul
N12	SEC 3	Seccionamento Linha Verde
N13	DJ M3	Disjuntor Alta Tensão Linha Verde
N14	TRAFO 2	Transformador 2 de 23,1 kV para 380/220 V
N15	DJ B2	Disjuntor de Baixa Tensão Linha Verde
N16	DM 6	Disjuntor Motorizado Linha Verde
N17	DJG 2	Disjuntor Geral Linha Verde
N18	DNB 2	Disjuntor Nobreak Linha verde
N19	NOBREAK 2	Fonte Ininterrupta de Energia Linha Verde
N20	CHAVE ESTÁTICA	Dispositivo comutação automática entre duas fontes de energia elétrica
N21	GMG 1	Grupo Gerador Linha Azul
N22	DGG 1	Disjuntor Geral Gerador 1
N23	DF 2	Disjuntor Fixo interligação Painéis Azul/Verde
N24	DM 7	Disjuntor Motorizado Linha Azul/Verde
N25	DM 1	Disjuntor Motorizado alimentação do Grupo Gerador 1 para Painel de Baixa tensão Linha Azul
N26	DF 6	Disjuntor Fixo Interligação Painéis Verde/Azul
N27	DM 2	Disjuntor Motorizado Linha Verde/Azul
N28	GMG 2	Grupo Gerador Linha Verde
N29	DGG 2	Disjuntor Geral Gerador 2
N30	DM8	Disjuntor Motorizado alimentação do Grupo gerador 2 na Linha Verde
N31	DF1	Disjuntor Fixo interligação da CELE SC entre painéis azul/verde
N32	DM 5	Disjuntor Motorizado interligação da CELESC entre painéis azul/verde
N33	DF 3	Disjuntor Fixo interligação da CELESC entre painéis Verde/Azul
N34	DM 4	Disjuntor Motorizado interligação da CELESC entre painéis verde/Azul

3.7 Análise dos Caminhos Possíveis de Alimentação e Redundância da Subestação

De acordo com normas internacionais de infraestrutura crítica, como a TIA-942 e o *Tier Standard* do *Uptime Institute*, a redundância elétrica é um dos pilares para assegurar níveis elevados de disponibilidade em instalações essenciais. Essas referências técnicas estabelecem que a existência de múltiplos caminhos de suprimento reduz o risco de interrupções, permitindo que a carga crítica continue a ser atendida mesmo diante de falhas ou manutenções.

Nesse contexto, a simulação de Monte Carlo aplicada à subestação do DTCEA-MI considerou todas as rotas possíveis de alimentação da carga crítica, contemplando tanto a rede da concessionária CELESC quanto os grupos geradores de emergência GMG1 e GMG2. A modelagem incluiu cenários em que a carga é atendida diretamente por uma das fontes principais, bem como situações em que a transferência ocorre por caminhos alternativos ou cruzados entre as linhas.

De forma geral, identificaram-se oito caminhos distintos de suprimento de energia até a carga crítica, variando entre trajetos diretos — compostos por um número reduzido de componentes — e trajetos cruzados, que utilizam a flexibilidade da arquitetura elétrica para redirecionar a energia em caso de falhas. Essa diversidade de rotas assegura que, mesmo diante da indisponibilidade de elementos da rede externa, os grupos geradores ou as conexões redundantes mantenham a continuidade do fornecimento.

Além disso, a análise demonstrou que a redundância não se limita apenas à duplicidade de fontes, mas também ao arranjo topológico dos dispositivos, como disjuntores, seccionadoras e transformadores, que permitem a recomposição dinâmica da malha elétrica. Esse aspecto amplia significativamente a confiabilidade global do sistema, uma vez que reduz a probabilidade de perda total da carga diante de falhas múltiplas.

Outro ponto relevante é que os caminhos com maior número de elementos tendem a apresentar disponibilidade inferior, em razão do acúmulo de probabilidades de falha, reforçando a importância de manter trajetos diretos preferenciais. No entanto, os trajetos cruzados constituem uma camada de segurança indispensável, sobretudo em cenários de manutenção programada ou contingências severas.

Portanto, a análise dos caminhos possíveis evidencia que a subestação DTCEA-MI foi projetada de forma a garantir tolerância a falhas, alinhando-se às melhores práticas de engenharia elétrica e aos requisitos de continuidade de serviço estabelecidos por normas internacionais. Com base nos critérios de classificação do Uptime Institute, o arranjo identificado apresenta características equivalentes a um *Tier III*, visto que permite manutenção simultânea sem comprometer a carga crítica.

A tabela 3 resume os principais caminhos de alimentação considerados na simulação, destacando a fonte de origem, os componentes intermediários envolvidos e o número total de elementos até a carga crítica.

Tabela 3 - Sequência numérica dos Caminhos Possíveis

Caminho	Descrição	Sequência Numérica	Total de Componentes
1	CELESC via TRAFO1 (Linha Azul)	N1 → N2 → N3 → N4 → N5 → N6 → N7 → N8 → N9 → N10 → N11 → N20 → CARGA_CRÍTICA	12
2	CELESC via TRAFO2 (Linha Verde)	N1 → N2 → N3 → N12 → N13 → N14 → N15 → N16 → N17 → N18 → N19 → N20 → CARGA_CRÍTICA	12
3	GMG1 direto via DJG1	N21 → N22 → N25 → N9 → N10 → N11 → N20 → CARGA_CRÍTICA	7
4	GMG2 direto via DJG2	N28 → N29 → N30 → N17 → N18 → N19 → N20 → CARGA_CRÍTICA	7
5	CELESC cruzado via TRAFO1 para DJG2	N1 → N2 → N3 → N4 → N5 → N6 → N7 → N31 → N32 → N17 → N18 → N19 → N20 → CARGA_CRÍTICA	13
6	CELESC cruzado via TRAFO2 para DJG1	N1 → N2 → N3 → N12 → N13 → N14 → N15 → N33 → N34 → N9 → N10 → N11 → N20 → CARGA_CRÍTICA	13
7	GMG1 cruzado para DJG2	N21 → N22 → N23 → N24 → N17 → N18 → N19 → N20 → CARGA_CRÍTICA	8
8	GMG2 cruzado para DJG1	N28 → N29 → N26 → N27 → N9 → N10 → N11 → N20 → CARGA_CRÍTICA	8

A partir da identificação dos 34 componentes da arquitetura elétrica da subestação DTCEA-MDI (numerados de N1 a N34), foi possível traçar oito caminhos distintos entre as fontes de energia e a carga crítica. Esses caminhos foram obtidos a

partir do mapeamento lógico do sistema, considerando diferentes rotas de alimentação possíveis, tanto por meio da concessionária CELESC quanto pelos grupos geradores GMG1 e GMG2.

A análise comparativa desses caminhos demonstra a existência de uma redundância estrutural de alto nível, caracterizada por rotas paralelas e cruzadas, capazes de manter o fornecimento contínuo mesmo diante de múltiplas falhas. Cada trajeto representa uma possibilidade funcional de atendimento à carga crítica, o que evidencia a robustez do sistema e sua conformidade com os requisitos de confiabilidade definidos pela Instrução ICA 66-36 (DECEA, 2019).

A redundância é evidenciada por três principais características:

- a) **Fontes múltiplas e independentes:** A carga crítica pode ser alimentada tanto pela rede externa (CELESC – N1), quanto por dois grupos geradores autônomos, GMG1 (N21) e GMG2 (N28). Isso proporciona diversidade de fornecimento e capacidade de isolamento em situações de contingência.
- b) **Caminhos cruzados entre linhas:** Alguns caminhos utilizam componentes de uma linha para alimentar elementos da outra. Por exemplo, o caminho 5 inicia-se pela linha azul, utilizando o transformador N6, mas termina alimentando o DJG2 (N17), da linha verde. O mesmo ocorre de forma inversa no caminho 6. Esses cruzamentos evidenciam a redundância topológica do sistema.
- c) **Ausência de pontos únicos de falha:** A distribuição dos componentes ao longo dos caminhos mostra que não há um único elemento por onde todos os trajetos passem, com exceção do nó N20 (CHAVE ESTÁTICA), que representa o ponto de convergência final antes da carga crítica. Por essa razão, este componente deve ser tratado como elemento de atenção especial em termos de monitoramento e manutenção preventiva.

Em síntese, a análise dos caminhos possíveis evidencia a redundância funcional e estrutural da subestação, garantindo a operação contínua dos sistemas críticos mesmo diante de falhas simultâneas. Ao considerar todos os caminhos possíveis entre as fontes de energia e as cargas críticas, é possível identificar componentes críticos, pontos de falha única e oportunidades de manutenção preventiva (RAUSAND, 1998; O'CONNOR, 2012).

Este diagnóstico fornece a base para a etapa seguinte do trabalho, voltada à quantificação probabilística da confiabilidade do sistema. Por meio da análise de

todos os caminhos possíveis entre fontes de energia e cargas críticas, combinada com a aplicação da simulação de Monte Carlo, é possível considerar interdependências complexas entre os componentes, taxas de falha (MTBF), tempos médios de reparo (MTTR) e calcular a disponibilidade do sistema, obtendo uma avaliação realista da robustez do sistema frente a diferentes cenários de falha múltipla (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964; ALBANA et al., 2016).

Essa abordagem permite não apenas mensurar o desempenho do sistema em condições normais de operação, mas também subsidiar decisões estratégicas de manutenção, dimensionamento de redundâncias e planejamento de contingência. Além disso, alinha-se aos princípios de confiabilidade e resiliência elétrica adotados em *data centers* e sistemas críticos, conforme padrões internacionais, como TIA-942 e Uptime Institute *Tier III* (UPTIME INSTITUTE, 2018; TIA-942, 2017).

3.8 Código Python para Análise de Disponibilidade e Confiabilidade da Subestação

O código Python desenvolvido para este trabalho apresenta apenas uma proposta inicial de modelo voltado à análise de disponibilidade e confiabilidade da subestação do DTCEA-MDI. Embora cumpra a função de ilustrar a lógica de quantificação probabilística dos caminhos de alimentação da carga crítica e da redundância estrutural do sistema, não se trata de uma solução finalizada, exigindo ainda adequações significativas, refinamentos metodológicos e validações adicionais.

Ainda assim, o modelo computacional oferece uma visualização preliminar da estrutura do sistema e uma interface interativa construída com o framework Dash. A aplicação foi concebida de forma parametrizável, permitindo ao usuário ajustar o período de análise e atualizar os valores dos parâmetros operacionais diretamente na interface, possibilitando a simulação de diferentes cenários temporais e condições de operação. Quando executado localmente, a aplicação pode ser acessada temporariamente pelo endereço <http://127.0.0.1:8050/>

O desenvolvimento foi realizado no ambiente *Visual Studio Code* (VS Code), que oferece suporte à execução do código em *Python*, gerenciamento de bibliotecas e integração direta com o servidor do Dash. Dessa forma, *Python* e VS Code atuam em conjunto para que o processo aconteça: o primeiro fornece a base de cálculo probabilístico e estatístico, enquanto o segundo garante a interface de

programação integrada, permitindo atualização, depuração e execução contínua do sistema.

A finalidade do código é fornecer uma ferramenta capaz de:

- a) estimar indicadores de desempenho operacional, como MTBF, MTTR, disponibilidade e confiabilidade do sistema;
- b) identificar componentes críticos cuja falha impacta significativamente a operação da subestação;
- c) avaliar o efeito da redundância e dos caminhos alternativos na continuidade do fornecimento de energia;
- d) subsidiar estratégias de manutenção preventiva e planejamento de contingência, baseados em dados reais.

Os dados utilizados na análise correspondem ao período de 01 de janeiro de 2014 a 18 de dezembro de 2025, contemplando informações de:

- a) horas de indisponibilidade de cada equipamento;
- b) número de manutenções realizadas;
- c) tempos médios de reparo;
- d) taxas de falha observadas na operação (λ).

As informações utilizadas na modelagem foram definidas a partir de iterações técnicas com profissionais responsáveis pela operação e manutenção da subestação, considerando a experiência prática acumulada ao longo do tempo. Ressalta-se que o SILOMS (Sistema de Logística de Material e Serviços da Aeronáutica) constitui a base institucional na qual os dados reais de falhas, manutenções e indisponibilidades são registrados, possibilitando, em trabalhos futuros, a validação e o refinamento do modelo com base em dados operacionais históricos consolidados.

A estruturação do código seguiu etapas lógicas bem definidas, visando garantir clareza, reprodutibilidade dos resultados e a adoção de boas práticas de engenharia e programação. Para tanto, o desenvolvimento contemplou as seguintes etapas:

Modelagem da subestação como grafo (N1 a N34): cada nó representa um componente crítico; as conexões representam os caminhos de alimentação, incluindo redundâncias e cruzamentos.

Cálculo da disponibilidade individual: a partir de MTBF e MTTR.

Cálculo da confiabilidade de caminhos: considerando séries de componentes e redundâncias.

Simulação de Monte Carlo: geração de milhares de cenários de falhas; em cada iteração são identificados os caminhos ativos, calculando-se (i) a confiabilidade global do sistema e (ii) o impacto de falhas múltiplas na continuidade do fornecimento.

Indicadores consolidados: estatísticas agregadas do sistema; MTBF/MTTR por componente; identificação de componentes críticos para priorização de manutenção.

Visualização interativa e análise temporal (Dash): gráficos dinâmicos por período, filtros e atualização em tempo real acessíveis em <http://127.0.0.1:8050/>.

Exportação dos resultados: tabelas e gráficos para o corpo do trabalho e para o **Anexo A**, onde está disponibilizado o código completo.

Por fim, o código constitui um modelo inicial projetado para evolução contínua: pode ser atualizado no *Visual Studio Code* a qualquer momento, incorporar novas métricas, integrar bancos de dados e adaptar-se às condições operacionais da subestação. A associação entre *Python*, *Dash* e *Visual Studio Code* garante tanto a robustez do processamento matemático quanto a praticidade da visualização, consolidando-se como uma ferramenta eficiente de apoio à decisão.

O código *Python* desenvolvido oferece uma abordagem robusta e quantitativa para analisar sistemas complexos, como a subestação do DTCEA-MDI. Ao combinar dados históricos do SILOMS com simulação de Monte Carlo, é possível obter uma avaliação realista da confiabilidade e da disponibilidade, considerando todas as interdependências e redundâncias do sistema.

Essa metodologia permite que decisões sobre manutenção, upgrades ou ajustes na arquitetura da subestação sejam tomadas com base em evidências probabilísticas sólidas, aumentando a segurança e a continuidade operacional dos sistemas críticos de controle do espaço aéreo.

3.8.1 Tabela dos Componentes

A tabela 4 apresenta os indicadores de desempenho de cada componente da subestação, considerando os dados históricos desde 01/01/2014 até o dia 18/12/2025. São apresentados: horas paradas, número de manutenções, tempo

médio de reparo, tempo médio entre falhas, disponibilidade e confiabilidade. Esses indicadores permitem identificar quais componentes apresentam maior impacto na operação do sistema e demandam atenção para manutenção preventiva.

Tabela 4 - Dados gerais dos componentes da Subestação

≥ 0,99 - Excelente
 0,95 – 0,99 - Boa
 0,90 – 0,95 - Média
 0,80 – 0,90 - Baixa
 < 0,80 - Crítica

Componente	Descrição	Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)	Num_Paradas	Tempo_Manutencao_Corretiva (h)	MTBF	MTTR	Disponibilidade	Confiabilidade
N1	CELESC_Alimentação da Concessionária em 23,1 kV	10	38	100	2545,8	2,8	99,506%	75,366%
N2	SEC_1_Seccionadora do Painel de Alta Tensão	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N3	DJ_M1_Disjuntor Alta Tensão	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N4	SEC_2_Seccionadora da Linha Azul	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N5	DJ M2_Disjuntor Alta Tensão Linha Azul	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N6	TRAFO 1_Transformador 1 de 23,1 kV para 380/220 V	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N7	DJ B1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N8	DM_3	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N9	DJG 1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N10	DNB_1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N11	NOBREAK 1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N12	SEC_3	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N13	DJ M3	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N14	TRAFO 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N15	DJ B2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N16	DM6	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N17	DJG 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N18	DNB 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N19	NOBREAK 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N20	CHAVE ESTATICA	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N21	GMG 1	30	5	1520	19064,0	304,0	98,278%	96,294%
N22	DGG 1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N23	DF 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N24	DM_7	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N25	DM_1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N26	DF_6	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N27	DM_2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N28	GMG 2	30	6	700	16023,3	116,7	99,093%	95,606%
N29	DGG 2	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N30	DM_8	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N31	DF1	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N32	DM_5	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N33	DF 3	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%
N34	DM_4	30	1	1	98830,0	1,0	99,968%	99,259%

3.8.2 Confiabilidade dos Caminhos

A análise dos caminhos mostra a probabilidade de cada rota alimentar a carga crítica. Cada caminho é composto por uma série de componentes, e sua confiabilidade é calculada considerando a disponibilidade individual de cada componente. Essa análise evidencia quais caminhos são mais críticos e qual o efeito da redundância estrutural na continuidade do fornecimento.

Figura 19- Análise da disponibilidade do componente e dos caminhos



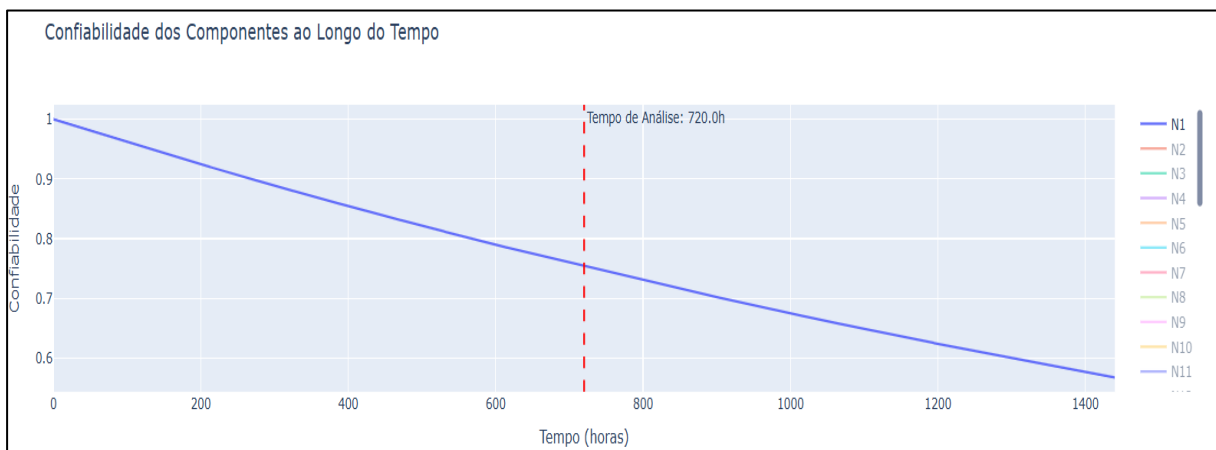
Fonte: Código Python, (2025).

3.8.3 Confiabilidade Global do Sistema

A confiabilidade global do sistema foi estimada por simulação de Monte Carlo, considerando milhares de cenários de falhas aleatórias. O resultado indica a probabilidade de que pelo menos um caminho permaneça funcional, fornecendo energia à carga crítica. Essa métrica consolida a avaliação probabilística da subestação como um todo, sendo importante que a confiabilidade global seja verificada detalhadamente durante a análise do código para garantir a consistência dos resultados obtidos.

3.8.4 Gráficos e Visualizações

O gráfico de confiabilidade ao longo do tempo ilustra a evolução da probabilidade de operação dos componentes do sistema, sendo gerados de forma interativa a partir da seleção dos elementos de interesse, identificados de N1 a N34. A interface permite analisar o comportamento da confiabilidade desde o tempo inicial até o tempo final definido para a análise, incluindo cenários em que o horizonte temporal é estendido para o dobro do período inicialmente considerado. As cores, escalas e posições no diagrama representam os níveis de disponibilidade, possibilitando a rápida identificação visual de componentes e caminhos mais críticos. Essas representações gráficas facilitam o entendimento da topologia do sistema, bem como a avaliação do impacto da redundância sobre a confiabilidade ao longo do tempo.



3.8.5 Análise Crítica

A análise dos resultados obtidos por meio do código desenvolvido em Python permitiu a identificação precisa dos componentes críticos do sistema, dos caminhos operacionais mais suscetíveis a falhas e da influência direta dos níveis de redundância sobre a confiabilidade global da arquitetura. Ressalta-se que os valores dos parâmetros de entrada podem ser ajustados dinamicamente por meio da interface implementada, possibilitando a simulação de diferentes cenários operacionais e condições de falha. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes e alinhados com os níveis de desempenho esperados para uma arquitetura classificada como Tier III,

evidenciando elevada confiabilidade e adequada continuidade operacional. A partir desses dados, torna-se viável o planejamento de estratégias de manutenção preventiva mais eficientes, a otimização dos procedimentos operacionais e a proposição de melhorias na arquitetura da subestação, com impacto direto na redução de indisponibilidades e no aumento da resiliência do sistema.

Adotou-se um limite superior de 99,999% para a confiabilidade global do sistema, mesmo nos casos em que o resultado matemático tende a 100%. Tal abordagem reflete o princípio de que não existem sistemas absolutamente seguros, alinhando o modelo computacional à realidade operacional e às boas práticas de engenharia de confiabilidade.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu demonstrar, de forma abrangente e fundamentada, a relevância estratégica da análise de redundância em subestações elétricas destinadas ao atendimento de cargas críticas. Em ambientes onde a continuidade operacional é indispensável, como *data centers* e, em especial, unidades vinculadas ao Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, a confiabilidade do suprimento elétrico assume papel central para a segurança, estabilidade e eficiência dos processos.

O Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Morro da Igreja (DTCEA-MDI) ilustra de maneira exemplar esse contexto, pois qualquer interrupção no fornecimento de energia pode comprometer diretamente sistemas de vigilância, comunicações aeronáuticas, monitoramento meteorológico e demais atividades essenciais ao gerenciamento do tráfego aéreo. Assim, a análise realizada vai além de uma avaliação técnica pontual, contribuindo para a compreensão de um componente vital da infraestrutura do controle aéreo brasileiro.

Ao longo da pesquisa, verificou-se que a redundância elétrica não deve ser tratada como um elemento complementar, mas como parte estruturante do projeto de instalações críticas. A análise detalhada da topologia da subestação, dos componentes e dos caminhos redundantes de alimentação demonstrou que a integridade funcional do sistema não depende apenas do conhecimento isolado sobre os equipamentos. Mais do que compreender a função de cada dispositivo, é imprescindível entender como eles se interligam, como interagem entre si e quais impactos produzem sobre toda a arquitetura elétrica quando entram em falha. Essa visão sistêmica revelou-se fundamental para explicar o comportamento global da instalação e para avaliar sua capacidade de suportar eventos contingenciais.

O estudo exigiu superar desafios técnicos, conceituais e metodológicos. A interpretação minuciosa do esquema unifilar da subestação exigiu não apenas domínio de sistemas elétricos, mas também entendimento das topologias aplicadas a infraestruturas de missão crítica. Ademais, foi necessário investigar normas nacionais e internacionais, consultar literatura especializada e compreender as particularidades operacionais de instalações de controle do espaço aéreo. A elaboração do modelo quantitativo demandou aprendizado aprofundado da linguagem Python, desenvolvimento de rotinas específicas e aplicação de métodos probabilísticos, como

a simulação de Monte Carlo. Esses desafios contribuíram para enriquecer o processo formativo e ampliar a maturidade técnica do trabalho.

Os resultados obtidos demonstraram validade e relevância. A análise permitiu identificar pontos críticos, avaliar a eficiência das redundâncias existentes e quantificar a confiabilidade da subestação por meio de indicadores como MTBF, MTTR, taxa de falhas e função de confiabilidade. As simulações computacionais evidenciaram o comportamento da instalação diante de diferentes combinações de falhas, revelando seu grau de resiliência e permitindo antecipar cenários de risco operacional. A integração entre análise documental, modelagem estrutural e simulação computacional proporcionou uma visão sistêmica consistente da infraestrutura estudada, reforçando o potencial de aplicação prática dos métodos empregados.

Com essa abordagem, ficou claro que a redundância atua não apenas como mecanismo de contingência, mas como ferramenta para diagnóstico estrutural da subestação. A análise dos caminhos de alimentação revelou áreas de maior robustez e pontos de vulnerabilidade capazes de comprometer a disponibilidade global do sistema. Essas informações são valiosas para subsidiar o planejamento de manutenção, propostas de modernização, revisão de projetos e ações de mitigação de riscos. Dessa forma, o estudo contribui tanto para o entendimento da situação atual da instalação quanto para seu aprimoramento contínuo.

Outro aspecto significativo refere-se aos procedimentos desenvolvidos. A combinação entre a interpretação técnica do esquema unifilar, a modelagem topológica, a simulação de Monte Carlo e a análise de indicadores de confiabilidade mostrou-se aplicável a outras subestações destinadas ao atendimento de cargas essenciais, sejam elas civis, militares, hospitalares, industriais ou de telecomunicações. Essa capacidade de adaptação confere ao trabalho um valor acadêmico ampliado e reforça sua utilidade prática para engenheiros, planejadores e gestores responsáveis por sistemas elétricos críticos.

Por fim, esta pesquisa destaca-se por integrar de maneira coesa aspectos técnicos, metodológicos e computacionais, resultando em um estudo robusto sobre a confiabilidade elétrica do DTCEA-MDI. O trabalho reafirma a importância da disponibilidade energética para o funcionamento seguro do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro e evidencia o impacto estratégico da redundância nesse tipo de infraestrutura. Espera-se que os resultados apresentados sirvam de base para

aprimoramentos futuros, subsidiem decisões de engenharia, apoiem análises de risco e inspirem estudos similares em outras unidades operacionais. Assim, o trabalho cumpre sua função científica e institucional, contribuindo para o fortalecimento das práticas de segurança, continuidade e resiliência em sistemas críticos do país.

4.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

O presente trabalho utilizou dados aproximados e simulações de Monte Carlo para estimar a confiabilidade e a disponibilidade da subestação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Morro da Igreja. Para trabalhos futuros, recomenda-se a coleta de informações diretamente do SILOMS, permitindo análises mais precisas e condizentes com a operação real da subestação e dos serviços críticos. É fundamental que haja uma forte interação com os mantenedores, garantindo que os dados sejam lançados de forma fidedigna e completa, o que aumentaria significativamente a confiabilidade das análises.

Além disso, o código e a metodologia desenvolvidos podem ser aprimorados para criar uma ferramenta de gestão no ramo da manutenção, com potencial de expansão para diferentes áreas e sistemas. Essa ferramenta poderia apoiar o planejamento e controle das atividades de manutenção, melhorar a manutenibilidade dos sistemas, reduzir custos operacionais e de manutenção, otimizar a alocação de recursos e facilitar a tomada de decisões estratégicas, promovendo maior economicidade e eficiência.

A modelagem de falhas também pode ser expandida. Atualmente, a análise considera falhas aleatórias simples, mas estudos futuros poderiam incluir falhas dependentes, manutenção preventiva programada, efeitos de redundância parcial e falhas em sistemas de proteção, tornando o modelo mais completo e realista. Além disso, a análise pode ser ampliada para incluir múltiplas unidades do CINDACTA 2, permitindo avaliar a confiabilidade global do sistema de controle do espaço aéreo em escala maior, considerando as interdependências entre subestações.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros explorem análises de sensibilidade, avaliando como variações em parâmetros de falha, tempos de manutenção e redundâncias impactam a confiabilidade global. Também seria relevante desenvolver dashboards interativos e relatórios gráficos detalhados, facilitando a interpretação dos resultados por gestores e técnicos e apoiando decisões

estratégicas de manutenção e investimento. Com essas ações, aliadas à colaboração próxima com os mantenedores e ao uso de dados fidedignos, a metodologia atual poderia se consolidar como uma ferramenta abrangente, confiável e estratégica, aplicável a diversos ramos da manutenção e capaz de gerar benefícios tanto técnicos quanto econômicos.

REFERÊNCIAS

ABB. **Quatro abordagens para entender melhor a disponibilidade dos datacenters**. 2024. Disponível em: <https://new.abb.com/news/pt-br/detail/14073/quatro-abordagens-para-entender-melhor-a-disponibilidade-dos-datacenters>. Acesso em: 21 jul. 2024.

ABNT. **ISO/IEC 31010:2012**: Gestão de riscos: técnicas para o processo de avaliação de riscos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR ISO/IEC 22237-1:2023**: Tecnologia da informação – Instalações e infraestruturas de data center – Parte 1: Conceitos gerais. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT. **NBR ISO/IEC 22237-3:2023**: Tecnologia da informação – Instalações e infraestruturas de data center – Parte 3: Distribuição de energia. Rio de Janeiro, 2023.

ALBANA, A.; DARJI, H. A.; IMAMURA, A.; NAKAYAMA, M. K. **Efficient Monte Carlo methods for estimating failure probabilities**. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 148, p. 1-10, 2016. Disponível em: <https://web.njit.edu/~marvin/papers/rismc-ress-final.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2024.

ARREGOCES, M.; PORTOLANI, M. **Fundamentals of Data Center**. São Paulo: Cisco Press, 2004. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=DRlryrLoxKkC&oi=fnd&pg=PR36>. Acesso em: 21 jul. 2024.

BARROS, B. F. de; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BARROS, B. F. de; GEDRA, R. L. **Cabine primária: subestações de alta tensão de consumidor**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2018.

BARROSO, L. A.; HÖLZLE, U.; RANGANATHAN, P. **The datacenter as a computer: designing warehouse-scale machines**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

CONDUSCAMP. **Cabos de média tensão: definição, características e vantagens**. Disponível em: <https://conduscamp.com.br/blog/cabos-de-media-tensao-definicao-caracteristicas-e-vantagens/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to algorithms**. 4. ed. Cambridge: MIT Press, 2022.

DECEA – DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Instrução do Comando da Aeronáutica ICA 66-36: Implantação/Substituição de Sistemas de Energia do SISCEAB**. Brasília: DECEA, 2019. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-66-36>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FRACALOSSO JUNIOR, J. S. **Eficiência energética em data center: estudo de caso Univates**. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia

Elétrica) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2015. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/items/1c1aec57-5151-4c52-8e69-2aafb718854a>. Acesso em: 21 jul. 2024.

FREEPIK. **Barramento de média tensão com isolamento de cobertura.**

Disponível em: https://br.freepik.com/fotos-premium/barramento-de-media-tensao-com-isolamento-de-cobertura_17627744.htm. Acesso em: 21 jul. 2024.

G1. **Curto-circuito interrompeu energia no Cindacta.** Brasília, 21 jul. 2007.

Disponível em: <https://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL74782-5598,00-CURTOCIRCUITO+INTERROMPEU+ENERGIA+NO+CINDACTA.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo methods.** London: Methuen, 1964.

HAYES, J. P.; PATTON, R. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers.** 7. ed. London: Elsevier, 1998.

ITENSAO. **Transformador de baixa tensão.** Disponível em:

<https://www.itensao.com.br/transformador-de-baixa-tensao>. Acesso em: 07 ago. 2024.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais.** Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos.** Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MCDONALD, J. D.; JOHNSON, T. R. **Electric power substations engineering.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

MESH ENGENHARIA. **Terminações de cabos de média tensão.** 2023. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2023/04/10/terminacoes-de-cabos-de-media-tensao/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

O'CONNOR, P. **Practical reliability engineering.** 5. ed. Chichester: Wiley, 2012.

ODATACOLLOCATION. **Um data center pode garantir 100% de uptime?**

Disponível em: <https://odatacollocation.com/blog/um-data-center-pode-garantir-de-downtime/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

RAUSAND, M. **Reliability of safety-critical systems.** London: Springer, 1998.

REHTOM. **Chave seccionadora de média tensão.** Disponível em:

<https://www.rehtom.com.br/chaves-seccionadoras#15kv>. Acesso em: 29 dez. 2025.

SOEIRO, F. A. **Gestão da manutenção: fundamentos e aplicações.** São Paulo: Blucher, 2017.

TIA. **TIA-942: Telecommunications infrastructure standard for data centers**. Arlington: Telecommunications Industry Association, 2017.

UPTIME INSTITUTE. **Tier standard: topology**. Santa Fe, NM: Uptime Institute, 2018.

ZEITTEC. **Redundância de data center**. 18 maio 2021. Disponível em: <https://zeittec.com.br/redundancia-de-data-center/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

ANEXOS

ANEXO A – Código Fonte Sobre Confiabilidade e Disponibilidade

```
import dash
from dash import dcc, html, Input, Output, State, callback_context, no_update
import dash_cytoscape as cyto
import pandas as pd
import math
import numpy as np
import plotly.graph_objects as go
from dash.exceptions import PreventUpdate
from io import BytesIO
import time
import os, json

# -----
# Inicialização do App
# -----
app = dash.Dash(__name__)
app.title = "DTCEA-MDI - Análise de Confiabilidade"

# -----
# Dados Iniciais
# -----
componentes = [f"N{i}" for i in range(1, 35)]
NO_SAIDA = "CARGA"

df_base = pd.DataFrame({
    "Componente": componentes,
    "TEO": [96840.0]*len(componentes),
    "Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)":
[30.0]*len(componentes),
    "Num_Paradas_Corretivas": [1.0]*len(componentes),
    "Tempo_Manutencao_Corretiva (h)": [1.0]*len(componentes)
})

def recompute(df_):
    df_ = df_.copy()
    # garantir colunas e tipos
    df_["Num_Paradas_Corretivas"] =
pd.to_numeric(df_["Num_Paradas_Corretivas"],
errors="coerce").fillna(1).replace(0, 1)
    df_["TEO"] = pd.to_numeric(df_["TEO"], errors="coerce").fillna(0)
    df_["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"] =
pd.to_numeric(df_["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"],
errors="coerce").fillna(0)
```

```

    df_["Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"] =
pd.to_numeric(
    df_["Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"],
    errors="coerce").fillna(0)

    df_["MTBF"] = (df_["TEO"] - df_["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"]) /
df_["Num_Paradas_Corretivas"]
    df_["MTTR"] = df_["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"] /
df_["Num_Paradas_Corretivas"]
    denom = df_["MTBF"] + df_["MTTR"] + df_["Manutenção Preventiva ou
Problemas Operacionais (h)"]
    denom = denom.replace(0, 1e-12)
    df_["Disponibilidade"] = df_["MTBF"] / denom
    return df_

df_default = recompute(df_base)

# -----
# Persistência em JSON
# -----
FILE_JSON = "dados.json"

def carregar_dados_persistidos():
    if os.path.exists(FILE_JSON):
        try:
            with open(FILE_JSON, "r", encoding="utf-8") as f:
                data = json.load(f)
            df_loaded = pd.DataFrame(data)
            # se estiver faltando colunas ou vazio, retorna df_default
            base_cols = ["Componente", "TEO", "Manutenção Preventiva ou
Problemas Operacionais (h)",
                        "Num_Paradas_Corretivas", "Tempo_Manutencao_Corretiva
(h)"]
            if df_loaded.empty or not all(c in df_loaded.columns for c in
base_cols):
                return df_default.copy()
            return recompute(df_loaded)
        except Exception as e:
            print(f"[PERSISTÊNCIA] Falha ao carregar JSON: {e}")
            return df_default.copy()
    else:
        return df_default.copy()

def salvar_dados_persistidos(df_to_save):
    try:
        with open(FILE_JSON, "w", encoding="utf-8") as f:
            json.dump(df_to_save.to_dict("records"), f, ensure_ascii=False,
indent=2)
    except Exception as e:

```

```

        print(f"[PERSISTÊNCIA] Falha ao salvar JSON: {e}")

# -----
# Definição dos Caminhos
# -----
caminhos = {
    "C1": ["N1", "N2", "N3", "N4", "N5", "N6", "N7", "N8", "N9", "N10", "N11", "N20",
NO_SAIDA],
    "C2":
["N1", "N2", "N3", "N12", "N13", "N14", "N15", "N16", "N17", "N18", "N19", "N20",
NO_SAIDA],
    "C3": ["N21", "N22", "N25", "N9", "N10", "N11", "N20", NO_SAIDA],
    "C4": ["N28", "N29", "N30", "N17", "N18", "N19", "N20", NO_SAIDA],
    "C5":
["N1", "N2", "N3", "N4", "N5", "N6", "N7", "N31", "N32", "N17", "N18", "N19", "N20",
NO_SAIDA],
    "C6":
["N1", "N2", "N3", "N12", "N13", "N14", "N15", "N33", "N34", "N9", "N10", "N11", "N20",
NO_SAIDA],
    "C7": ["N21", "N22", "N23", "N24", "N17", "N18", "N19", "N20", NO_SAIDA],
    "C8": ["N28", "N29", "N26", "N27", "N9", "N10", "N11", "N20", NO_SAIDA]
}

# -----
# Posições dos Nós (mantive as suas posições originais)
# -----
positions = {
    "N21": (40,100), "N22": (40,200), "N23": (-300,200), "N24": (-300,360),
"N25": (40,440),
    "N1": (280,-100), "N2": (280,-20), "N3": (280,60),
    "N4": (140,60), "N5": (140,140), "N6": (140,220), "N7": (140,300), "N8":
(140,380),
    "N31": (-200,240), "N32": (-200,420),
    "N9": (140,480), "N10": (140,560), "N11": (140,640),
    "N12": (440,60), "N13": (440,140), "N14": (440,220), "N15": (440,300),
"N16": (440,400),
    "N33": (600,300), "N34": (600,380),
    "N28": (280,160), "N29": (280,265), "N30": (-60,265),
    "N26": (280,400), "N27": (280,560),
    "N17": (-60,350), "N18": (-60,450), "N19": (-60,560),
    "N20": (5,700), NO_SAIDA: (5,810)
}

for comp in componentes:
    if comp not in positions:
        positions[comp] = (800, 20 + 20*int(comp.replace("N","")))

# -----
# Funções auxiliares
# -----

```

```

def color_by_availability(d):
    d = float(d)
    if d >= 0.99: return "#27ae60"
    elif d >= 0.95: return "#d6c90e"
    elif d >= 0.90: return "#e67e22"
    elif d >= 0.80: return "#d35400"
    else: return "#c0392b"

def make_nodes(df_, active_paths=None, selected_comp=None):
    nodes = []
    active_paths = active_paths or []

    for _, r in df_.iterrows():
        comp = r["Componente"]
        disp = float(r.get("Disponibilidade", 1.0))
        mtbf = float(r.get("MTBF", 0))
        mttr = float(r.get("MTTR", 0))
        color = color_by_availability(disp)
        style = {
            "background-color": color,
            "border-color": "#2c3e50",
            "border-width": 2,
            "width": 80,
            "height": 40
        }
        if active_paths and any(comp in caminhos[p] for p in active_paths):
            style["border-color"] = "#3498db"
            style["border-width"] = 3
        if selected_comp == comp:
            style["border-color"] = "#2980b9"
            style["border-width"] = 4

        title_text = f"{comp}\nMTBF: {mtbf:.1f} h\nMTTR: {mttr:.1f} h\nDisp: {disp:.5f}"

        nodes.append({
            "data": {"id": comp, "label": comp, "title": title_text},
            "position": {"x": positions[comp][0], "y": positions[comp][1]},
            "style": style,
            "selected": False
        })

    # garantir nó de saída
    if NO_SAIDA not in [n["data"]["id"] for n in nodes]:
        nodes.append({
            "data": {"id": NO_SAIDA, "label": NO_SAIDA, "title": NO_SAIDA},
            "position": {"x": positions[NO_SAIDA][0], "y":
positions[NO_SAIDA][1]},

```

```

        "style": {"background-
color": "#95a5a6", "color": "#111", "width": 100, "height": 50},
        "selected": False
    })

    return nodes

def make_edges(caminhos_, active_paths=None):
    edges = []
    active_paths = active_paths or []

    for path_name, path in caminhos_.items():
        for i in range(len(path)-1):
            source, target = path[i], path[i+1]
            if source is None or target is None:
                continue
            style = {
                "line-color": "#201F1F",
                "width": 2,
                "opacity": 0.7,
                "target-arrow-shape": "triangle"
            }
            if path_name in active_paths:
                style = {
                    "line-color": "#100DCE",
                    "width": 5,
                    "opacity": 1.0,
                    "target-arrow-shape": "triangle"
                }
            edges.append({
path_name},
                "data": {"source": source, "target": target, "path":
                "style": style
            })
    return edges

def compute_path_availability(df_, caminhos_):
    avail = {}
    for k, v in caminhos_.items():
        prod = 1.0
        for comp in v:
            disp =
df_.loc[df_["Componente"]==comp, "Disponibilidade"].values[0] if comp !=
NO_SAIDA else 1.0
            prod *= disp
        avail[k] = prod
    return avail

def compute_global_availability(path_av):

```

```

return 1.0 - math.prod([1 - v for v in path_av.values()])

def create_component_table(df_, tempo=720):
    descricoes = {
        "N1": "CELESC_Alimentação do Concessionária em 23,1 kV",
        "N2": "SEC_1_Seccionadora do Pannel de Alta Tensão",
        "N3": "DJ_M1_Disjuntor Alta Tensão",
        "N4": "SEC_2_Seccionadora da Linha Azul",
        "N5": "DJ M2_Disjuntor Alta Tensão Linha Azul",
        "N6": "TRAFO 1_Transformador 1 de 23,1 kV para 380/220 V",
        "N7": "DJ B1",
        "N8": "DM_3",
        "N9": "DJG 1",
        "N10": "DNB_1",
        "N11": "NOBREAK 1",
        "N12": "SEC_3",
        "N13": "DJ M3",
        "N14": "TRAFO 2",
        "N15": "DJ B2",
        "N16": "DM6",
        "N17": "DJG 2",
        "N18": "DNB 2",
        "N19": "NOBREAK 2",
        "N20": "CHAVE ESTÁTICA",
        "N21": "GMG 1",
        "N22": "DGG 1",
        "N23": "DF 2",
        "N24": "DM_7",
        "N25": "DM_1",
        "N26": "DF_6",
        "N27": "DM_2",
        "N28": "GMG 2",
        "N29": "DGG 2",
        "N30": "DM_8",
        "N31": "DF1",
        "N32": "DM_5",
        "N33": "DF 3",
        "N34": "DM_4"
    }

    df_["Descrição"] = df_["Componente"].map(descricoes)
    cols = ["Componente", "Descrição", "Manutenção Preventiva ou Problemas  
Operacionais (h)", "Num_Paradas_Corretivas",  
           "Tempo_Manutencao_Corretiva (h)", "MTBF", "MTTR",  
           "Disponibilidade", "Confiabilidade"]

    header = [html.Th(c, style={"padding":"8px", "border":"1px solid #ddd",  
"text-align":"center"}) for c in cols]

```

```

rows = []
for _, r in df_.iterrows():
    disp = float(r["Disponibilidade"])
    mtbf = float(r["MTBF"])
    conf = math.exp(-(1/mtbf) * tempo) if mtbf > 0 else 0.0

    row_style = {
        "background-color": color_by_availability(disp),
        "color": "white" if disp < 0.95 else "#03070a",
        "text-align": "center"
    }

    cells = [
        html.Td(r["Componente"], style={"padding":"8px","border":"1px
solid #ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(r["Descrição"], style={"padding":"8px","border":"1px solid
#ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{float(r['Manutenção Preventiva ou Problemas
Operacionais (h)']):.0f}", style={"padding":"8px","border":"1px solid
#ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{float(r['Num_Paradas_Corretivas']):.0f}",
style={"padding":"8px","border":"1px solid #ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{float(r['Tempo_Mantencao_Corretiva (h)']):.0f}",
style={"padding":"8px","border":"1px solid #ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{float(r['MTBF']):.1f}",
style={"padding":"8px","border":"1px solid #ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{float(r['MTTR']):.1f}",
style={"padding":"8px","border":"1px solid #ddd","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{disp*100:.3f}%", style={"padding":"8px","border":"1px
solid #ddd","font-weight":"bold","text-align":"center"}),
        html.Td(f"{conf*100:.3f}%", style={"padding":"8px","border":"1px
solid #ddd","font-weight":"bold","text-align":"center","color":"#040708"})
    ]
    rows.append(html.Tr(cells, style=row_style))

return html.Table([html.Thead(html.Tr(header)), html.Tbody(rows)],
style={"border-
collapse":"collapse","width":"100%","margin":"10px 0","box-shadow":"0 1px 3px
rgba(0,0,0,0.1)"}))

def create_confabilidade_plot(df_, tempo_analise=200):
    try:
        tempos = np.linspace(0, tempo_analise*2, 5000)
        fig = go.Figure()
        for _, row in df_.iterrows():
            mtbf = row["MTBF"]
            if mtbf > 0:
                conf = np.exp(-tempos/mtbf)
                fig.add_trace(go.Scatter(

```

```

        x=tempos,
        y=conf,
        mode='lines',
        name=row["Componente"],
        visible='legendonly',
        hovertemplate='<b>{%fullData.name}</b><br>Tempo:
        {%x:.1f}h<br>Confiabilidade: {%y:.3%}<extra></extra>'
    ))
    fig.add_vline(x=tempo_analise, line_dash="dash", line_color="red",
                  annotation_text=f"Tempo de Análise: {tempo_analise}h")
    fig.update_layout(title="Confiabilidade dos Componentes ao Longo do
    Tempo",
                      xaxis_title="Tempo (horas)",
    yaxis_title="Confiabilidade",
                      hovermode="x unified", height=400)

    return fig
except Exception as e:
    print(f"Erro ao criar gráfico: {str(e)}")
    return go.Figure()

def monte_carlo_simulation(df_, caminhos_, tempo=720, n_iter=100000):
    try:
        mtbf = df_["MTBF"].values
        comps = df_["Componente"].values
        n_comp = len(comps)
        rand_matrix = np.random.rand(n_iter, n_comp)
        prob_up = np.exp(-(1/mtbf) * tempo)
        up_matrix = (rand_matrix < prob_up).astype(int)
        comp_index = {c: i for i, c in enumerate(comps)}
        path_results = {}
        for path_name, path_comps in caminhos_.items():
            idxs = [comp_index[c] for c in path_comps if c != NO_SAIDA]
            if not idxs:
                path_results[path_name] = 0.0
                continue
            path_up = np.all(up_matrix[:, idxs], axis=1)
            path_results[path_name] = path_up.mean()
        global_conf = 1.0 - np.prod([1 - v for v in path_results.values()])
        global_conf = min(global_conf, 0.99999) # limite físico (99,999%)
        return path_results, global_conf
    except Exception as e:
        print(f"Erro na simulação Monte Carlo: {str(e)}")
        return {k: 0.0 for k in caminhos_}, 0.0

# -----
# Layout Completo
# -----
availability_levels = [
    (0.99, "≥ 0.99 - Excelente"),

```

```

(0.95, "0.95 - 0.99 - Boa"),
(0.90, "0.90 - 0.95 - Média"),
(0.80, "0.80 - 0.90 - Baixa"),
(0.0, "< 0.80 - Crítica")
]
legend_items = []
for threshold, label_text in availability_levels:
    color = color_by_availability(threshold)
    legend_items.append(html.Div([html.Div(style={"width":"20px","height":"20px",
"background-color":color,"display":"inline-block","margin-right":"5px",
"border":"1px solid #000"}), html.Span(label_text)],
style={"margin-right":"15px","display":"inline-block"}))
legend_div = html.Div(legend_items, style={"display":"flex","flex-wrap":"wrap",
"align-items":"center","padding":"10px 0","border-bottom":"1px solid #ddd"})

df_initial = carregar_dados_persistidos()

# escolher componente inicial de forma robusta
if not df_initial.empty and "N1" in df_initial["Componente"].values:
    initial_comp = "N1"
else:
    initial_comp = df_initial["Componente"].iloc[0] if not df_initial.empty
else componentes[0]

initial_row = df_initial[df_initial["Componente"]==initial_comp].iloc[0] if
not df_initial.empty else
df_default[df_default["Componente"]==initial_comp].iloc[0]

app.layout = html.Div([
    dcc.Store(id="store-df", data=df_initial.to_dict("records")),
    dcc.Store(id="store-selected-comp", data=initial_comp),

    html.Div([
        html.H1("DTCEA-MDI – Análise de Confiabilidade", style={"text-align":"center",
"color":"#2c3e50","margin-bottom":"20px"}),

        html.Div([
            html.Div([
                cyto.Cytoscape(
                    id="cyt",
                    layout={"name":"preset"},
                    style={"width":"100%","height":"700px","background":"#f9f9f9",
"border-radius":"5px","box-shadow":"0 1px 3px rgba(0,0,0,0.1)"},
                    elements=make_nodes(df_initial,
selected_comp=initial_comp)+make_edges(caminhos),
                    stylesheet=[

```

```

        {"selector": "node", "style": {"content": "data(label)", "shape": "rectangle", "text-valign": "center", "text-halign": "center", "font-size": 20, "color": "#040608", "text-wrap": "wrap", "width": 120, "height": 80}},
        {"selector": "edge", "style": {"curve-style": "taxi", "taxi-direction": "horizontal", "taxi-turn": 20, "line-color": "#091111", "width": 2, "target-arrow-shape": "triangle", "target-arrow-color": "#7f8c8d"}}},
        {"selector": "node:selected", "style": {"border-color": "#2980b9", "border-width": 6}}
    ]
)
], style={"width": "65%", "display": "inline-block", "vertical-align": "top"}),

html.Div([
    html.H4("Dados do componente",
style={"color": "#2c3e50", "margin-bottom": "10px"}),
    html.Div(f"Dados do componente: {initial_comp}", id="selected-comp",
style={"font-weight": "bold", "margin": "10px 0", "padding": "10px", "background": "#3498db", "color": "white", "border-radius": "4px", "text-align": "center"}),

    html.Label("Tempo Esperado de Operação (h)"),
    dcc.Input(id="inp-teo", type="number",
value=float(initial_row["TEO"]), step="any", style={"width": "100%", "margin-bottom": "10px"}),

    html.Label("Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"),
    dcc.Input(id="inp-parado", type="number",
value=float(initial_row["Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"]), step="any", style={"width": "100%", "margin-bottom": "10px"}),

    html.Label("Num_Paradas_Corretivas"),
    dcc.Input(id="inp-npar", type="number",
value=float(initial_row["Num_Paradas_Corretivas"]), step="any",
style={"width": "100%", "margin-bottom": "10px"}),

    html.Label("Tempo de Manutenção Corretiva (h)"),
    dcc.Input(id="inp-manut", type="number",
value=float(initial_row["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"]), step="any",
style={"width": "100%", "margin-bottom": "10px"}),

    html.Label("Tempo de Análise da Confiabilidade (h)"),
    dcc.Input(id="inp-tempo", type="number", value=720.0,
step=1.0, style={"width": "100%", "margin-bottom": "10px"}),

```

```

        html.Button("Salvar Alterações", id="btn-save", n_clicks=0,
style={"width":"100%", "background":"#2ecc71", "color":"white", "margin-
bottom":"10px"}),
        html.Button("Resetar Dados", id="btn-reset", n_clicks=0,
style={"width":"100%", "background":"#e74c3c", "color":"white", "margin-
bottom":"20px"}),

        html.H4("Disponibilidade do Componente"),
        html.Div([
            html.Div([html.Div("MTBF:", style={"flex":"0 0
120px", "font-weight":"bold"}), html.Div(f"{float(initial_row['MTBF']):.1f}",
id="display-mtbf", style={"flex":"1"})],
style={"display":"flex", "padding":"4px"}),
            html.Div([html.Div("MTTR:", style={"flex":"0 0
120px", "font-weight":"bold"}), html.Div(f"{float(initial_row['MTTR']):.1f}",
id="display-mttr", style={"flex":"1"})],
style={"display":"flex", "padding":"4px"}),
            html.Div([html.Div("Disponibilidade:", style={"flex":"0 0
120px", "font-weight":"bold"}),
html.Div(f"{float(initial_row['Disponibilidade'])*100:.3f}%", id="display-
disp", style={"flex":"1"}), style={"display":"flex", "padding":"4px"}),
            html.Div([html.Div("Confiabilidade:", style={"flex":"0 0
120px", "font-weight":"bold"}), html.Div(f"{math.exp(-
(1/float(initial_row['MTBF'])) * 720)*100:.3f}%", id="display-conf",
style={"flex":"1"})], style={"display":"flex", "padding":"4px"})
        ]),

        html.H4("Selecione para para Análise de Confiabilidade do
Caminho."),
        html.Div(id="div-caminhos"),

        html.H4("Confiabilidade do sistema"),
        html.Div("", id="div-global", style={"font-
weight":"bold", "color":"#27ae60", "font-size":"20px"}),

        html.Button("Exportar Relatório", id="btn-export",
style={"width":"100%", "background":"#3498db", "color":"white", "margin-
top":"20px"}),
        dcc.Download(id="download-report")
    ], style={"width":"32%", "display":"inline-block", "vertical-
align":"top", "padding-left":"20px"})
    ]),

    html.H4("Legenda de Disponibilidade", style={"margin-
top":"20px", "margin-bottom":"10px"}),
    legend_div,
    html.Div(id="div-table", style={"margin-top":"20px"}),
    dcc.Graph(id="graph-confiabilidade", style={"margin-top":"20px"})

```

```

    ], style={"padding":"20px","max-width":"1400px","margin":"0 auto","font-
family":"Arial, sans-serif"})
])

# -----
# Callbacks
@app.callback(
    Output("div-table", "children"),
    Output("cyt", "elements"),
    Output("selected-comp", "children"),
    Output("store-selected-comp", "data"),
    Output("inp-teo", "value"),
    Output("inp-parado", "value"),
    Output("inp-npar", "value"),
    Output("inp-manut", "value"),
    Output("div-caminhos", "children"),
    Output("display-mtbf", "children"),
    Output("display-mttr", "children"),
    Output("display-disp", "children"),
    Output("display-conf", "children"),
    Output("div-global", "children"),
    Output("store-df", "data"),
    Input("btn-save", "n_clicks"),
    Input("cyt", "tapNodeData"),
    Input({"type": "dynamic-check", "index": dash.ALL}, "value"),
    Input("btn-reset", "n_clicks"),
    State("inp-tempo", "value"),
    State("store-selected-comp", "data"),
    State("inp-teo", "value"),
    State("inp-parado", "value"),
    State("inp-npar", "value"),
    State("inp-manut", "value"),
    State("store-df", "data")
)

def update_all(n_clicks, tapnode, checked_values, n_clicks_reset, tempo,
store_selected, teo, hpar, npar, manut, store_data):
    ctx = callback_context
    trigger = ctx.triggered[0]["prop_id"].split(".")[0] if ctx.triggered else
    ""

    df_local = pd.DataFrame(store_data)
    selected_paths = []
    if checked_values:
        for v in checked_values:
            if v:
                selected_paths.extend(v)

    # Reset
    if trigger == "btn-reset":
        df_local = df_default.copy()

```

```

        if "MonteCarloTempo" in df_local.columns:
            df_local.drop(columns=["MonteCarloTempo"], inplace=True)
        df_local = recompute(df_local)

        # componente selecionado a partir do store (fallback para primeiro
        # componente válido)
        selected_comp = store_selected if isinstance(store_selected, str) and
        store_selected in df_local["Componente"].values else
        (df_local["Componente"].iloc[0] if not df_local.empty else "N1")
        selected_text_output = f"Componente selecionado: {selected_comp}"

        # se clicou no grafo, prioriza o nó clicado (e ignora o NO_SAIDA)
        if trigger == "cyt" and tapnode and isinstance(tapnode, dict) and "id" in
        tapnode and tapnode["id"] != NO_SAIDA:
            selected_comp = tapnode["id"]
            selected_text_output = f"Componente selecionado: {selected_comp}"

        # garantir componente válido
        if selected_comp not in df_local["Componente"].values:
            selected_comp = df_local["Componente"].iloc[0] if not df_local.empty
        else "N1"
            selected_text_output = f"Componente selecionado: {selected_comp}"

        changed = False
        recalc_conf = False

        # salvar alterações
        if trigger == "btn-save" and selected_comp:
            matched = df_local[df_local["Componente"]==selected_comp]
            if not matched.empty:
                row = matched.iloc[0]
                if (float(row["TEO"]) != float(teo)) or (float(row["Manutenção
                Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"]) != float(hpar)) or \
                    (float(row["Num_Paradas_Corretivas"]) != float(npar)) or
                    (float(row["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"]) != float(manut)):
                    changed = True
                    recalc_conf = True
                    df_local.loc[df_local["Componente"]==selected_comp, "TEO"] =
                    max(0, float(teo))
                    df_local.loc[df_local["Componente"]==selected_comp, "Manutenção
                    Preventiva ou Problemas Operacionais (h)"] = max(0, float(hpar))
                    df_local.loc[df_local["Componente"]==selected_comp, "Num_Parada
                    s_Corretivas"] = max(1, float(npar))
                    df_local.loc[df_local["Componente"]==selected_comp, "Tempo_Manu
                    tencao_Corretiva (h)"] = max(0, float(manut))
                    df_local = recompute(df_local)

        # MonteCarlo tempo
        if "MonteCarloTempo" in df_local.columns:

```

```

    try:
        prev_tempo = float(df_local["MonteCarloTempo"].iloc[0])
        if prev_tempo != float(tempo):
            recalc_conf = True
    except:
        recalc_conf = True
    else:
        recalc_conf = True
    df_local["MonteCarloTempo"] = float(tempo)

    if trigger == "btn-reset":
        recalc_conf = True

    df_updated = recompute(df_local.copy())

    # elements
    elements = make_nodes(df_updated, active_paths=selected_paths,
selected_comp=selected_comp) + make_edges(caminhos,
active_paths=selected_paths)

    # tabela
    table_comp = create_component_table(df_updated, tempo=float(tempo))

    # caminhos (checkbox list)
    caminho_items = []
    for k, path in caminhos.items():
        checked = k in selected_paths
        conf_path = 1.0
        for comp in path:
            if comp != NO_SAIDA:
                mtbf_c =
float(df_updated.loc[df_updated["Componente"]==comp,"MTBF"].values[0])
                conf_path *= math.exp(-float(tempo) / mtbf_c if mtbf_c > 0
else 0.0)
            label = html.Div([
                dcc.Checklist(options=[{"label": k, "value": k}], value=[k] if
checked else [], id={"type":"dynamic-check","index":k},
                LabelStyle={"margin":0, "padding":0, "display":
"flex", "align-items": "center"}),
                html.Span(f"{conf_path*100:.3f}%", style={"margin-
left":"15px","color":"#27ae60" if conf_path>=0.99 else "#e67e22","font-
weight":"bold"})
            ], style={"display":"flex","align-items":"center","margin-
bottom":"4px"})
            caminho_items.append(label)

    # preencher inputs do componente selecionado
    if selected_comp and selected_comp in df_updated["Componente"].values:
        row = df_updated[df_updated["Componente"]==selected_comp].iloc[0]

```

```

        teo_v = float(row["TEO"])
        hpar_v = float(row["Manutenção Preventiva ou Problemas Operacionais
(h)"])
        npar_v = float(row["Num_Paradas_Corretivas"])
        manut_v = float(row["Tempo_Manutencao_Corretiva (h)"])
        mtbf_v = f"{float(row['MTBF']):.1f}"
        mttr_v = f"{float(row['MTTR']):.1f}"
        disp_v = f"{float(row['Disponibilidade'])*100:.3f}%"
        prob_up = math.exp(-(1/float(row["MTBF"])) * float(tempo)) if
float(row["MTBF"]) > 0 else 0.0
        conf_v = f"{prob_up*100:.3f}%"
    else:
        teo_v, hpar_v, npar_v, manut_v = 0, 0, 1, 0
        mtbf_v, mttr_v, disp_v, conf_v = "0.0", "0.0", "0.0%", "0.0%"

# confiabilidade global (Monte Carlo)
if recalcul_conf:
    try:
        avg_paths, conf_global = monte_carlo_simulation(df_updated,
caminhos, tempo=float(tempo), n_iter=10000)
        conf_global = min(conf_global, 0.99999) # limite físico (99,999%)
        conf_global_txt = f"{conf_global*100:.3f}%"
    except Exception as e:
        print(f"Erro Monte Carlo: {e}")
        conf_global_txt = "Erro no cálculo"
else:
    conf_global_txt = ""

# persistência quando necessário
if trigger in ("btn-save", "btn-reset"):
    salvar_dados_persistidos(df_updated)

# retornar também o store-selected-comp (id puro)
return (
    table_comp,
    elements,
    f"Componente selecionado: {selected_comp}",
    selected_comp,
    teo_v,
    hpar_v,
    npar_v,
    manut_v,
    caminho_items,
    mtbf_v,
    mttr_v,
    disp_v,
    conf_v,
    conf_global_txt,
    df_updated.to_dict("records")

```

```

    )

@app.callback(
    Output("graph-confiabilidade", "figure"),
    Input("store-df", "data"),
    Input("inp-tempo", "value")
)
def update_confiabilidade_graph(store_data, tempo):
    if not store_data or tempo is None:
        raise PreventUpdate
    df_ = pd.DataFrame(store_data)
    return create_confiabilidade_plot(df_, float(tempo))

@app.callback(
    Output("download-report", "data"),
    Input("btn-export", "n_clicks"),
    State("store-df", "data"),
    State("inp-tempo", "value"),
    prevent_initial_call=True
)
def export_report(n_clicks, store_data, tempo):
    if n_clicks is None or not store_data:
        raise PreventUpdate
    try:
        df_ = pd.DataFrame(store_data)
        if df_.empty:
            raise ValueError("Nenhum dado disponível para exportação")
        disponibilidade_caminhos = compute_path_availability(df_, caminhos)
        disponibilidade_global =
compute_global_availability(disponibilidade_caminhos)
        output = BytesIO()
        with pd.ExcelWriter(output, engine='xlsxwriter') as writer:
            df_.to_excel(writer, sheet_name='Componentes', index=False)
            pd.DataFrame({'Caminho': list(disponibilidade_caminhos.keys()),
'Disponibilidade (%)': [f"{val*100:.3f}" for val in
disponibilidade_caminhos.values()]}).to_excel(writer, sheet_name='Caminhos',
index=False)
            pd.DataFrame({'Métrica': ['Tempo de Análise (h)', 'Disponibilidade
Global (%)'], 'Valor': [tempo,
f"{disponibilidade_global*100:.3f}"]}).to_excel(writer, sheet_name='Resumo',
index=False)
        output.seek(0)
        timestamp = time.strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
        filename = f"Relatorio_Confiabilidade_{timestamp}.xlsx"
        return dcc.send_bytes(output.read(), filename=filename)
    except Exception as e:
        print(f"ERRO NA EXPORTAÇÃO: {str(e)}")
        return no_update

```

```
# -----  
# Rodar App  
# -----  
if __name__ == "__main__":  
    app.run(debug=True)
```