

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ELÉTRICA

Filipe Possatti Campanhola

**FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ATIVOS PARA SISTEMA  
DE POTÊNCIA EMPREGANDO OS MÉTODOS AHP E MONTE CARLO  
APLICADA A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Santa Maria, RS  
2023

**Filipe Possatti Campanhola**

**FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ATIVOS PARA SISTEMA DE  
POTÊNCIA EMPREGANDO OS MÉTODOS AHP E MONTE CARLO APLICADA A  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia de Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS  
2023

Campanhola, Filipe

FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ATIVOS PARA SISTEMA DE POTÊNCIA EMPREGANDO OS MÉTODOS AHP E MONTE CARLO APLICADA A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA / Filipe Campanhola.- 2023.  
133 p.; 30 cm

Orientador: Tiago Marchesan  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Transformadores de Potência 2. Gestão de Ativos 3. Análise Multicritério I. Marchesan, Tiago II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFEM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, FILIPE CAMPANHOLA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Filipe Possatti Campanhola**

**FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ATIVOS PARA SISTEMA DE  
POTÊNCIA EMPREGANDO OS MÉTODOS AHP E MONTE CARLO APLICADA A  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia de Elétrica**.

**Aprovado em 27 de Fevereiro de 2023:**

---

**Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Daniel Pacheco Lacerda, Dr. (UNISINOS)**

---

**Dion Lenon Prediger Feil, Dr. (UFSM)**

---

**Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr. (UFSM)**

---

**Mariana Resener, Dr. (UFRGS/SFU-Canada)**

Santa Maria, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho se deu com o auxílio e compreensão de várias pessoas, de forma especial agradeço:

- Ao meu pai, Luiz Campanhola, por ser fonte de apoio incondicional e da tranquilidade necessária nos principais momentos;

- Aos meus irmãos, pelo apoio e momentos de descontração nos fins de semana ao lado da família;

- À minha noiva, Marianna, por estar junto a todo momento, dando suporte, carinho e força para concluir cada etapa;

- Ao meu orientador, professor Tiago Marchesan, pela oportunidade, conhecimento e paciência no decorrer deste doutorado;

- Ao professor Júlio Siluk, pelo incentivo em realizar tanto o mestrado, quanto o doutorado, e pelos conhecimentos e força transmitida;

- À UFSM, pela possibilidade de realização do doutorado e pela oportunidade dada como servidor da instituição;

- Ao Núcleo de Inovação e Competitividade e todos os colegas pelo apoio e infraestrutura oportunizada;

- À CEEE Transmissão, em especial ao Rodinei Carraro, pelo apoio no projeto, fornecimento de dados e acesso;

- Aos professores e técnicos administrativos do PPGEE, pela contribuição na formação e pelo grande auxílio em todas as etapas deste caminho;

- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX), pelo apoio financeiro ao projeto;

Enfim, a todos aqueles que fazem parte da minha vida e que contribuem de alguma forma para todas as etapas dessa caminhada.

Muito obrigado!

## RESUMO

### FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ATIVOS PARA SISTEMA DE POTÊNCIA EMPREGANDO OS MÉTODOS AHP E MONTE CARLO APLICADA A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

AUTOR: Filipe Possatti Campanhola  
ORIENTADOR: Tiago Bandeira Marchesan

O sistema elétrico de potência se caracteriza pela grande presença de ativos com elevada importância sistêmica e altos valores agregados. Assim, torna-se necessário que as concessionárias busquem alternativas para melhor gestão dos seus ativos, avaliando de forma criteriosa, realizando um planejamento que atenda às demandas da forma mais rentável para sua operação e mantendo a qualidade no suprimento de energia elétrica. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo propor uma ferramenta de apoio para a gestão de ativos do sistema elétrico de potência, considerando fatores de vida útil do equipamento, importância ao sistema e aspectos financeiros, além da previsão de demanda de energia elétrica, a fim de auxiliar a concessionária no planejamento de médio e longo prazo. Para alcançar esse objetivo, este trabalho apresenta uma metodologia para análise dos critérios que impactam na tomada de decisão sobre a substituição dos equipamentos, utilizando o método multicritério *Analytic Hierarchy Process* – AHP para avaliar os critérios através da opinião de especialistas do setor e elencar os equipamentos mais críticos do sistema. Visando a análise de cenários futuros, foi desenvolvida uma ferramenta que utiliza o Método de Monte Carlo para simular o comportamento dos equipamentos durante um horizonte de tempo definido, trazendo como resultado as probabilidades de os equipamentos atingirem o carregamento limite e de estarem posicionados entre os equipamentos mais críticos do sistema no tempo simulado. Como aplicação da metodologia proposta, foi avaliado o parque de transformadores da CEEE-GT, sendo simulados três cenários com diferentes graus de liberdade para a variação dos indicadores. Como resultado, são apresentados os equipamentos mais críticos do sistema para um horizonte de 10 anos, também sendo propostas alterações que possam ser realizadas no período e impacto provável destas no carregamento dos equipamentos e na relação de transformadores críticos no sistema.

**Palavras-chave:** Sistema Elétrico de Potência. Gestão de Ativos. Análise Multicritério. Método de Monte Carlo. Transformadores de Potência.

## ABSTRACT

### ASSET MANAGEMENT SUPPORT TOOL FOR POWER SYSTEMS USING AHP AND MONTE CARLO METHODS APPLIED TO POWER TRANSFORMERS

AUTHOR: Filipe Possatti Campanhola

ADVISOR: Tiago Bandeira Marchesan

The electric power system is characterized by the large presence of assets with high systemic importance and high added values. Thus, it becomes necessary for utilities to seek alternatives for better management of their assets, carefully evaluating, and carrying out a plan that meets the demands in the most profitable way for their operation, and maintaining the quality of the electricity supply. In view of this, the present work aims to propose a support tool for the management of assets in the electric power system, considering factors of equipment useful life, importance to the system, and financial aspects, in addition to forecasting electricity demand, the in order to assist the utility in medium and long term planning. To achieve this objective, this work presents a methodology for analyzing the criteria that impact decision-making on equipment replacement, using the multicriteria Analytic Hierarchy Process – AHP method to evaluate the criteria through the opinion of industry experts and list the equipment most critical of the system. Aiming at the analysis of future scenarios, a tool was developed that uses the Monte Carlo Method to simulate the behavior of the equipment during a defined time horizon, bringing, as a result, the probabilities of the equipment reaching the limit load and being positioned among the most system critical points in simulated time. As an application of the proposed methodology, the CEEE-GT transformer park was evaluated, simulating three scenarios with different degrees of freedom for the variation of indicators. As a result, the system's most critical equipment is presented for a 10-year horizon, and changes are also proposed that can be made in the period and their likely impact on equipment loading and on the list of critical transformers in the system.

**Keywords:** Electric Power System. Asset Management. Multicriteria Analysis. Monte Carlo method. Power Transformers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de um método multicritério.....	23
Figura 2 - Estrutura hierárquica AHP. ....	25
Figura 3 – Exemplo de simulação de Monte Carlo.....	32
Figura 4 - Arquitetura da metodologia proposta. ....	35
Figura 5 - Critérios Adotados.....	40
Figura 6 – Área de atuação dos especialistas.....	43
Figura 7 – Formação dos especialistas.....	43
Figura 8 - Árvore de decisão com peso dos critérios. ....	46
Figura 9 – Análise de sensibilidade dos critérios.....	49
Figura 10 – Análise de correlação entre subcritérios. ....	50
Figura 11 - Rede Básica da CEEE Transmissão.....	53
Figura 12 – Dados Históricos de Carregamento. ....	56
Figura 13 – Distribuição do carregamento máximo dos transformadores. ....	58
Figura 14 – Distribuição do <i>Health Index</i> dos transformadores.....	58
Figura 15 – Distribuição do FEQA para os transformadores.....	59
Figura 16 – Distribuição Parcela Variável para os transformadores.....	60
Figura 17 – Distribuição do indicador Manutenção nos transformadores.....	60
Figura 18 – Fluxograma do Método de Monte Carlo aplicado.....	62
Figura 19 – Convergência do Método de Monte Carlo.....	65
Figura 20 – Configuração do Cenário 01 do Método de Monte Carlo. ....	68
Figura 21 – Configuração do Cenário 02 do Método de Monte Carlo. ....	69
Figura 22 – Configuração do Cenário 03 do Método de Monte Carlo. ....	70
Figura 23 – Transformadores com maior carregamento atual.....	73
Figura 24 – Principais resultados para carregamento no Cenário 01.....	74
Figura 25 – Principais resultados para carregamento no Cenário 02.....	76
Figura 26 – Principais resultados para carregamento no Cenário 03.....	77
Figura 27 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 01. ....	79
Figura 28 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 02. ....	80
Figura 29 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 03. ....	81
Figura 30 – Resultados para carregamento no cenário com alterações. ....	84
Figura 31 – Equipamentos críticos no cenário com alterações. ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de Comparação dos Critérios .....	41
Tabela 2 - Matriz da média geométrica dos critérios .....	44
Tabela 3 - Média geométrica dos subcritérios de Vida Útil .....	45
Tabela 4 - Média geométrica dos subcritérios de Impacto ao Sistema .....	45
Tabela 5 - Média geométrica dos subcritérios de Impacto Financeiro .....	45
Tabela 6 - Pesos dos critérios conforme área do especialista .....	46
Tabela 7 - Ranqueamento dos transformadores .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica – RS
CEEE-GT	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
EENS	Energia Elétrica Não Suprida
FEQA	Fator de Envelhecimento Equivalente
HI	Health Index
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IS	Índice de Severidade
MCDA	Método Multicritério de Apoio a Decisão
MMC	Método de Monte Carlo
LOLD	Duração da Perda de Carga
LOLF	Frequência da Perda de Carga
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIB	Produto Interno Bruto
PV	Parcela Variável
RNA	Redes Neurais Artificiais
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	9
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA .....	11
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.1 Objetivos Específicos .....	15
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	15
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
2.1 GESTÃO DE ATIVOS .....	18
2.2 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO .....	21
2.2.1 Método da Análise Hierárquica - AHP .....	24
2.3 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS .....	28
2.3.1 Método de Monte Carlo .....	29
2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	32
3 METODOLOGIA PROPOSTA .....	34
3.1 ARQUITETURA DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	34
3.2 PRIORIZAÇÃO NA GESTÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	36
3.2.1 Definição dos Critérios .....	37
3.2.2 Elaboração do Questionário .....	40
3.2.3 Escolha dos Especialistas .....	42
3.2.4 Avaliação da Importância dos Fatores .....	43
3.2.5 Elaboração do Ranking de Ativos .....	47
3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CORRELAÇÃO .....	48
3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	51
4 ESTUDO DE CASO .....	52
4.1 APLICAÇÃO EM CONCESSIONÁRIA DA REGIÃO SUL DO BRASIL .....	52
4.2 HISTÓRICO DE DADOS DE CARREGAMENTO .....	54
4.3 COMPORTAMENTO DOS INDICADORES .....	57
4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO .....	61
4.4.1 Definição do Número de Simulações .....	64
4.5 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS .....	66
4.5.1 Cenário 01 .....	67

4.5.2 Cenário 02.....	68
4.5.3 Cenário 03.....	69
4.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	72
5.1 SIMULAÇÕES DE CARREGAMENTO .....	72
5.2 SIMULAÇÕES DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS .....	77
5.3 SIMULAÇÕES DE ALTERAÇÕES NO SISTEMA.....	82
5.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	85
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
6.1 CONCLUSÃO.....	87
6.2 OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
6.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	88
6.3.1 Artigos Completos Publicados em Eventos.....	88
6.3.2 Artigos Submetidos à Periódicos.....	89
REFERÊNCIAS.....	90
ANEXO A – Formulário submetido aos especialistas.....	100
ANEXO B – Respostas dos Especialistas quanto aos Critérios .....	108
ANEXO C – Respostas dos Especialistas quanto a Vida Útil.....	113
ANEXO D – Respostas dos Especialistas quanto ao Impacto no Sistema .....	116
ANEXO E – Respostas dos Especialistas quanto ao Impacto Financeiro.....	120
ANEXO F – Cenário 01: Resultados Simulados de Carregamento.....	124
ANEXO G – Cenário 01: Resultados para Equipamentos Críticos.....	125
ANEXO H – Cenário 02: Resultados Simulados de Carregamento .....	126
ANEXO I – Cenário 02: Resultados para Equipamentos Críticos .....	127
ANEXO J – Cenário 03: Resultados Simulados de Carregamento .....	128
ANEXO K – Cenário 03: Resultados para Equipamentos Críticos .....	129

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um dos maiores sistemas de geração e transmissão do mundo, devido à sua extensão territorial. Esse sistema, com predominância de geração através de usinas hidrelétrica e com crescimento em outras fontes de energia renováveis, possui sua distribuição realizada através de um complexo sistema de geração e transmissão, o Sistema Interligado Nacional – SIN. Atualmente, mais de 99% da energia elétrica consumida no país se encontra ligada ao SIN, sendo complementada por pequenos sistemas isolados localizados, principalmente, na região da Amazônia (ONS, 2020; ZAMBON, 2015).

O SIN é composto por diversas instalações responsáveis pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, sendo que o setor de transmissão é responsável pelo transporte da energia elétrica entre as usinas geradoras e os centros de consumo e é composto por uma complexa rede de cabos elétricos, isoladores, torres, transformadores, disjuntores, reatores e outros equipamentos. A combinação destes equipamentos dá origem às linhas de transmissão e às subestações, elementos básicos do sistema de transmissão, responsáveis pelo sincronismo entre a produção e o consumo de energia elétrica. Dentro das subestações, destaca-se o transformador de potência como principal equipamento do subsistema devido ao seu valor e a sua importância sistêmica (PESSANHA et al., 2010; JAHROMI et al., 2009).

Para melhorar a qualidade dos serviços prestados e atender as necessidades do país e sua população, o SEB tem passado por fortes alterações em sua estrutura nos últimos anos. As concessionárias de energia estão sob constante pressão para reduzir os custos operacionais, aumentar a confiabilidade dos equipamentos de transmissão e distribuição e melhorar a qualidade de energia e serviços entregues ao cliente. Com o envelhecimento, existe uma probabilidade crescente de falhas nos equipamentos, sendo que uma falha inesperada pode causar sérios danos na rede elétrica, assim como um desabastecimento crítico ao sistema. Uma vez que ocorre a falha de um equipamento, sua substituição ou manutenção e retorno a operação depende de diversos fatores, além disso, este tempo de reestabelecimento operativo pode ser extremamente longo. Dessa forma, a fim de evitar esse tipo de problema, tem-se explorado novas abordagens de monitoramento, diagnóstico, avaliação da condição, manutenção, avaliação da vida útil e possibilidade de prolongar o tempo

de operação dos equipamentos do sistema elétrico (ABU-ELANIEN; SALAMA, 2010; ALDHUBAIB; SALAMA, 2014; TRAPPEY et al., 2015).

O envelhecimento dos ativos que compõe os sistemas elétricos de potência vem se tornando uma preocupação constante, tanto em termos técnicos quanto econômicos, e as considerações sobre a confiabilidade e a redução de custos de manutenção e de capital, assim como de custos relacionados às indisponibilidades, constituem uma base para uma política de melhoria na gestão dos ativos (CAMPELO *et al.*, 2016). A gestão desses equipamentos é considerada como um elemento crítico do sistema elétrico devido aos altos custos envolvidos, à difícil determinação do melhor prazo para a substituição dos equipamentos e ao atual estágio de envelhecimento da infraestrutura do sistema elétrico (ABU-ELANIEN, SALAMA E BARTNIKAS, 2011).

Paralelamente à gestão de vida útil dos equipamentos, as concessionárias de energia elétrica devem buscar planejar as decisões de operação, controle e manutenção de seus sistemas, a fim de antecipar decisões sobre a compra de equipamentos, aquisição e construção de novas linhas de transmissão, manutenções programadas, alocação de recursos e desenvolvimento de infraestrutura em geral. Para tal, é importante que as mesmas realizem estudos de previsão de cenários, antecipando as necessidades futuras de instalações e realizando um melhor planejamento técnico e financeiro.

O planejamento e a tomada de decisão para a gestão de ativos envolvem um grande número de informações, além de diversos tomadores de decisão. Em diversas ocasiões essa tomada de decisão envolve objetivos conflitantes entre si, tendo de que ser ponderados quais possuem maior e menor impacto para o objetivo final da escolha (GRABISCH; LABREUCHE; RIDAOUI, 2019). Nesse ambiente surgem os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão – MCDA, que, apesar de não levarem a uma decisão precisa e absoluta, servem como ferramenta de apoio aos gestores nas suas escolhas. Os métodos MCDA são ferramentas que auxiliam na avaliação de situações complexas, sendo capazes de agrupar o conhecimento de especialistas e produzir resultados baseados em dados objetivos gerados pelo conhecimento de especialistas na área (CARAYANNIS et al., 2018).

Além de uma profunda análise de dados, é importante que seja determinado o comportamento que os sistemas possam apresentar em um futuro determinado. Esse comportamento, porém, muitas vezes é incerto, devendo ser analisado em

forma de cenários possíveis de ocorrer, dependendo das condições encontradas. Os cenários para a previsão do comportamento futuro permitem que sejam analisados os resultados possíveis de comportamento dos equipamentos quando submetidos a diversos graus de liberdade para os critérios avaliados. A elaboração de cenários é realizada através de um método de cálculo, gerando uma série de resultados a serem analisados. Para isso, é necessário realizar uma modelagem, ou seja, criar uma representação de uma situação real de forma a poder analisá-la em um ambiente simulado. O modelo criado pode ser utilizado para examinar a situação, seus resultados e implicações (PALISADES, 2013).

### 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

O mercado de energia elétrica está cada vez mais competitivo, sendo assim, as concessionárias de energia elétrica têm como objetivo buscar uma operação confiável de todos seus ativos com custo mínimo ao longo de sua vida útil (ABU-ELANIEN; SALAMA; IBRAHIM, 2012; PEIMANKAR et al., 2017).

As concessionárias de energia são empresas com grande presença de ativos físicos devido à natureza de seus serviços. Por este motivo, elas devem buscar manter seus ativos operacionais, em boas condições de uso e gerando valor para a empresa. A gestão de seus ativos é de extrema importância para que as mesmas possam atender aos requisitos de confiabilidade e qualidade da prestação de serviços, com as menores tarifas possíveis para os consumidores e gerando retorno financeiro para seus investidores (WENZLER, 2005).

Os ativos do sistema elétrico vêm sofrendo com o envelhecimento devido ao período que a maioria foram instalados. Nos Estados Unidos, a idade média dos transformadores de potência instalados no país estava entre 38 e 40 anos, como mostra um estudo elaborado em 2014 (ENERGY, 2014). Em países europeus, como nos Países Baixos, a maioria dos equipamentos também foi instalada até os anos 80, tornando a necessidade de substituição em curto prazo iminente (SCHIJNDEL, WOUTERS E WETZER, 2012). A situação do Brasil não é diferente, pois grande parte do sistema elétrico foi implantado em meados dos anos 80, sendo necessária a elaboração de um planejamento para gestão destes ativos.

Abordagens para a avaliação da melhor forma de gestão dos ativos vem sendo cada vez mais aplicadas à transformadores de potência. Estratégias de

manutenção baseadas na manutenção centrada na confiabilidade e em algoritmo genético para programar de forma otimizada atividades de manutenção mostram resultados promissores no custo de substituição dos equipamentos. A manutenção pode aumentar a vida útil do transformador e ajudar a reduzir as despesas anuais equivalentes (ALDHUBAIB e SALAMA, 2014).

Campelo et al. (2016) apresentam um modelo de otimização multiobjetivo, minimizando simultaneamente os custos de manutenção e o custo previsto de falhas, com base em estimativas estatísticas de probabilidade de falha e no impacto econômico esperado. O conjunto de soluções da otimização é aplicado a uma metodologia de apoio à decisão multicritério, que preconiza uma solução única constituída por diferentes políticas de manutenção a atribuir aos transformadores. O estudo também fornece uma pontuação de criticidade para cada transformador, que pode auxiliar na alocação de investimentos para substituição de unidades críticas.

Já Takahashi e Okamoto (2016) apresentam dois programas desenvolvidos no Japão para avaliar o custo do ciclo de vida de transformadores de potência. Um dos programas otimiza as estratégias de manutenção considerando o tempo de custo dos reparos, enquanto o outro considera o custo e probabilidade de substituição de componentes. Os dois programas são testados com dados reais de uma concessionária japonesa.

Uma abordagem para otimizar o intervalo de manutenção, minimizando os custos de manutenção, perda por falha, reparo, substituição e deslocamentos, é apresentada por Zhong et al. (2017). O método é aplicado em transformadores de duas regiões e utiliza modelo de falha para a otimização. O intervalo ideal de inspeção torna-se gradualmente menor ao longo dos anos devido ao processo de envelhecimento do equipamento. Os autores concluem que regiões diferentes devem possuir intervalos diferentes de manutenção, otimizando os custos envolvidos.

Silva et al. (2021) apresentam uma metodologia para ranqueamento de transformadores de potência com o auxílio do método multicritério *Analytic Hierarchy Process*. Para isso, o autor realiza a análise da importância estrutural de cada transformador através dos índices de confiabilidade composta. Também é apresentada uma nova metodologia para o cálculo do *Health Index* em transformadores de potência. Através dos indicadores de confiabilidade e vida útil aplicados ao método AHP, o autor apresenta um ranking com os equipamentos mais

críticos de uma concessionária de transmissão.

Estratégias para substituição de transformadores em sistemas de distribuição vem sendo cada vez mais aprofundadas. Os estudos utilizam parâmetros como economia de energia, reserva de energia e disponibilidade média dos equipamentos para definir a prioridade de substituição de equipamentos. Além disso, dados como fator de carga, tempo de operação e localização são utilizadas para definir grupos prioritários de equipamentos a serem substituídos (CHELARU e GRIGORAS, 2020a; 2020b). Ainda em transformadores da rede de distribuição, Hu et al. (2021) apresentam um estudo utilizando características da taxa de falha do transformador em seu ciclo de vida para realizar uma análise do custo de oportunidade considerando a manutenção e substituição dos equipamentos.

Yang et al. (2023) apresentam um modelo de previsão de investimento de substituição de transformador de distribuição de 10kV com base nos algoritmos Lasso e GBDT. O modelo é utilizado para realizar uma previsão de investimentos na substituição de transformadores nas redes de distribuição da China.

Já Hasan et al. (2020) utilizam um modelo probabilístico com simulações através do Método de Monte Carlo para definir uma estratégia de substituição de transformadores em um sistema de transmissão. Para desenvolver a estratégia, os autores utilizam dados de falha dos equipamentos, custos de reparo e substituição, simulando um elevado período a fim de analisar o comportamento do número de transformadores substituídos e da frequência de perda de carga. A simulação empregou falhas de transformadores modeladas em função da idade e condição do transformador.

Grande desafio a ser enfrentado nos próximos anos será a substituição da infraestrutura do sistema elétrico em razão do seu envelhecimento. Há que assegurar uma metodologia mais efetiva, viável sob os aspectos técnicos e econômico-financeiros, para a substituição da infraestrutura do sistema elétrico em final de vida útil de modo que a malha de transmissão possa continuar operando com os níveis de confiabilidade e qualidade exigidos pela sociedade (BRASIL, 2022).

A evolução dos estudos na área mostra uma grande preocupação com estratégias para substituição de ativos do sistema elétrico, com foco em transformadores de potência, devido ao seu alto custo e impacto no sistema. Como apresentado, diversos estudos vêm sendo feitos buscando otimizar a manutenção e

a substituição dos equipamentos. A maioria dos trabalhos publicados analisa a taxa de falha dos equipamentos e seu custo de manutenção e substituição. Com base nestes dados, é elaborada uma estratégia para substituição dos transformadores.

Dentre os trabalhos publicados, a análise financeira se limita ao custo de manutenção e substituição, com uma limitação na avaliação dos custos regulatórios gerados pelo não fornecimento de energia no sistema.

Conforme apresentado, a maioria dos trabalhos publicados apresenta uma análise histórica dos equipamentos, elaborando uma estratégia de substituição focada no momento atual dos equipamentos. Um dos trabalhos foca em uma análise probabilística, porém são considerados apenas os dados de taxa de falha, custo de manutenção e substituição dos equipamentos, sendo aplicado o método de Monte Carlo para a simulação.

Devido a limitação nas pesquisas atuais, este trabalho tem o objetivo de elaborar uma ferramenta que englobe múltiplos critérios, como vida útil, confiabilidade do sistema e custos, tanto de manutenção e substituição, quanto custos regulatórios da indisponibilidade. Os critérios serão utilizados para um ranqueamento da criticidade dos equipamentos, utilizando o método da Análise Hierárquica de Processos como método multicritério. Esses dados serão submetidos à uma análise probabilística através do método de Monte Carlo. Com base nisso, será apresentada uma ferramenta que permite uma análise com um maior número de critérios e que permite simular cenários futuros para auxiliar na gestão dos equipamentos em um horizonte definido.

## 1.2 OBJETIVOS

Com o propósito de atender todas as etapas para solução do problema de pesquisa descrito, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral deste trabalho, tem-se o desenvolvimento de uma ferramenta para auxílio na gestão de ativos em sistemas de potência considerando

fatores de envelhecimento dos equipamentos, carregamento, confiabilidade do sistema e aspectos financeiros envolvidos.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, é necessário atender aos seguintes objetivos específicos:

- a) Apresentar os principais critérios que impactam na gestão de ativos em sistemas de potência;
- b) Desenvolver uma metodologia para ranqueamento dos equipamentos críticos em sistemas de potência, considerando o carregamento, impacto ao sistema, vida útil e aspectos financeiros;
- c) Elaborar uma ferramenta para simulação de cenários para avaliar o comportamento dos ativos com o tempo de operação;
- d) Simular cenários possíveis e seus impactos nos equipamentos;
- e) Propor alterações no sistema e avaliar suas consequências no sistema em um horizonte simulado.

### **1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO**

A principal contribuição desse trabalho está na elaboração de uma ampla metodologia de apoio a gestão de equipamentos, envolvendo tanto aspectos técnicos quanto econômicos e levando em consideração a previsão de cenários futuros configuráveis, podendo trazer uma visão ampla no horizonte de planejamento, baseada em dados reais dos equipamentos.

Neste sentido, destacam-se as seguintes contribuições principais desse trabalho:

- Criação de uma metodologia ampla de priorização de substituição de equipamentos, considerando aspectos de vida útil, confiabilidade e fatores financeiros na tomada de decisão.

- Elaboração de uma ferramenta configurável de previsão de cenários, podendo serem alterados tanto os graus de liberdade para os indicadores, quanto os dados de entrada individuais dos equipamentos.

- Elaboração de cenários simulados, considerando possíveis realidades e dificuldades encontradas pela concessionária nos próximos anos e mostrando alternativas de decisão a serem tomadas.

- Criação de uma metodologia que pode ser replicada, bem como atualizada com a inserção de novos dados que atendam outros equipamentos e concessionárias.

#### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contextualizando seu assunto, os objetivos a serem atingidos, sua justificativa e importância, as contribuições que o trabalho traz para o tema em estudo e a forma com que este estudo se encontra estruturado.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, contendo o embasamento necessário para que todas as etapas deste trabalho sejam cumpridas. Nele são apresentados todos os conceitos necessários para o desenvolvimento da pesquisa, iniciando pelo estudo da gestão de ativos, métodos multicritério, métodos determinísticos e probabilísticos de previsão, concluindo com uma apresentação da metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho.

Concluído o embasamento teórico necessário, o Capítulo 3 traz a metodologia e implantação do Método AHP para o ranqueamento dos equipamentos. No capítulo são apresentados todos os passos do método, passando pela seleção dos critérios e dos especialistas, elaboração do questionário, realização dos cálculos e elaboração do *ranking* conforme criticidade, sendo também realizada uma análise de sensibilidade e de correlação entre os indicadores para auxiliar na validação do método.

No Capítulo 4, parte-se para a previsão e simulação de cenários. Nele são apresentados o levantamento do histórico de carregamento e o comportamento dos demais indicadores para o conjunto de equipamentos. Após, é apresentado o detalhamento de todas as etapas de implantação do Método de Monte Carlo para a simulação dos cenários. São também definidos 3 cenários que servirão de base para o desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 5 apresenta os resultados atingidos no trabalho e as discussões sobre os mesmos. A capítulo discute inicialmente os resultados atingidos nas

simulações de carregamento, passando depois para a análise dos equipamentos críticos nos diferentes cenários de simulação. Após, é apresentado um cenário simulando alterações no sistema a fim de reduzir a criticidade dos equipamentos. Este cenário também visa eliminar a possibilidade dos equipamentos atingirem um carregamento superior à sua capacidade de operação.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho, concluindo o estudo, mostrando oportunidades para trabalhos futuros e a produção científica gerada durante o doutorado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico, são abordados os principais temas necessários para contextualizar e dar a base necessária para o desenvolvimento do presente trabalho, além de serem definidos os conceitos utilizados durante a elaboração do mesmo.

Considerando os objetivos propostos, inicialmente são apresentadas abordagens sobre a gestão de ativos, principalmente com foco em transformadores de potência, sua importância e aspectos relevantes a serem considerados. Em seguida é apresentada uma revisão sobre metodologias de análise multicritério de apoio à decisão, principais métodos usados e detalhado o método de Análise Hierárquica de Processos – AHP, que é o método a ser utilizado no presente trabalho. Por fim, o capítulo aborda os estudos que tratam de métodos determinísticos e probabilísticos de previsão, com ênfase no Método de Monte Carlo.

### 2.1 GESTÃO DE ATIVOS

A gestão de ativos, historicamente, teve início no início do século XX, durante a Primeira Guerra Mundial, com as fábricas estabelecendo metas de produção e elevando o ritmo de operação para atender as demandas necessárias. Já na década de 40, com a Segunda Guerra Mundial em andamento, surgiu uma nova necessidade de aumento da capacidade produtiva, com as indústrias passando a se preocupar, além das correções rápidas de falhas, com a prevenção para que as mesmas não ocorram. Esse período se destaca pelo surgimento da manutenção preventiva, porém ainda sem a preocupação com os fatores econômicos envolvidos (TAVARES; GOMES, 2015).

Já nos anos 50, o sistema de manutenção passou a evoluir para a Manutenção Produtiva Total, com equipes especializadas no planejamento dos processos de manutenção. A partir de 1980, começa a ser implantada a rotina de abatimento dos custos de produção e manutenção, não sendo a melhoria da qualidade do produto o principal item a ser seguido. Em 1994, surge o conceito de Gestão de Ativos, tal como conhecido atualmente, com a criação do *Institute of Asset Management* (IAM) no Reino Unido que tem por objetivo desenvolver o conhecimento e as melhores práticas de gestão de ativos e gerar consciência dos benefícios da disciplina de gestão de ativos para o indivíduo (ATTRI et al., 2013;

TAVARES; GOMES, 2015; IAM, 2020).

Segundo Cerón et al. (2015), a Gestão de Ativos pode ser definida como um conjunto de atividades pela qual uma organização maneja de forma eficiente os seus ativos, a fim de atingir um planejamento estratégico organizacional, sendo que o ativo é qualquer propriedade, planta industrial, máquina, veículo ou outro elemento com valor importante para a organização.

A gestão de ativos do setor elétrico pode ser definida como um processo que avalia a relação entre custo e benefício na operação, manutenção e modernização de ativos do sistema elétrico, utilizando as práticas de engenharia e análise econômica combinadas com boas práticas empresariais (Cheberle, 2013).

Segundo Wenzler (2005), as concessionárias de energia são empresas com grande presença de ativos físicos devido à natureza de seus serviços. O seu modelo de negócio deve manter seus ativos operacionais, em boas condições de uso e gerando valor para a empresa. Devido à função essencial dos seus serviços, trata-se de um negócio inserido numa realidade na qual, por um lado, o estado exige melhor desempenho em termos de segurança, confiabilidade e universalidade do fornecimento. Por outro, os consumidores exigem menores tarifas, com a manutenção da qualidade dos serviços. Há ainda o interesse da companhia e seus acionistas, buscando um maior lucro, retorno para os investimentos e valor agregado. Com base em todos esses fatores, as empresas devem tratar as decisões de investimentos e manutenção de forma ampla, considerando os impactos em diferentes níveis da organização, buscando sempre otimizar a exposição a riscos, os níveis de desempenho requeridos e os custos máximos reconhecidos.

O processo de gestão de ativos em sistemas elétricos de potência, pode ser dividido basicamente em quatro etapas: Monitoramento, Análise, Diagnóstico e Gerenciamento. O monitoramento compreende a aquisição e armazenagem de dados, seja de resultados de inspeção ou de ensaio, incluindo variáveis da proteção e dados básicos dos equipamentos. A análise refere-se ao tratamento da base de dados, procurando evidências de anormalidade. O diagnóstico é responsável por mostrar as condições ou causas de falhas. Enquanto o gerenciamento compreende avaliações da análise do risco operativo, considerando não apenas o contexto técnico, mas também o econômico, resultando em recomendações de procedimentos mais adequados a serem tomados sobre o parque de ativos como um todo (CIGRÈ, 2006).

Essa gestão desses ativos é influenciada pelo seu histórico, pelas condições em que operam e por suas estratégias de manutenção, logo, as decisões sobre a substituição dos equipamentos são sempre influenciadas pelo seu comportamento anterior, pelas condições da infraestrutura, e também pelos efeitos da decisão a ser tomada (MARTINS, 2009).

Ainda segundo Martins (2009), nas decisões sobre a substituição de um ativo devem ser levados em conta os critérios técnicos, os econômicos e também os estratégicos. Dentro dos critérios técnicos são considerados o estado do equipamento, o histórico de operação, suas características e seus dados de manutenção. Os critérios econômicos consideram os custos envolvidos em manutenção, substituição e indisponibilidade do equipamento. Já os critérios estratégicos apuram a confiabilidade e influência do transformador na rede como um todo.

A gestão estratégica leva em conta tanto a confiabilidade dos equipamentos, os custos de manutenção e de capital, quanto os custos relacionados às suas falhas e indisponibilidades. Os modelos estatísticos recentes que contemplam a expectativa de vida dos equipamentos são métodos que podem fornecer informações importantes aos decisores sobre a manutenção ou não do equipamento em funcionamento (CAMPELO et al., 2016).

Além dos fatores técnicos, a gestão de equipamentos deve considerar os fatores econômicos, como os custos de manutenção e substituição dos equipamentos e as penalizações causadas por suas falhas de operação. No setor elétrico brasileiro, as penalizações são realizadas através do mecanismo da Parcela Variável, cujo objetivo é a melhoria da qualidade dos serviços de transmissão, avaliados pela continuidade e disponibilidade plena das instalações. Então, através dos incentivos econômicos, a ANEEL estimulou as concessionárias de transmissão a aumentarem a disponibilidade de suas instalações através do aprimoramento das técnicas e logísticas de manutenção, otimização das periodicidades de manutenção e das frequências e duração dos desligamentos, redução do tempo de retorno à operação e do melhor aproveitamento dos desligamentos realizados. Desta forma, o Operador Nacional do Sistema - ONS apura todos os eventos de indisponibilidade ou restrição operativa com duração superior a 01 (um) minuto, aplicando os descontos da Parcela Variável conforme ocorrências (ANEEL, 2006; 2016).

## 2.2 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

Os métodos multicritérios de apoio à decisão – MCDA surgiram como ferramentas matemáticas eficazes para resolução de problemas que envolvam critérios conflitantes (GRABISCH; LABREUCHE; RIDAOUI, 2019). A vantagem de sua utilização ocorre por não haver, em geral, decisões que atendam simultaneamente todos os critérios abordados, fazendo-se necessário encontrar a melhor decisão possível.

As tomadas de decisão em ambientes complexos envolvem um grande número de informações, muitas vezes incompletas ou com baixa precisão, além de diversos critérios de escolha e tomadores de decisão. Além disso, em muitas ocasiões, a tomada de decisão envolve objetivos conflitantes entre si (GRABISCH; LABREUCHE; RIDAOUI, 2019). Portanto, a tomada de decisão deve buscar a alternativa que apresente o melhor resultado ou a melhor relação entre as expectativas e os resultados possíveis de serem atendidos, considerando tanto os fatores objetivos quanto os subjetivos.

Os métodos multicritérios, porém, não levam a uma solução ideal e absoluta do problema e sim auxiliam na ponderação das alternativas buscando apoiar o processo decisório com a recomendação de alternativas que tragam bons resultados, seguindo uma sequência de etapas.

Os métodos MCDA são ferramentas importantes para estruturar e avaliar situações de decisão complexas, sendo capazes de desenvolver o conhecimento de especialistas e produzir sistemas de avaliação baseados em valores e experiências (CARAYANNIS et al., 2018).

De modo geral, eles podem ser divididos em quatro etapas principais: a formulação de alternativas e seleção de critérios, a ponderação de critérios, a avaliação das alternativas e o tratamento final e agregação (WANG et al., 2009). A Figura 1 apresenta um passo a passo genérico para a aplicação de um método multicritério de apoio à decisão.

A primeira etapa do processo é a seleção dos critérios, podendo ser realizada a partir de revisões de literatura, entrevistas e workshops com os interessados (PAN et al., 2012). Wang et al. (2009) apresenta alguns princípios que podem ser utilizados para auxiliar os pesquisadores na decisão dos critérios a serem adotados, sendo esses o princípio sistêmico, princípio de consistência, princípio da

independência, princípio da mensurabilidade e princípio de comparabilidade. A escolha dos critérios também pode ser feita utilizando métodos consolidados como o Método Delphi, *Least Mean Square* (LMS), *Minmax Deviation* e Método do coeficiente de correlação (SI et al., 2016). A escolha dos critérios é uma tarefa longa onde devem ser realizadas aproximações entre os objetivos desejados e a possibilidade de atendimento com os recursos financeiros, tempo e conhecimentos disponíveis (SOARES, 2003).

A segunda etapa consiste na ponderação dos critérios, definindo o peso relativo de cada um dos critérios na tomada final de decisão. Esses pesos traduzem numericamente a importância relativa de cada critério, revelando as preferências dos especialistas e orientando os decisores de maneira numérica para a avaliação das alternativas. Para determinar esses pesos, é necessário escolher um método de ponderação. Esses métodos podem ser de caráter objetivo, subjetivo ou uma combinação de ambos (JAHAN et al., 2012; SI et al., 2016).

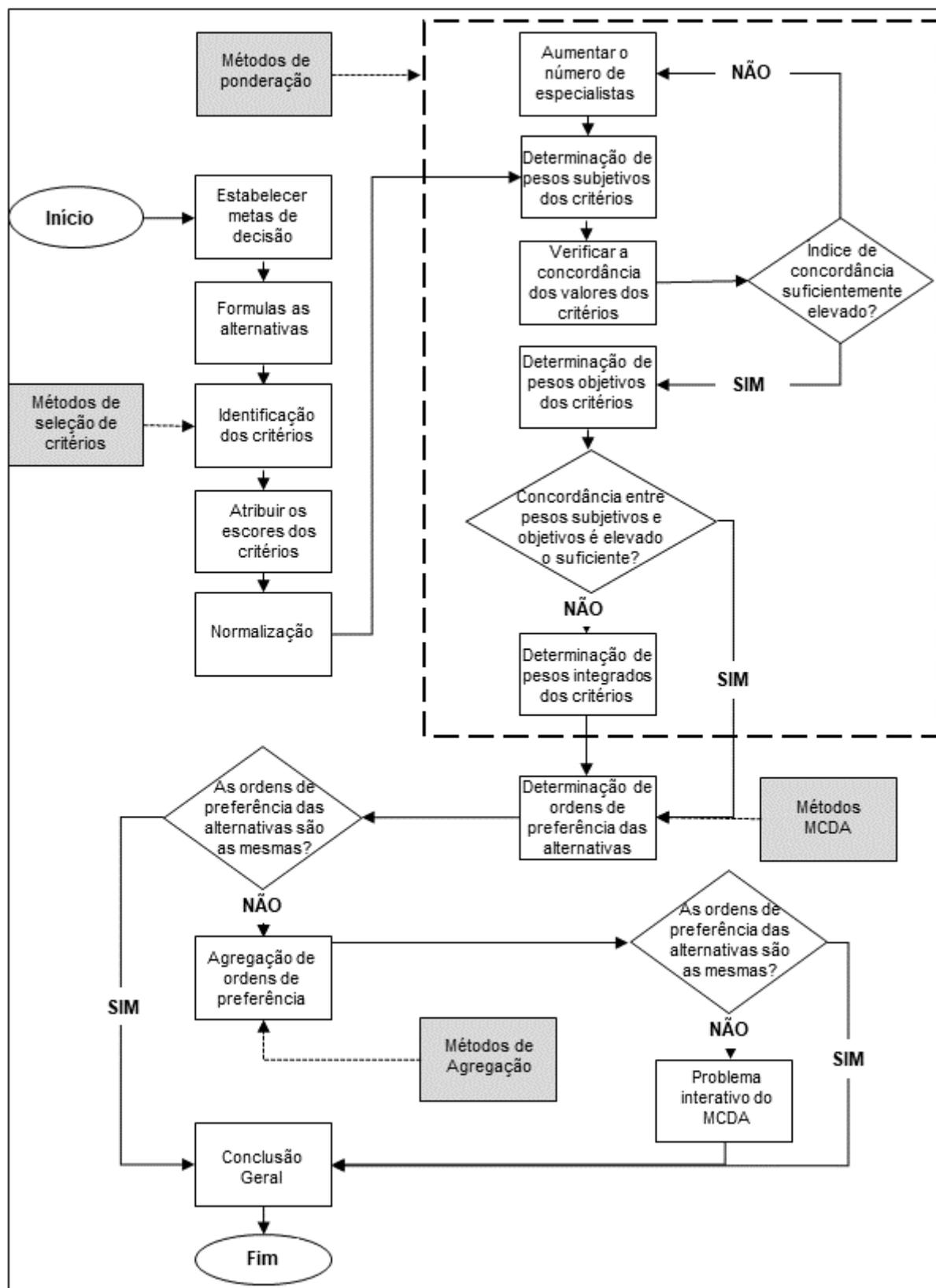
Dentre os métodos objetivos, pode-se destacar o *Least Mean Square* (LMS), *Minmax Deviation*, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), Coeficiente de correlação múltipla e Análise dos componentes principais (SI et al., 2016; WANG et al., 2009). Já dentre os métodos subjetivos tem-se o *Simple Multi Attribute Rating Technique* (SMART), SMARTER, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *SWING Weighting*, Procedimento de Trade-off e Método Delphi (ALMEIDA, 2013; JAHAN et al., 2012; WANG et al., 2009). Esses métodos necessitam de matrizes que devem ser ponderadas pelos especialistas da área, sendo que todos os critérios escolhidos na primeira etapa devem ser mensuráveis quanto ao objetivo do pesquisador (MORALES-TORRES et al., 2016).

Após a determinação dos pesos dos critérios, a etapa seguinte consiste na escolha do método mais adequado para integrar a pontuação e identificar a melhor alternativa de decisão. Os principais métodos utilizados são AHP, TOPSIS, SMART, Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), ELECTRE, PROMETHEE e *Utility Theory Additive* (UTA) (ALMEIDA, 2013; SI et al., 2016; WANG et al., 2009).

Aplicado o método multicritério escolhido, pode-se obter um ranqueamento das melhores alternativas encontradas segundo os critérios estabelecidos e as ponderações dos especialistas. Porém, a aplicação de vários métodos MCDA pode resultar em ordens de classificação diferentes, devidos as diferentes formas de ponderação a serem realizadas. A escolha do método depende de suas vantagens e

desvantagens em relação ao contexto decisório.

Figura 1 - Etapas de um método multicritério.



Kaya et al. (2018) apresentam uma revisão de literatura onde analisam diversas publicações sobre o uso de métodos multicritérios aplicados em tomada de decisão sobre problemas na área energética, concluindo que AHP foi o método mais utilizado nas publicações durante o período analisado. Portanto, o AHP é tido como o mais popular método multicritério de apoio à decisão (WANG et al., 2009). Devido a aplicabilidade do método AHP ao estudo proposto, o mesmo será utilizado no presente trabalho.

### **2.2.1 Método da Análise Hierárquica - AHP**

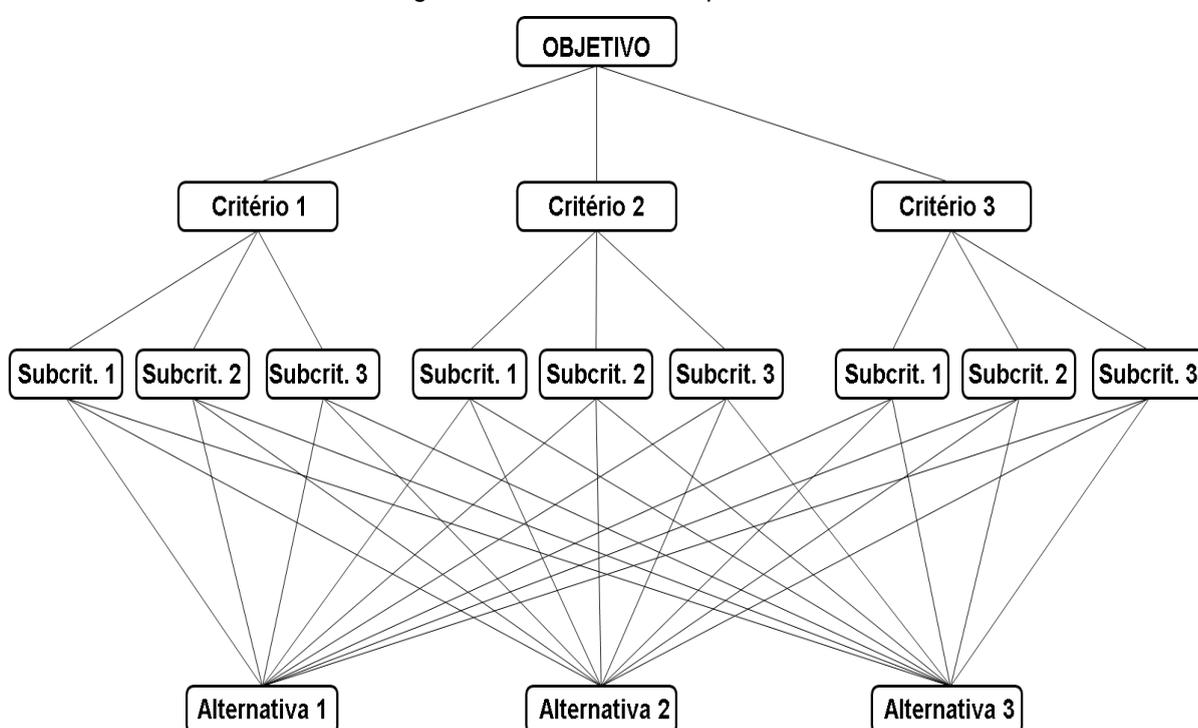
O método de análise hierárquica – AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi desenvolvido por Thomas Saaty em 1971 como uma teoria geral da medida usada para definir escalas de proporção de comparações pareadas discretas e contínuas (SAATY, 1987). Para Saaty (2012), o método reflete a técnica natural de funcionamento da mente humana, tendo um grande número de elementos, estes são agregados em grupos por semelhança. Após, o processo é repetido, agregando-se novamente em um nível mais alto até chegar ao nível superior que é o objetivo a ser alcançado, formando a hierarquia por níveis estratificados.

A estrutura da hierarquia resulta em uma forma de árvore, onde a raiz representa a meta geral que é ramificada em critérios e subcritérios conforme o número de níveis necessários para englobar todos os aspectos relevantes. Por fim os critérios são ligados a cada uma das alternativas a fim de avaliar seu desempenho quanto ao mesmo (SAATY, 2012). A Figura 2 apresenta uma estrutura típica de árvore do método AHP.

O método pode ser dividido em três etapas: a estruturação da hierarquia entre critérios e alternativas, a produção das matrizes de comparação e o cálculo dos valores dos pesos dos critérios e pontuação do desempenho das alternativas (BHUSHAN; RAI, 2004; SI et al., 2016).

Na etapa inicial, o problema é decomposto em uma hierarquia de objetivo, critérios, subcritérios e alternativas. Essa é uma das partes mais importantes da tomada de decisões, pois a estruturação do problema como uma hierarquia é fundamental para o processo do AHP, estabelecendo uma relação entre os critérios das diversas camadas (BHUSHAN; RAI, 2004).

Figura 2 - Estrutura hierárquica AHP.



Fonte: Autor.

A etapa seguinte consiste na elaboração das matrizes de julgamentos e coleta das respostas junto aos especialistas. Para isso são usadas comparações entre pares em cada nó da estrutura, permitindo a consistência e a verificação cruzada das diferentes comparações entre pares usando uma escala de proporção (KAINULAINEN et al., 2009). Esse passo é realizado através da elaboração de uma matriz de comparação par a par na qual o número dos critérios que estão sendo considerados,  $n$ , determina o tamanho da matriz quadrada, isto é  $n \times n$ . Os elementos da matriz representam a importância de um critério específico em relação a outro. Cada elemento é denotado por  $a_{ij}$ . Onde  $i$  representa o primeiro critério e  $j$  representa o critério com o qual está sendo pesado (ZYLOUD; FUCHS-HANUSCH, 2017).

Para garantir a consistência de comparações, Saaty (1987) apresentou um sistema de avaliação com uma escala de 9 níveis, onde 9 denota a importância extrema e 1 denota igual importância em relação a seu par, sendo:

- 1: Igual importância
- 3: Pouco mais importante
- 5: Mais importante

- 7: Muito mais importante  
 9: Extremamente mais importante  
 2, 4, 6, 8: Importâncias intermediárias.

O método de comparação entre pares, para ponderação dos critérios, fornece um meio confiável para classificar os critérios envolvidos no processo de tomada de decisão (SAATY, 2012). Esse método permite que os especialistas classifiquem os vários critérios ou alternativas diretamente, comparando esses critérios em combinações pareadas, podendo reduzir a influência de pontos de vista subjetivos associados à dedução direta dos pesos (DEDE; KAMALAKIS; SPHICOPOULOS, 2016). Na técnica AHP, é possível avaliar tanto critérios quantitativos como qualitativos na mesma escala, onde as comparações verbais devem ser convertidas em valores numéricos (ISHIZAKA; BALKENBORG; KAPLAN, 2011).

O Quadro 2 apresenta, de forma detalhada, o procedimento para ponderação dos critérios, cálculo dos pesos e consistência das respostas.

Quadro 2: Processo e Formulário AHP.

Processo		Descrição e Julgamento	Fórmulas
1	Construir a matriz de Julgamentos A	Os elementos diagonais da matriz são sempre 1. O critério da linha $i$ é melhor que o critério da coluna $j$ se o valor do elemento $a_{ij}$ for maior que 1 e $a_{ji}$ é o elemento recíproco. O número de critérios é igual a $n$ .	$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$
2	Multiplicar os elementos de cada linha	Após o julgamento da matriz A, é necessário multiplicar os $n$ elementos da linha $i$ .	$a_i = \prod_{i=1}^n a_{in}$
3	Calcular a raiz enésima	Após determinar o termo $a_i$ , toma-se a raiz $n$ -ésima do termo resultante de cada linha. Isso resultará em uma matriz de peso $W_i$ .	$W_i = \sqrt[n]{a_i}$
4	Normalizar a matriz de pesos	Depois de calcular a matriz coluna dos pesos $W_i$ é necessário normalizar os elementos.	$w'_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}}{n}$
5	Apresentar a matriz dos pesos de cada critério	Com a normalização dos pesos, tem-se a matriz dos pesos dos critérios.	$W' = \begin{bmatrix} w'_1 \\ \vdots \\ w'_n \end{bmatrix}$

6	Verificar a consistência da Matriz A: calcular $b_i$	A consistência da matriz é avaliada através de seu autovalor máximo, que deve ser aproximadamente igual a $n$ . Para isso, calcula-se o parâmetro $b_i$ .	$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times w'_j$
7	Verificar a consistência da Matriz A: calcular $c_i$	Dividir os resultados de $b_i$ pelos valores da Matriz normalizada, $W'$ .	$c_i = \frac{b_i}{w'_i}$
8	Verificar a consistência da Matriz A: calcular o autovalor máximo	O auto vetor mostra a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento.	$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=i}^n c_i}{n}$
9	Verificar a consistência da Matriz A: calcular o índice de consistência	Índice de consistência do julgamento (IC), onde $n$ é a ordem da matriz dos pesos.	$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$
10	Verificar a consistência da Matriz A: calcular a relação de consistência	A relação de consistência (RC) é a razão entre o IC e um índice Randômico (IR) médio tabelado. A RC com 0,10 ou menos é aceitável.	$RC = \frac{IC}{IR}$

Fonte: Rigo (2019).

Onde:

$A$  - Matriz de julgamentos de  $i$  linhas e  $j$  colunas ( $\forall i, j = \{1, 2, \dots, n\}$ );

$w_i$  - Peso da linha  $i$  não normalizada;

$W'$  - Matriz de pesos normalizada;

$\lambda_{max}$  - Autovalor máximo da matriz de julgamentos;

$IC$  - Índice de consistência da matriz de julgamentos;

$IR$  - índice Randômico; e

$RC$  - Relação de consistência da matriz de julgamentos.

Os passos 1 a 5 são responsáveis por estabelecer o peso de cada um dos critérios selecionados para a escolha das alternativas do problema de decisão utilizando o método AHP. Os passos 6 a 10 analisam a consistência dos julgamentos dos critérios pelos especialistas.

Os passos apresentados são aplicados para cada quadro de respostas, porém, para aumentar a confiabilidade de método, muitas vezes é necessário utilizar as respostas de vários especialistas devido a limitações pessoais de experiências, preferências ou vieses. Os especialistas, frequentemente, abordam o problema de maneiras diferentes e podem fornecer julgamentos dispersos. Uma opção para

resolver esse problema é tratar os dados com a média geométrica. Este método de média geométrica é utilizado para agregação no modelo proposto (SAATY, 1987).

Desse modo, o método AHP ajuda os tomadores de decisão a organizar os aspectos críticos de um problema complexo em uma estrutura hierárquica, dividindo o problema em suas partes constituintes, atribuindo pesos relativos e absolutos a cada um dos critérios. Posteriormente esses pesos são utilizados na avaliação das alternativas, analisando cada alternativa em relação aos critérios e atribuindo um ranking das alternativas que auxilia na tomada de decisão.

### 2.3 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS

A elaboração de cenários para a previsão do comportamento futuro de uma série de dados permite que sejam analisados os resultados possíveis de uma série de indicadores quando submetidos a diversos padrões de entrada de dados, desde os mais otimistas até os mais pessimistas. Para isso, é necessário que seja aplicada uma modelagem a um método de cálculo, gerando uma série de resultados a serem analisados. Modelagem é um conceito amplo que, usualmente, significa qualquer atividade onde se tenta criar uma representação de uma situação real de forma a poder analisá-la em um ambiente simulado. O modelo criado pode ser utilizado para examinar a situação, seus resultados e implicações (PALISADES, 2013).

Os métodos que podem ser utilizados para a elaboração de cenários podem ser divididos em Métodos Determinísticos e Métodos Probabilísticos. Ambos os métodos permitem a simulação de cenários, porém, os métodos probabilísticos permitem ampliar a apresentação de resultados, possibilitando observar simulações mais pessimistas, otimistas ou com maior grau de liberdade em relação aos resultados esperados (FELIPE E LEISMANN, 2019).

O método determinístico é um modelo matemático que resulta em um conjunto de saídas, com base em um conjunto de entradas iniciais conhecidas. Este método é relativamente simples, pois seus resultados são calculados somente em relação aos dados de entrada. Assim, destaca-se a necessidade de dados de entrada precisos e de um modelo coerente que leve a um resultado final único e satisfatório. Portanto, ao utilizar o método determinístico, somente serão apresentados novos resultados se os dados de entrada forem alterados e os cálculos forem realizados novamente, ou se o modelo matemático utilizado for

modificado (RENDER et al., 2017).

Já os métodos probabilísticos são utilizados para apresentar resultados combinatórios, com base em certas propriedades, construído em um intervalo de probabilidades de cenários esperados. Esses métodos são muito utilizados para ampliar as possibilidades de resultados para a análise de uma determinada simulação, permitindo a obtenção de resultados que levam em consideração variações nos cenários que se pretende observar (ALON E SPENCER, 2004).

Para a implementação desses métodos, deve-se partir de cenários factíveis, com a adoção de um modelo matemático, permitindo a equipe envolvida na análise estabelecer critérios particulares de decisão. Após, são realizadas variações com grau de aleatoriedade nos dados de entrada, permitindo que o modelo matemático realize uma grande sequência de cálculos necessários para que possa apresentar os vários resultados possíveis e suas devidas probabilidades de ocorrência (FELIPE E LEISMANN, 2019).

O modelo determinístico utiliza um conjunto de variáveis de entrada para gerar um conjunto específico de variáveis de saída, ou seja, a partir de um grupo de informações levantada, o modelo leva a um resultado ou um conjunto de resultados determinados. Já no modelo probabilístico, as entradas são geradas aleatoriamente utilizando um conjunto de regras que delimitam seu comportamento. Essas regras são baseadas em conhecimento do comportamento possível para as mesmas. Como resultado do modelo, as saídas que obedecem a distribuições de probabilidade, não determinando um resultado, mas trazendo a probabilidade que o mesmo ocorra (ZHANG, 2010).

Dentre os modelos probabilísticos, o Método de Monte Carlo destaca-se por sua ampla utilização e simplicidade de aplicação, podendo ser utilizado em diversas áreas de conhecimentos e permitindo uma modelagem simples, porém que necessita de boa capacidade computacional para gerar resultados satisfatórios. Por estes motivos, o método será utilizado neste trabalho.

### **2.3.1 Método de Monte Carlo**

Método de Monte Carlo (MMC) é uma ferramenta muito relevante para a solução de problemas que envolvem um elevado grau de incertezas, necessitando de um tratamento probabilístico para levar a um resultado adequado. Esse método

vem sendo empregado em diversas áreas de estudos, como Biologia, Física, Ciência da Computação e Engenharia, para a solução de problemas que envolvam elevado grau de incertezas. Sua abordagem consiste na realização de iterações ou cálculos computacionais independentes entre si, com cada iteração tendo seus parâmetros aleatórios definidos via sorteio de acordo com a sua distribuição predeterminada. O número de iterações necessárias para a solução do problema depende da velocidade de convergência dos resultados (ALMEIDA, 2020; MORDECHAI, 2011).

O MMC é umas das mais poderosas ferramentas utilizadas para a elaboração de cenários, possibilitando testar os efeitos de intervenções, planos de contingência e proporcionando maior suporte aos tomadores de decisão (YANG e TIAN, 2021; AMORIN et al., 2018). Segundo Costa (1998), o MMC utiliza a aleatoriedade para resolver problemas que podem ser determinísticos, sendo frequentemente usado em problemas físicos e matemáticos. Sua utilização pode ser realizada quando é difícil ou impossível usar outras abordagens, principalmente em três classes de problemas: otimização, integração numérica e geração de resultados a partir de uma distribuição de probabilidade.

Os primeiros registros do Método de Monte Carlo remontam ao trabalho do Conde de Buffon, Georges-Louis Leclerc, que, em 1777, propôs um experimento estatístico para calcular o valor do número  $\pi$  baseado em lançamentos repetidos de forma aleatória agulhas sobre uma superfície com diversas linhas paralelas igualmente espaçadas traçadas, esse método recebeu o nome de Agulha de Buffon e é considerado um dos métodos mais antigos para cálculo da constante  $\pi$ . Durante o Projeto Manhattan, na Segunda Guerra Mundial, o método foi amplamente utilizado para a investigação de colisões de partículas subatômicas para modelar as reações que foram implementadas na construção da bomba nuclear, sendo então formalizado como método em 1949 (METROPOLIS e ULAM, 1949; MORDECHAI, 2011).

A construção da modelagem para a aplicação do Método de Monte Carlo é iniciada através da identificação e caracterização das variáveis aleatórias envolvidas no problema alvo do estudo. Selecionadas essas variáveis dentro da modelagem, os seus valores devem ser definidos, com base em regras preestabelecidas de intervalos, assumindo valores aleatórios. A geração de números aleatórios é uma tarefa simples quando são utilizados sorteios, lançamentos de dados ou mesmo de

moedas, porém os computadores apresentam uma dificuldade inerente à sua programação de realizar essas tarefas. Sendo assim, como utiliza-se ferramentas computacionais para a solução dos problemas envolvendo MMC, são utilizados números pseudoaleatórios gerados a partir de algoritmos que fazem uso de um valor inicial, conhecido como semente. Os algoritmos atuais de geração de números aleatórios trazem resultados muito semelhantes aos de um sorteio mecânico, não afetando a otimização do método. Esses valores definidos para as variáveis são utilizados nos cálculos do problema modelado, realizando uma sequência de iterações sucessivas. A conclusão da simulação é realizada quando é atingido o número de simulações determinadas ou quando o erro gerado atende aos resultados esperados, gerando a convergência do método. Portanto, o Método de Monte Carlo pode ser dividido em quatro etapas principais: modelagem das variáveis, geração de valores aleatórios, cálculo do modelo e análise da convergência dos resultados (ALMEIDA, 2020).

Para Costa (1998), as modelagens utilizando o Método de Monte Carlo variam, mas tendem a seguir um padrão específico, iniciando pela definição de um domínio de possíveis entradas, geração aleatória das entradas a partir de uma distribuição de probabilidade no domínio, realização de uma sequência de cálculos determinístico a partir das entradas e consolidação dos resultados.

Uma aplicação simples que pode ser utilizada para demonstrar o MMC é o cálculo do  $\pi$  através do sorteio aleatório de uma série de pontos distribuídos sobre um círculo de raio = 1 desenhado no interior de um quadrado de lado = 2. Ao se realizar o sorteio de um ponto aleatório no interior do quadrado, a probabilidade (P) do mesmo estar no interior do círculo é dada pela razão entre a área do círculo e a área do quadrado, assim tem-se:

$$P = \frac{A_{circ}}{A_{quad}} = \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

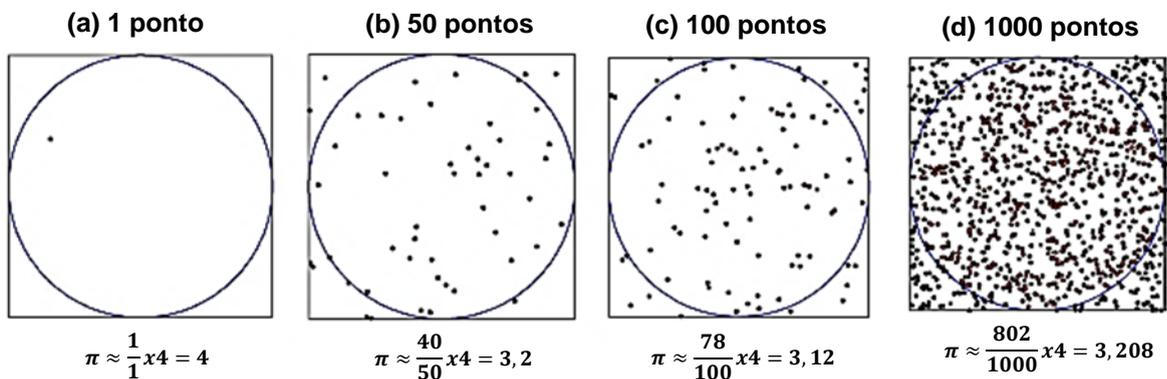
Onde  $\pi$  é a área do círculo de lado igual a 1 e 4 a área do quadrado de lado igual a 2.

Logo, quando são sorteados  $N$  pontos, a probabilidade é dada pelo número de pontos que acertaram o círculo ( $N_{acertos}$ ), dividido pelo número total de pontos. Assim tem-se:

$$\pi = \frac{N_{acertos}}{N} \times A_{quad} = \frac{4 N_{acertos}}{N} \quad (2)$$

Um resultado da simulação de Monte Carlo, para esse problema, é apresentado por Ferreira e Lazo (2022), utilizando simulações com 1, 50, 100 e 1000 pontos e pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de simulação de Monte Carlo.



Fonte: Adaptado de Ferreira e Lazo, 2022.

Analisando os resultados e conhecendo o valor de  $\pi$ , pode-se notar que, apesar dos resultados serem cada vez mais precisos, passando de 0 para 3 casas decimais, o resultado ainda não apresentou boa convergência, estando o valor calculado em (d) mais distante que o calculado em (c). Sendo assim, o MMC é um método de cálculos geralmente simplificados, porém que necessita uma elevada força computacional para rodar as simulações até atingir uma convergência adequada e um erro aceitável para o resultado.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

No contexto abordado, é possível observar a evolução dos estudos envolvendo metodologias para gestão de transformadores de potência. A grande maioria dos estudos foca diretamente em aspectos técnicos, utilizando testes realizados durante a vida útil do equipamento e permitem a avaliação do estado, fornecendo informações sobre o envelhecimento dos equipamentos. Porém, os estudos encontrados não focam diretamente nos aspectos financeiros que possuem grande impacto na tomada de decisão.

O capítulo apresenta metodologias utilizadas para análise de problemas envolvendo múltiplos critérios, os chamados métodos multicritério de apoio à decisão, trazendo suas aplicações e dando destaque ao método da Análise Hierárquica de Processos – AHP.

No mesmo sentido, são apresentados conceitos sobre métodos determinísticos e probabilísticos para que se possa desenvolver um conjunto de cenários para analisar a evolução da metodologia. Para complementar, é apresentado o Método de Monte Carlo, um método probabilístico que possui boa aplicação em modelos que apresentam incertezas e grau de aleatoriedade nos dados de entrada.

Diante disso, nesse trabalho é proposta uma metodologia que engloba não somente uma análise da gestão de equipamentos, mas também uma abordagem completa envolvendo a análise de cenários futuros em um horizonte de longo prazo, considerando as condições dos equipamentos e a previsão de carregamento dos equipamentos através de uma análise probabilística.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

O presente trabalho apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão quanto a gestão de equipamentos do sistema elétrico de potência. A metodologia utiliza critérios técnicos e econômicos, aplicando a análise dos critérios através de análise multicritério utilizando o método AHP. Posteriormente, são elaborados cenários para analisar o possível comportamento dos indicadores com o passar do tempo, projetando cenários futuros e analisando as probabilidades de comportamento dos equipamentos conforme os indicadores projetados.

#### 3.1 ARQUITETURA DA METODOLOGIA PROPOSTA

O tempo de vida útil física de um equipamento depende de diversos fatores, como as condições operacionais às quais os equipamentos estão submetidos, a qualidade e robustez dos equipamentos, as técnicas de manutenção utilizadas, dentre outros. Nesse contexto, cabe à concessionária avaliar o momento adequado para a indicação da substituição de cada equipamento por superação de vida útil física. Normalmente, o tempo de vida útil física é bastante superior à vida útil regulatória (BRASIL, 2022).

Conforme a ANEEL, no âmbito da CP nº 005/2020, até o ano de 2031, diversos ativos do sistema de transmissão terão a sua vida útil regulatória expirada. Nesse sentido, estima-se que seriam necessários investimentos da ordem de R\$ 35 bilhões caso fosse necessário substituir todos os equipamentos relacionados a subestações. Por outro lado, vale destacar que esses investimentos são apenas potenciais, pois não estão associados à superação técnica das instalações, mas apenas à vida útil regulatória (BRASIL, 2022).

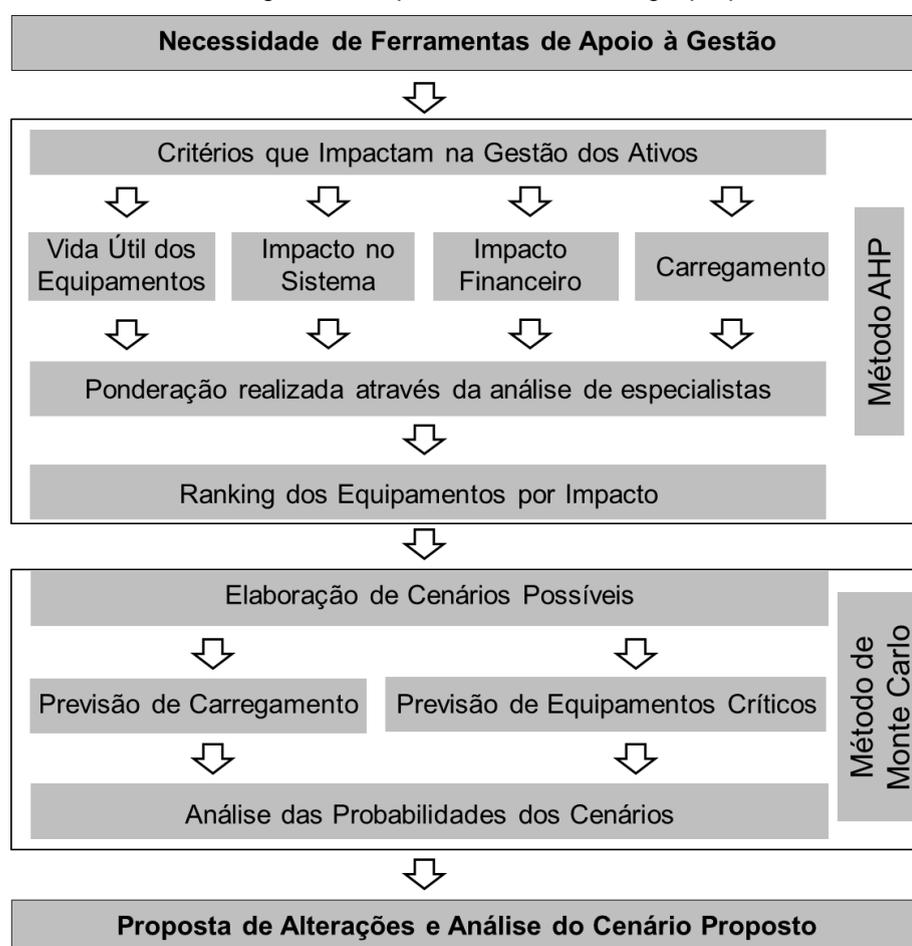
Na Figura 4 é apresentada a arquitetura da metodologia proposta, onde se propõe o desenvolvimento do trabalho, partindo do problema de pesquisa encontrado. O trabalho tem início com a finalidade de desenvolver uma ferramenta que sirva de auxílio na gestão dos transformadores de potência, como já mencionado no decorrer do trabalho.

Partindo-se disso, a primeira etapa tem o objetivo de levantar os equipamentos mais críticos do sistema com base em critérios que impactam na

decisão. Na segunda etapa é realizada a simulação dos cenários propostos através do Método de Monte Carlo. Já a etapa final propões algumas alterações no sistema com base nos cenários simulados, como ampliação das capacidades ou substituição dos equipamentos conforme necessidade e disponibilidade financeira.

Na etapa inicial serão apresentados os critérios que impactam na gestão dos ativos de um sistema de potência, tanto do ponto de vista de vida útil do equipamento, quanto impactos no sistema e impacto financeiro. Esses critérios serão submetidos a um conjunto de especialistas, que realizarão a ponderação dos critérios através de uma análise par a par. Após, essa ponderação será utilizada no cálculo do peso dos critérios, trazendo a importância de cada um dos critérios na tomada de decisão. Com base nos pesos e nos valores de cada critério, trazidos das condições reais de operação, será definido um ranking com os equipamentos mais críticos do sistema. Essa etapa foi realizada através do Método AHP, o qual possui boa aplicabilidade para tal situação.

Figura 4 - Arquitetura da metodologia proposta.



Posteriormente, serão elaborados cenários e realizada a simulação através do Método de Monte Carlo, considerando um período de 10 anos e as possíveis alterações que os critérios podem sofrer no período de análise. Os passos para a realização simulação envolvem do levantamento de dados de histórico de carregamento dos equipamentos, assim como dos demais critérios de impacto no sistema, vida útil e impacto financeiro, a modelagem matemática da simulação e a geração de resultados probabilísticos.

Na etapa final, são propostas alterações no sistema conforme os cenários simulados. Tais alterações são novamente simuladas a fim de analisar o impacto das alterações nos resultados encontrados. A ferramenta permite fácil alteração dos cenários, podendo ser simuladas várias condições de operação e de evolução do sistema, bem como alterados os dados de entrada para avaliar possíveis mudanças a serem implantadas no sistema elétrico de potência.

### 3.2 PRIORIZAÇÃO NA GESTÃO DOS EQUIPAMENTOS

A definição da prioridade corresponde a um dos principais passos para o planejamento da substituição de equipamentos em sistemas de potência. Para tal definição, foi optado pelo o uso da metodologia de Análise Hierárquica de Processos (AHP), por se tratar de uma metodologia amplamente utilizada para auxílio em tomada de decisão em problemas ligados a gestão de energia e também pela adequação do método ao problema proposto.

O método AHP, conforme descrito no referencial teórico, consiste basicamente na definição dos critérios que tem impacto na tomada de decisão, seguido da elaboração de um questionário com a comparação dos critérios de forma pareada, ou seja, comparação par a par entre os critérios e subcritérios definidos. Após, o questionário é submetido a um conjunto de especialistas com conhecimento técnico na área, para realizarem a avaliação da importância dos fatores. Recebidas as respostas dos questionários, são realizados os cálculos dos pesos de cada critério, assim como a consistência das respostas.

Nesta unidade é apresentada a metodologia proposta com aplicação no ativo transformador de potência, sendo apresentados os critérios específicos utilizados para esse tipo de equipamento, realizado o julgamento dos critérios junto aos

especialistas, sua ponderação e definindo o peso de cada critério na análise do ativo transformador de potência. Essa metodologia de elaboração do ranking de transformadores está incluída em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado em parceria com a Companhia Estadual de Energia Elétrica – Geração e Transmissão (CEEE-GT), o qual foi dividido em duas etapas, sendo este estudo pertencente à segunda etapa do projeto.

A escolha do ativo transformador de potência se deve ao fato de que esses são considerados os principais equipamentos de uma subestação, devido ao seu elevado custo e importância, sendo o equipamento de maior valor dentro das subestações de alta tensão, correspondendo a cerca de 60% do valor total da subestação (JAHROMI et al., 2009)

### **3.2.1 Definição dos Critérios**

Na definição da prioridade na substituição ou manutenção de equipamentos nos sistemas de potência devem ser levados em consideração todos os aspectos que afetam a tomada de decisão, tanto do ponto de vista técnico, quanto financeiro, analisando todos os indicadores que podem ser utilizados para a tomada de decisão.

Considerando os sistemas elétricos de potência, o presente trabalho propõe que sejam considerados, na tomada de decisão, os critérios de carregamento, vida útil dos equipamentos, impacto no sistema e impacto financeiro envolvido. Cada um desses critérios deve ser desdobrado em subcritérios de modo a atender cada equipamento a ser estudado em seu caso específico, analisando os dados disponíveis e os melhores indicadores a serem utilizados para o desdobramento de cada critério.

O carregamento pode ser considerado como um dos fatores mais básicos envolvidos na tomada de decisão. Por ser um fator direto, não foram considerados subcritérios dentro do carregamento, apenas o critério de carregamento máximo dos equipamentos. O carregamento tem papel fundamental, pois impacta na vida útil dos equipamentos, na capacidade de manobra das subestações, além de ser um fator limitante para a expansão da carga do sistema.

Durante a primeira fase do projeto de P&D, intitulada Estratégias para substituição de transformadores de potência em subestações considerando risco de falha, fator de impacto para o sistema e análise monetária de acordo com panorama

da concessionária, Feil (2019) apresenta os principais aspectos técnicos que influenciam na tomada de decisão para a substituição dos transformadores de potência, sendo eles o *Health Index* (HI), o Fator de Envelhecimento Equivalente (FEQA) e os fatores de confiabilidade composta *Loss of Load Duration* (LOLD), *Loss of Load Frequency* (LOLF), *Expected Energy Not Supplied* (EENS) e Índice de Severidade (IS).

Quanto aos critérios ligados à vida útil dos equipamentos, Feil (2019) apresenta o HI para 104 unidades transformadoras da área de concessão da CEEE-GT utilizando a metodologia adaptada por Carraro (2017) para a realidade das concessionárias brasileiras, utilizando 06 fatores que são ponderados resultando em um índice geral da condição de operação do transformador (HI). Para o cálculo do Fator de Envelhecimento Equivalente (FEQA), Feil (2019) adotou o modelo térmico constante no Anexo G da *IEEE Std C57.91 - 2011 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators* (IEEE, 2011), calculando a temperatura de Hot Spot e, posteriormente, o fator de envelhecimento equivalente do transformador em operação conforme as suas condições de operação.

O fator envelhecimento equivalente de um transformador, ou seja, o grau de deterioração ao qual o isolamento está sendo submetido em função do tempo e da temperatura de operação, segue uma adaptação da teoria de Arrhenius, podendo ser calculado com base na temperatura do ponto mais quente do enrolamento, conhecida como temperatura de *Hot Spot* (IEEE, 2012).

O *Health Index* (HI) é um fator objetivo e quantitativo, capaz de fornecer a condição geral de operação de transformadores de potência definido a partir de um método que quantifica os resultados obtidos de testes químicos e elétricos, inspeções de campo, observações operacionais, histórico de carregamento, em um único índice de condições de funcionamento do equipamento (ABU-ELANIEN; SALAMA; IBRAHIM, 2012; JAHROMI et al., 2009; WATTAKAPAIBOON; PATTANADECH, 2016; ZEINODDINI-MEYMAND; VAHIDI, 2016).

A confiabilidade de um sistema, por sua vez, pode ser definida como sua capacidade de executar as funções exigidas, durante um determinado período de tempo e sob certas condições operativas (EBELING, 2001). A avaliação de confiabilidade de sistemas compostos geração-transmissão, ou apenas confiabilidade composta (NH2), é realizada através da avaliação dos efeitos de falhas de geração, transmissão e composição de ambas (BILLINTON; ALLAN, 1992;

ANDRADE, 2007).

Como indicadores de confiabilidade composta (NH2), Feil (2019) analisa os indicadores de *Loss of Load Frequency* (LOLF) - Frequência de perda de carga, *Loss of Load Duration* (LOLD) - Duração de perda de carga, *Expected Energy Not Supplied* (EENS) - Valor esperado de energia não suprida e Índice de Severidade (IS).

No que se refere à confiabilidade do sistema, a duração da perda de carga (LOLD) é o tempo médio esperado, calculado em horas, que o equipamento deixa de suprir energia elétrica para o sistema. A frequência da perda de carga (LOLF) é frequência média esperada de perda de carga. Já o fator EENS representa o valor esperado de energia não suprida ao sistema durante um período de tempo, geralmente considerado o período de 01 ano. Enquanto o Índice de Severidade (IS) é a duração equivalente (em minutos) na perda total de carga do sistema operando em condições de pico de carga.

Os aspectos financeiros envolvidos na tomada de decisão foram definidos em discussões entre pesquisadores e representantes de concessionária. Na literatura da área existem poucos trabalhos abordando fatores financeiros, principalmente no que trata a realidade das concessionárias brasileiras, dificultando a pesquisa de fatores financeiros que afetem a tomada de decisão.

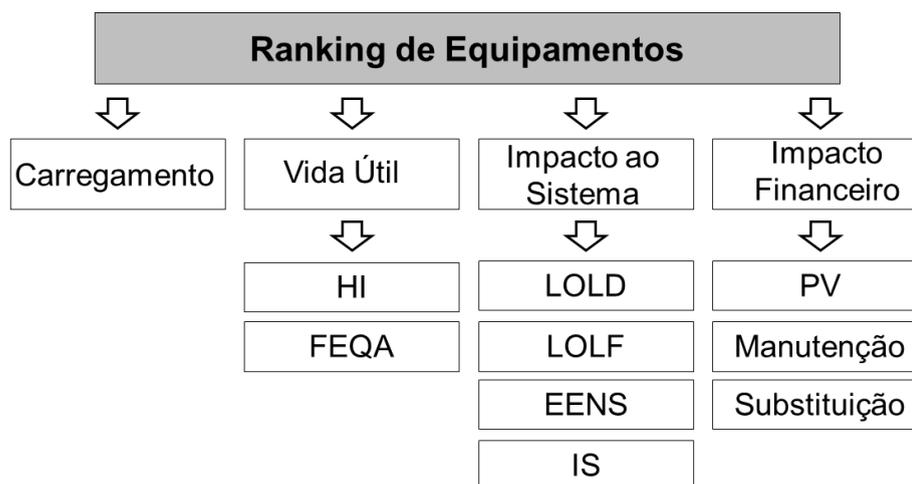
Dentre os fatores financeiros, foram abordados a Parcela Variável – PV que trata das multas descontadas na remuneração da concessionária devido à saída de operação de um equipamento. Outro fator levantado foi o custo de manutenção, englobando tanto as manutenções preventivas, quanto corretivas e emergenciais, contemplando peças e custo de mão de obra para a realização do serviço. O último fator abordado foi o custo de substituição do equipamento, sendo utilizado como referência o Banco de Preços da ANEEL (ANEEL, 2009).

A Figura 5 mostra os critérios e subcritérios utilizados como auxílio da tomada de decisão sobre a substituição de transformadores de potência.

Dentro do critério de vida útil, devem ser abordados todos os subcritérios que representem o envelhecimento do equipamento, como critérios de vida útil remanescente, envelhecimento equivalente, *health index*, tempo de operação ou outros critérios que consigam representar ao quanto o equipamento está próximo do final de sua vida. Esses critérios dependem diretamente do equipamento a ser analisado, podendo ser considerados tanto indicadores simples como o tempo desde

sua instalação, para casos como as redes de transmissão, até fatores mais complexos, que envolvem uma metodologia mais aprofundada e consideração de vários fatores, como o caso do *health index* nos transformadores de potência.

Figura 5 - Critérios Adotados



Fonte: Autor

O impacto ao sistema, por sua vez, considera os fatores de confiabilidade que o equipamento gera no desempenho da função de transmissão de energia. Tal critério pode ser dividido em subcritérios que representam o impacto do equipamento no sistema como um todo, analisando dados com a energia não fornecida para o sistema, a duração média das falhas e frequência que as mesmas ocorrem, assim como o grau do impacto gerado ao sistema.

Já nos impactos financeiros, devem ser considerados todos os critérios que impactam em custos ou na agregação de valor para a concessionária. Além dos critérios normais como os custos de manutenção e substituição de equipamentos, os ativos do sistema elétrico de potência devem considerar a remuneração da concessionária e seus descontos, como o caso da parcela variável que realiza descontos na remuneração conforme as indisponibilidades apuradas em cada equipamento.

### 3.2.2 Elaboração do Questionário

Definidos todos os critérios e subcritérios a serem abordados, parte-se para a elaboração do questionário a ser submetido aos especialistas da área. Segundo o

Método AHP, o retorno da coleta de dados deve ser realizado através de uma matriz de especialistas, para a ponderação dos critérios, cálculo dos pesos e da consistência das respostas.

Para a ponderação dos critérios, é estruturada uma matriz quadrada que consiste em estabelecer pesos relativos entre os elementos para cada nível da hierarquia, de acordo com a escala de Saaty, por meio de uma matriz de comparação paritária para cada grupo de critérios e subcritérios.

O primeiro passo é a elaboração da matriz para comparação dos critérios. A Tabela 1 mostra a matriz quadrada elaborada comparando par a par os critérios de vida útil, impacto no sistema e impacto financeiro. A diagonal principal é composta por valores unitários, mostrando o mesmo peso para comparação entre os fatores iguais. Acima da diagonal principal são colocados os resultados das respostas dos especialistas na escala de Saaty e abaixo os valores inversos.

Tabela 1 - Matriz de Comparação dos Critérios

<b>IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS</b>				
	<b>Vida Útil</b>	<b>Carregamento</b>	<b>Impacto no Sistema</b>	<b>Impacto Financeiro</b>
<b>Vida Útil</b>	1	A <sub>12</sub>	A <sub>13</sub>	A <sub>14</sub>
<b>Carregamento</b>	1/A <sub>12</sub>	1	A <sub>23</sub>	A <sub>24</sub>
<b>Impacto no Sistema</b>	1/A <sub>13</sub>	1/A <sub>23</sub>	1	A <sub>34</sub>
<b>Impacto Financeiro</b>	1/A <sub>14</sub>	1/A <sub>24</sub>	1/A <sub>34</sub>	1

Fonte: Autor

O mesmo modelo de matriz quadrada deve ser utilizado para a comparação pareada entre os subcritérios, para cada grupo dentro da vida útil, impacto no sistema e impacto financeiro.

Elaboradas as matrizes de julgamento contemplando todos os critérios abordados, parte-se então para a elaboração do questionário a ser enviado aos especialistas. O questionário deve contemplar todas as questões abordadas no trabalho de maneira clara e objetiva.

Para a coleta dos dados com a opinião dos especialistas e comparação pareada dos critérios abordados, foi desenvolvido um questionário com questões objetivas. O formulário, contido no Anexo A está dividido em 05 seções. A seção 01 realiza a apresentação da pesquisa e a coleta de dados de identificação dos

respondentes. A segunda seção apresenta os critérios vida útil, impacto ao sistema e impacto financeiro, comparando par a par suas importâncias e o grau de importância relativa em uma escala de 01 para igualmente importantes até 09 para extremamente mais importante. A terceira seção aborda questões para comparação pareada de todos os subcritérios abordados. Na quarta seção são apresentadas questões livres para que os especialistas se manifestem sobre a importância dos critérios abordados, assim como critérios importantes que possam não estar contemplados. A quinta seção apresenta o encerramento do questionário, com agradecimento e opção de submissão das respostas.

### **3.2.3 Escolha dos Especialistas**

Um passo de grande importância para atingir resultados precisos é uma boa seleção de especialistas para a aplicação do questionário. Os especialistas devem possuir amplo conhecimento na área de aplicação da pesquisa, estando familiarizados com os critérios abordados, e também com a linguagem, a fim de contribuírem com respostas coerentes para o resultado da pesquisa.

Na literatura, o número ideal de especialistas é muito variado, principalmente pela dificuldade de encontrar pessoas capacitadas e dispostas a responder as pesquisas. Estudos indicam que um número ótimo não deve ser inferior a 10 especialistas (POWELL, 2003). Entretanto, um número muito elevado, pode gerar uma quantidade alta de respostas divergentes, tornando a administração e a análise das respostas muito complexa. Na maioria dos casos, as pesquisas possuem no máximo três dezenas respondentes (MARQUES et al., 2018).

Para trazer respostas com um amplo espectro de pontos de vista, o presente trabalho focou em três grupos distintos de especialistas, profissionais atuantes na área de transformadores de potência em concessionárias de energia, em empresas de fabricação de transformadores ou consultores e professores universitários da área de sistemas de potência. A Figura 6 mostra a distribuição dos respondentes conforme área de atuação.

O questionário digital foi enviado diretamente aos especialistas de todo Brasil, obtendo o retorno de 21 respondentes. Todos os especialistas possuem formação superior na área, incluindo também mestre e doutores, como mostrado na Figura 7.

Figura 6 – Área de atuação dos especialistas.



Fonte: Autor

Figura 7 – Formação dos especialistas.



Fonte: Autor.

### 3.2.4 Avaliação da Importância dos Fatores

A avaliação do peso dos critérios é realizada a partir das respostas geradas pelos especialistas, já organizadas no formato de matriz quadrada. As respostas obtidas devem gerar um peso individual para cada critério, mostrando a sua importância em relação ao grupo de critérios abordados. Para isso, é necessário sintetizar todas as respostas em um único conjunto de dados que represente a opinião dos especialistas. Segundo estudos realizados por Aczél e Saaty (1983),

deve-se utilizar a média geométrica dos valores dos respondentes, com o objetivo de manter as características dos pesos e seus valores recíprocos.

Para cálculo dos pesos de cada critério e subcritério, são seguidos os passos apresentados no Quadro 1, resultando em um peso relativo de cada subcritério, o qual é multiplicado pelo peso do critério ao qual está vinculado, resultando no peso absoluto do subcritério. Finalizado o cálculo dos pesos, é realizada a análise da razão de consistência para cada fator, devendo a mesma ser inferior a 10% para que o resultado seja considerado consistente. Caso os valores fiquem acima de 10%, devem ser analisadas individualmente as respostas dos especialistas, eliminando as mais inconsistentes a fim de chegar a um resultado confiável para os pesos.

Desta forma, os questionários aplicados aos 21 especialistas foram transcritos para a forma matricial de comparação par a par entre os critérios e subcritérios. Os Anexos B, C, D e E apresentam as respostas de cada um dos especialistas para todos os critérios presentes no trabalho.

Com o objetivo de sintetizar todas as respostas, foi realizado o cálculo da média geométrica dos valores dos 21 respondentes, mantendo-se as características dos pesos e seus recíprocos. A Tabela 2 apresenta a matriz resultante das médias geométricas para os critérios abordados.

Tabela 2 - Matriz da média geométrica dos critérios

<b>IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS</b>				
	<b>Vida Útil</b>	<b>Carregamento</b>	<b>Impacto no Sistema</b>	<b>Impacto Financeiro</b>
<b>Vida Útil</b>	1,00	1,99	0,37	0,76
<b>Carregamento</b>	0,50	1,00	0,29	0,34
<b>Impacto no Sistema</b>	2,67	3,46	1,00	3,88
<b>Impacto Financeiro</b>	1,32	2,93	0,26	1,00

Fonte: Autor

Realizando os cálculos apresentados no Quadro 1, obtém-se um peso de 18,1% para a Vida Útil, 9,9% para o Carregamento, 51,1% para o Impacto ao Sistema e 20,9% para o Impacto Financeiro. A razão de consistência é de 4,8%, demonstrando que as respostas são consistentes, uma vez que se consideram aceitáveis valores abaixo de 10%.

As Tabela 3 a Tabela 5 apresentam as matrizes comparativas resultantes da média geométrica para os subcritérios de Vida Útil, Impacto ao Sistema e Impacto Financeiro, respectivamente.

Tabela 3 - Média geométrica dos subcritérios de Vida Útil

<b>VIDA ÚTIL</b>		
	<b>HI</b>	<b>FEQA</b>
<b>HI</b>	1,00	3,53
<b>FEQA</b>	0,28	1,00

Fonte: Autor

Para a Vida Útil, obtém-se um peso relativo de 77,9% para o HI e 22,1% para o FEQA, não sendo necessário calcular a razão de consistência, uma vez que se trata da comparação direta entre dois fatores.

Tabela 4 - Média geométrica dos subcritérios de Impacto ao Sistema

<b>IMPACTO NO SISTEMA</b>				
	<b>LOLD</b>	<b>LOLF</b>	<b>EENS</b>	<b>IS</b>
<b>LOLD</b>	1,00	1,81	0,86	0,58
<b>LOLF</b>	0,55	1,00	0,70	0,39
<b>EENS</b>	1,16	1,44	1,00	1,07
<b>IS</b>	1,73	2,58	0,94	1,00

Fonte: Autor

Referente ao Impacto no Sistema, obtém-se o peso relativo de 23,3% para o LOLD, 14,8% para o LOLF, 27,6% para o EENS e 34,2% para o IS, com uma razão de consistência de 1,9%.

Tabela 5 - Média geométrica dos subcritérios de Impacto Financeiro

<b>IMPACTO FINANCEIRO</b>			
	<b>PV</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Substituição</b>
<b>PV</b>	1,00	2,39	1,42
<b>Manutenção</b>	0,42	1,00	0,46
<b>Substituição</b>	0,70	2,16	1,00

Fonte: Autor

Já para o Impacto Financeiro, chega-se ao peso de 46,5% para a Parcela Variável, 17,9% para os custos de Manutenção e 35,6% para os custos de Substituição, com uma razão de consistência de 0,6%.

Após realizar a média geométrica das respostas, todas as ponderações realizadas apresentaram razão de consistência abaixo de 10%, dando confiabilidade à aplicação do método.

A fim de analisar possíveis distorções nas respostas devido ao ponto de vista abordado, também foram realizadas ponderações em grupo conforme a área de

atuação, separando os respondentes entre os grupos de representantes de concessionárias, empresas e consultores e professores da área. O peso de cada critério para cada grupo, bem como o geral, é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Pesos dos critérios conforme área do especialista

	<b>Geral (21)</b>	<b>Conces. (8)</b>	<b>Empresas (7)</b>	<b>Profes.(6)</b>
<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>
<b>Vida Útil</b>	<b>18,1%</b>	19,4%	18,3%	16,2%
<b>Carregamento</b>	<b>9,9%</b>	8,4%	10,4%	11,4%
<b>Impacto no Sistema</b>	<b>51,1%</b>	53,6%	48,3%	50,8%
<b>Impacto Financeiro</b>	<b>20,9%</b>	18,5%	23,0%	21,6%
<b>Subcritérios</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>
<b>HI</b>	<b>14,1%</b>	16,88%	11,74%	12,46%
<b>FEQA</b>	<b>4,0%</b>	2,53%	6,51%	3,76%
<b>LOLD</b>	<b>11,9%</b>	12,02%	12,65%	10,11%
<b>LOLF</b>	<b>7,6%</b>	12,35%	4,85%	6,17%
<b>EENS</b>	<b>14,1%</b>	11,74%	16,82%	13,62%
<b>IS</b>	<b>17,5%</b>	17,52%	14,02%	20,89%
<b>PV</b>	<b>9,7%</b>	8,70%	10,55%	9,01%
<b>Manutenção</b>	<b>3,7%</b>	2,48%	7,27%	2,63%
<b>Substituição</b>	<b>7,4%</b>	7,36%	5,22%	10,00%

Fonte: Autor

Desta forma, pode ser elaborada a árvore de decisão com os pesos dos critérios e subcritérios, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Árvore de decisão com peso dos critérios.

<b>SUBSTITUIÇÃO DE TRANSFORMADORES</b>							
<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Critério</b>	<b>Peso</b>
CARREG.	9,9%	VIDA ÚTIL	18,1%	SISTEMA	51,1%	FINANCEIRO	20,9%
<b>Sub-Critério</b>	<b>P. Abs.</b>	<b>Sub-Critério</b>	<b>P. Abs.</b>	<b>Sub-Critério</b>	<b>P. Abs.</b>	<b>Sub-Critério</b>	<b>P. Abs.</b>
HI	14,1%	LOLD	11,9%	PV	9,7%	Manutenção	3,7%
FEQA	4,0%	LOLF	7,6%	Substituição	7,4%		
		EENS	14,1%				
		IS	17,5%				

Fonte: Autor

Os resultados mostram a maior relevância dos fatores ligados ao impacto gerado no sistema, representando mais de 50% do peso total. Já analisados os

pesos absolutos dos subcritérios abordados, destacam-se também a importância do Carregamento, do Health Index e dos custos de Parcela Variável, correspondendo a 9,9%, 14,1% e 9,7% do peso total, respectivamente.

### 3.2.5 Elaboração do Ranking de Ativos

A etapa final da priorização consiste na elaboração do ranking de ativos mais críticos do sistema. Para isso é necessário que sejam levantados os dados de cada um dos subcritérios utilizados para a priorização. Após o levantamento de dados, como os mesmos possuem escalas diferentes e devem ser comparados, deve ser realizada a normalização dos dados, a qual é realizada através da Equação 3:

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (3)$$

Onde:

$x'$  – Valor normalizado do indicador;

$x_{\max}$  – Valor máximo apurado;

$x_{\min}$  – Valor mínimo apurado;

$x$  – Valor apurado para o indicador.

Com os valores dos dados dos indicadores de cada subcritério já normalizados e o peso dos mesmos, parte-se para a elaboração do ranking final, cujo valor que define sua posição é dado pela Equação 4:

$$R = \sum_{i=1}^n (x'_i * P_i) \quad (4)$$

Onde:

$R$  – Valor final utilizado para o ranqueamento dos equipamentos;

$x'_i$  – Valor normalizado apurado para o subcritério  $i$ ;

$P_i$  – Peso calculado para o subcritério  $i$ .

Realizados os cálculos do valor de  $R$  para todos os ativos a serem avaliados, os mesmos são ordenados em ordem decrescente de valor, tendo assim a ordenação dos ativos mais críticos.

### 3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CORRELAÇÃO

A Análise de Sensibilidade é realizada através da alteração individual de parâmetros calculados, observando-se o comportamento do modelo conforme cada uma das alterações é realizada. O uso desta técnica favorece a identificação das variáveis mais críticas ao modelo, sendo estas as que proporcionarem uma maior variação relativa dos resultados analisados. Portanto, ela é uma das formas mais usuais de tratamento das incertezas de uma modelagem com múltiplos indicadores. Quanto ao modelo, pode-se afirmar que quando uma pequena variação de um determinado parâmetro altera drasticamente os resultados obtidos, este modelo é muito sensível ao parâmetro em questão.

Este tipo de análise fornece informações relevantes para a tomada de decisões e permite identificar os parâmetros mais críticos do modelo, auxiliando em uma análise mais cuidadosa dos critérios utilizados.

No modelo elaborado para o ranking dos equipamentos, foi realizada uma análise de sensibilidade abordando os pesos dos quatro critérios envolvidos, Carregamento, Vida Útil, Impacto no Sistema e Impacto Financeiro. Já para os subcritérios, não foram realizadas análises devido ao pequeno impacto que ocasionam pelo seu peso individual, não trazendo resultados que gerariam influência significativa no ranking dos equipamentos.

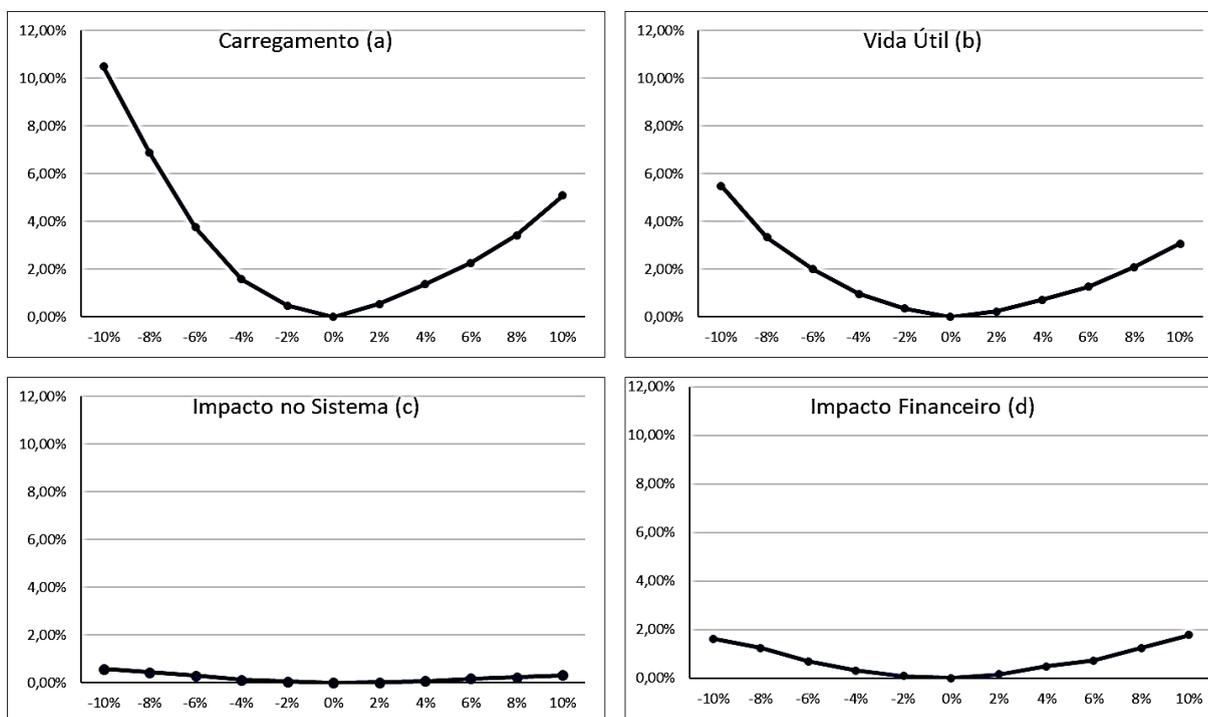
Como apresentado, os pesos encontrados para os critérios foram de 9,86% para o Carregamento, 18,11% para a Vida Útil, 51,14% para o Impacto no Sistema e 20,89% para o Impacto Financeiro. Desta forma, para a análise de sensibilidade, foi considerada uma variação nos pesos de 10% para mais ou para menos, conforme apresentado na Figura 9.

Para realizar a análise, o ranking dos equipamentos críticos foi simulado alterando cada um dos critérios individualmente em 1% a cada simulação. A redução ou aumento do peso de um dos critérios era compensada proporcionalmente nos demais critérios, simulando um erro individual na análise de cada critério em específico. Após realizadas todas as simulações, os rankings de equipamentos gerados nas simulações foram comparados com o ranking base, verificando a correlação dos resultados.

Para os indicadores de Impacto no Sistema e Financeiro (Figura 9 “c” e “d”),

os resultados apresentaram variações pequenas, com diferenças menores que 2% mesmo quando submetidos a variações de peso de 10% para os critérios. Sendo assim, tem-se que o ranking de equipamentos é pouco sensível ao peso desses indicadores.

Figura 9 – Análise de sensibilidade dos critérios.



Fonte: Autor

A Vida Útil apresentou um resultado intermediário na análise, como mostra a Figura 9 “b”, com o resultado gerando uma alteração no ranking próxima a 6% quando o peso do critério é reduzido em 10%.

Já na análise do Carregamento, Figura 9 “a”, a análise de sensibilidade mostrou elevado impacto causado pela variação do peso do critério, com variação dos resultados passando de 10%. A análise de sensibilidade mostra que os resultados do ranking são mais sensíveis a uma variação do peso do carregamento no sistema, devendo ser levados em conta tais resultados para a verificação dos equipamentos críticos, uma vez que algum equívoco no peso dos indicadores pode levar a uma distorção no ranking elaborado.

Apesar de alguns critérios apresentarem uma maior alteração no ranking, de modo geral, as alterações não são excessivamente significativas, podendo se considerar o modelo elaborado como válido mesmo que submetido à pequenas

variações nos pesos dos critérios analisados.

O método AHP é um método de análise multicritério que depende, além da correta ponderação dos critérios, que os mesmos sejam representativos e possuam baixo nível de correlação, fazendo com que vários aspectos sejam levados em conta na tomada de decisão.

Para se analisar o grau de correlação entre todos os subcritérios utilizados, foi realizada a verificação par a par de todas as combinações para os dados de todos os transformadores presentes no estudo, chegando-se aos níveis de correlação apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Análise de correlação entre subcritérios.

	CARREG.	HI	FEQA	LOLD	LOLF	EENS	IS	PV	MANUT.	SUBST.
CARREG.	1,00	0,19	0,18	0,02	0,04	0,09	0,06	0,00	0,00	0,12
HI	0,19	1,00	0,64	0,15	0,11	0,13	0,09	0,19	-0,03	-0,01
FEQA	0,18	0,64	1,00	0,03	0,01	0,10	0,07	0,20	0,16	-0,12
LOLD	0,02	0,15	0,03	1,00	0,80	0,46	0,44	-0,07	0,22	-0,09
LOLF	0,04	0,11	0,01	0,80	1,00	0,77	0,74	-0,06	0,05	-0,11
EENS	0,09	0,13	0,10	0,46	0,77	1,00	0,97	-0,06	0,11	-0,07
IS	0,06	0,09	0,07	0,44	0,74	0,97	1,00	-0,06	0,10	-0,05
PV	0,00	0,19	0,20	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	1,00	0,16	-0,15
MANUT.	0,00	-0,03	0,16	0,22	0,05	0,11	0,10	0,16	1,00	-0,50
SUBST.	0,12	-0,01	-0,12	-0,09	-0,11	-0,07	-0,05	-0,15	-0,50	1,00

Fonte: Autor

Analisando os resultados, observa-se que o critério Carregamento (CARREG.) possui baixos níveis de correlação com todos os demais critérios, uma vez que para a correlação, valores próximos a 1 apresentam correlação forte, enquanto valores próximos a zero apresentam baixa correlação, já os valores negativos representam uma correlação inversa dos dados.

Os subcritérios *Health Index* (HI) e Fator de Envelhecimento Equivalente (FEQA) apresentam correlação moderadamente elevada entre eles, no valor de 0,64, a qual pode ser explicada por serem parte do critério de Vida Útil. Porém apresentam correlação baixa com todos os demais subcritérios.

Quanto ao Impacto no Sistema, os indicadores LOLD, LOLF, EENS e IS também apresentaram correlação elevada entre si e baixos níveis de correlação com os demais indicadores, chegando ao máximo de 0,22 entre os valores de LOLD e de

Manutenção (MANUT.).

Já quando são analisados os valores dos subcritérios de Impacto Financeiro, observa-se uma baixa correlação da Parcela Variável (PV) com qualquer outro item e uma correlação negativa entre Manutenção e Substituição, uma vez que um maior custo de substituição torna o equipamento como menor prioridade no ranking devido à necessidade financeira envolvida.

De modo geral, os subcritérios apresentam baixos níveis de correlação, demonstrando sua independência entre si e se mostrando critérios necessários para uma análise ampla que representa diversos aspectos do comportamento dos equipamentos.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

O presente capítulo propõe uma metodologia para o ranqueamento dos transformadores de potência utilizando uma análise multicritério para definir quais os equipamentos são prioritários quanto a sua criticidade para o sistema. Para realizar esse ranqueamento, é utilizado o método da Análise Hierárquica de Processos – AHP, sendo considerado um método adequado para uma análise multicritério na área de energia, onde são utilizados critérios conflitantes entre si.

No decorrer do capítulo, são apresentados os critérios utilizados, englobando o carregamento, vida útil, impacto no sistema e impacto financeiro dos equipamentos. Esses critérios são submetidos a um conjunto de especialistas com atuação na indústria, nas concessionárias e no meio acadêmico, porém todos com formação e atuação na área de sistemas de potência.

Os critérios são comparados através de uma análise pareada pelos especialistas. Após, são submetidos aos cálculos apresentados no Método AHP, estabelecendo-se o peso individual de cada critério na criticidade dos equipamentos. Com base nos pesos e no histórico dos indicadores, é apresentado um ranking atual para os equipamentos, conforme a sua criticidade.

Por fim, o capítulo apresenta uma análise de sensibilidade dos indicados para mostrar como a variação dos seus pesos impacta no ranking, e também como uma análise da correlação entre os indicadores, atestando a independência entre os mesmos.

## 4 ESTUDO DE CASO

A presente etapa deste trabalho apresenta o local de aplicação do estudo de caso aos transformadores de potência. Também é realizado o desenvolvimento do modelo para simulação de cenários futuros que auxiliem na tomada de decisão sobre a substituição ou manutenção dos equipamentos, assim como possíveis reforços a serem incorporados ao sistema. Como já apresentado, a previsão será baseada em um método probabilístico, resultando em um modelo que sirva como apoio a tomada de decisão na gestão de equipamentos.

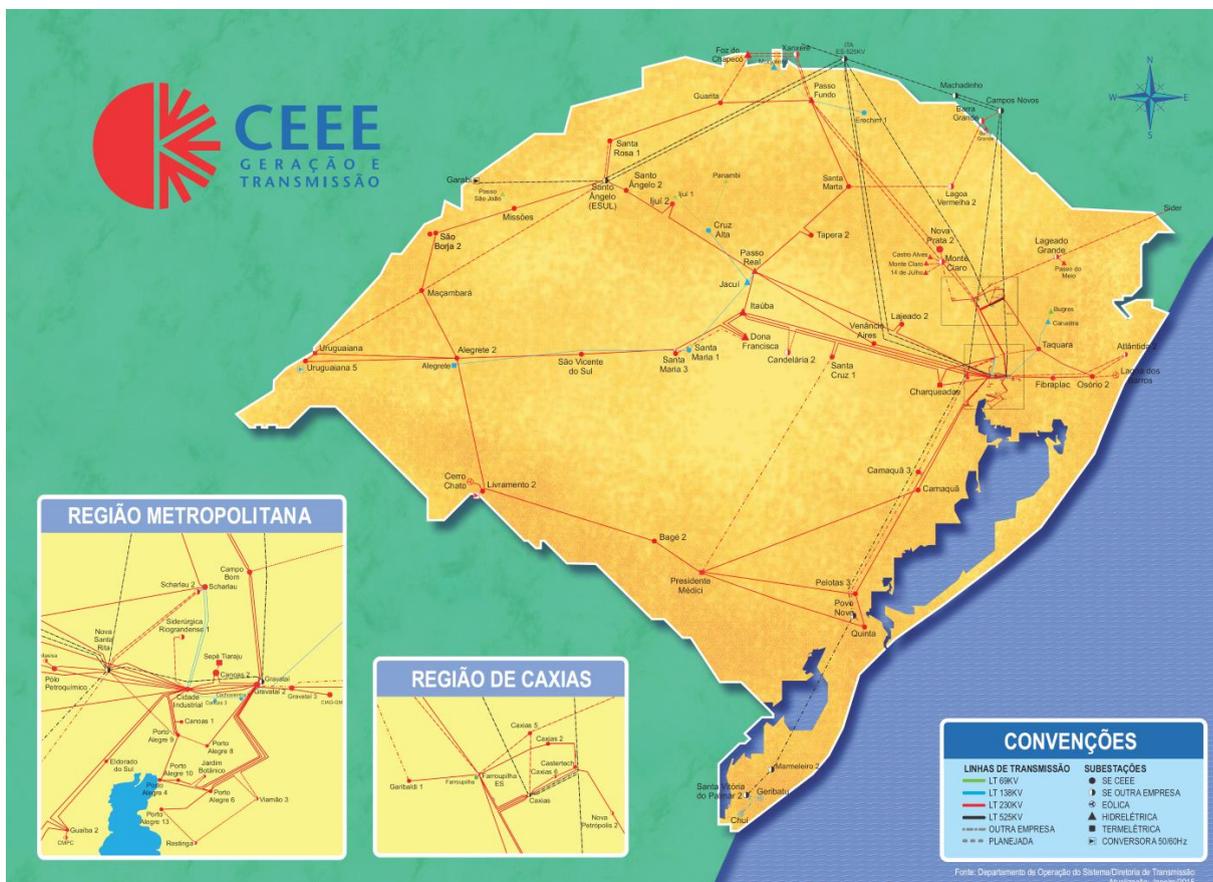
Neste sentido, são apresentados os históricos de carregamento dos equipamentos, bem como dos demais subscritérios utilizados no modelo. O comportamento histórico destes dados, aliados a estudos como o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2022), trazem os subsídios necessários para que sejam traçados os cenários simulados.

Após, é abordado o modelo do Método de Monte Carlo utilizado para a previsão do comportamento dos equipamentos em um período pré-estabelecido na simulação. Esse modelo foi utilizado para trazer uma análise probabilística que dê subsídios na tomada de decisão da gestão dos equipamentos transformadores de potência que foram objeto alvo do estudo.

### 4.1 APLICAÇÃO EM CONCESSIONÁRIA DA REGIÃO SUL DO BRASIL

O estudo de caso da metodologia proposta foi aplicado na área de atuação da CEEE-GT, utilizando dados reais dos transformadores de alta tensão instalados em subestações. A CEEE-GT é responsável pela maioria das instalações que compõe a Rede Básica de Transmissão do Rio Grande do Sul, possuindo 56 subestações, que somam potência instalada própria de 10,5 mil MVA, e opera outras 18 unidades. A empresa também é responsável pela operação e manutenção de 6 mil km de linhas de transmissão, sendo 5,9 mil km próprios, realizando o suprimento de energia para todas as distribuidoras que atuam no estado e também para potenciais consumidores livres (CEEE, 2022). A Figura 11 apresenta a rede básica sob a responsabilidade da CEEE-GT, com suas linhas e transmissão e subestações.

Figura 11 - Rede Básica da CEEE Transmissão.



Fonte: CEEE, 2022

A Tabela 7 mostra uma prévia do ranqueamento, contemplando os 30 equipamentos mais críticos.

Para a elaboração do ranking apresentado na Tabela 1, foram utilizados dados do parque de transformadores do período de 2017 a 2022. A faixa de idade se trata de um filtro para separação dos equipamentos em faixas de tempo de uso, permitindo uma melhor avaliação comparativa de equipamentos.

Tabela 7 - Ranqueamento dos transformadores

Posição	Equipamento	Tempo de Op.	Faixa	Pontuação
1	VAI-TR2	45	Mais de 30 anos	65,945
2	SAG2-TR1	28	15 a 30 anos	45,549
3	SAG2-TR2	19	15 a 30 anos	44,666
4	SMT-AT1	40	Mais de 30 anos	36,698
5	SMT-AT2	40	Mais de 30 anos	35,856
6	GAR1-TR2	12	Até 15 anos	31,593
7	URU5-TR1	37	Mais de 30 anos	28,701
8	GAR1-TR1	10	Até 15 anos	26,879
9	QUI-TR5	7	Até 15 anos	26,874
10	NPR2-TR1	28	15 a 30 anos	26,274
11	GRA2-TR3	37	Mais de 30 anos	22,635
12	CAM-TR1	22	15 a 30 anos	22,492
13	SRO1-TR1	37	Mais de 30 anos	22,439
14	PAL4-TR2	46	Mais de 30 anos	22,232
15	BAG2-TR1	32	Mais de 30 anos	22,020
16	URU5-TR2	19	15 a 30 anos	20,484
17	PAL4-TR3	46	Mais de 30 anos	19,976
18	BAG2-TR2	12	Até 15 anos	19,782
19	CAX5-TR1	22	15 a 30 anos	19,646
20	CIN-TR1	8	Até 15 anos	19,157
21	PAL4-TR1	46	Mais de 30 anos	18,562
22	CIN-TR2	37	Mais de 30 anos	18,478
23	GRA2-TR2	38	Mais de 30 anos	18,391
24	VAI-TR1	45	Mais de 30 anos	18,252
25	LIV2-TR4	10	Até 15 anos	18,208
26	PAL4-TR6	26	15 a 30 anos	17,668
27	PAL13-TR2	20	15 a 30 anos	17,641
28	SBO2-TR1	32	Mais de 30 anos	17,341
29	ELD-TR1	31	Mais de 30 anos	17,249
30	CNA1-TR1	32	Mais de 30 anos	17,224

Fonte: Autor

## 4.2 HISTÓRICO DE DADOS DE CARREGAMENTO

O Método de Monte Carlo é um método probabilístico, baseado nos dados atuais e em um conjunto de premissas que traçam os possíveis cenários de comportamento destes dados no decorrer do tempo. Para que o método tenha precisão e assertividade na geração de resultados, é necessário um conjunto de

dados de entrada que reflitam a real situação dos indicadores estudados, além da possível variação que os mesmos podem sofrer no decorrer do tempo. Para a coleta dos dados, foi utilizado o sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) da CEEE Transmissão.

Iniciando pelos dados de carregamento, a coleta foi realizada diretamente no setor de transmissão da Subestação de Canoas, onde é o centro de controle da CEEE Transmissão no Rio Grande do Sul. Para isso, foram gerados relatórios de carregamento individuais para cada um dos 104 equipamentos presentes no estudo. Devido ao tempo necessário para geração do relatório e às características do sistema, foram configurados parâmetros para aquisição de dados englobando o período de janeiro de 2017 até abril de 2022, data em que foi realizada a coleta dos dados. Os relatórios gerados contêm cerca de 2000 medições, realizadas em horários semialeatórios, sendo obtidas entre uma e duas medidas diárias do carregamento. Os mesmos foram gerados para cada uma das subestações, como apresentado parcialmente no Quadro 3.

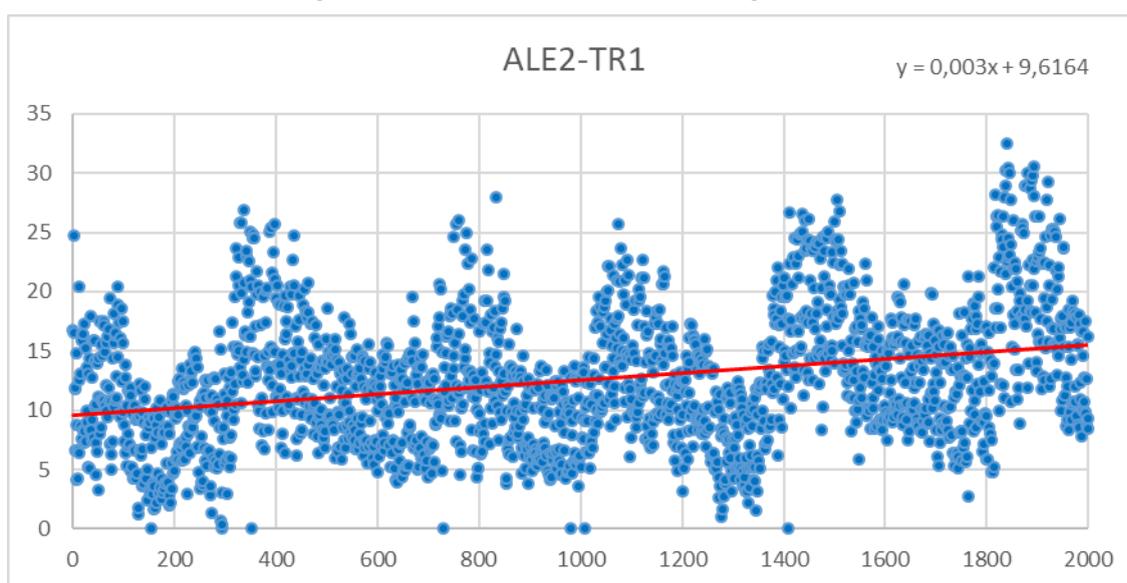
Quadro 3 – Relatório de Carregamento de Transformadores.

Hora	P. Aparente do TR1 de ALE2		P. Aparente do TR2 de ALE2	
01/01/2017 22:56			22,79	MVA
02/01/2017 02:14	16,56	MVA		
02/01/2017 06:12			15,48	MVA
02/01/2017 23:03			26,09	MVA
02/01/2017 23:17	24,73	MVA		
03/01/2017 22:13	6,58	MVA		
03/01/2017 22:22			6,5	MVA
04/01/2017 10:41			12,18	MVA
04/01/2017 10:43	11,81	MVA		
06/01/2017 00:37	11,95	MVA		
06/01/2017 19:57	8,73	MVA		
07/01/2017 11:47			9,66	MVA
07/01/2017 22:48			16,19	MVA
07/01/2017 22:52	14,81	MVA		
08/01/2017 12:08	4,17	MVA		
08/01/2017 15:52			3,23	MVA
08/01/2017 21:43	6,57	MVA		
10/01/2017 01:06			9	MVA
10/01/2017 18:21			4,28	MVA
10/01/2017 18:23	4,29	MVA		
11/01/2017 17:47			12,24	MVA
12/01/2017 07:03			6,09	MVA

Fonte: Autor

Tendo como base os dados obtidos através dos relatórios, foram gerados gráficos para cada um dos equipamentos, a fim de analisar o comportamento do carregamento individual no período de estudo. Foram gerados gráficos de dispersão contendo todos os pontos gerados, excluindo-se apenas alguns pontos tidos como *outliers* a fim de evitar distorções geradas por erros de medidas ou eventos anormais que afetassem a representação. Os *outliers* foram removidos manualmente, por se tratarem de um pequeno número de dados fora dos padrões. A Figura 12 apresenta os dados de carregamento para o transformador TR1 da subestação 2 de Alegrete.

Figura 12 – Dados Históricos de Carregamento.



Fonte: Autor

O gráfico apresenta o comportamento cíclico anual do carregamento, com carga maior nos períodos de verão. Para se analisar a evolução do carregamento médio do equipamento, foi traçada uma reta com os valores médios de carregamento no período. Para que fosse calculada a variação de carregamento no período observado, foi inserida uma linha de tendência no gráfico, linearizando o comportamento dos dados para valores médios observados durante os ciclos. Através da linha de tendência, foi calculada a equação da reta obtida, sendo possível calcular a variação percentual do carregamento por ano através da inclinação da reta encontrada. Durante a análise, foram apurados os carregamentos de 104 transformadores e plotados seus gráficos para o período analisado. A variação calculada ficou entre -6,13% e 12,80% ao ano.

### 4.3 COMPORTAMENTO DOS INDICADORES

Aplicação do método de Monte Carlo necessita de uma análise prévia do comportamento de todos os indicadores utilizados na modelagem. Esse comportamento permite que o modelo seja adaptado para se adequar as variações reais sofridas pelos indicadores ao longo do tempo, fazendo com que as projeções obedeçam a parâmetros reais de operação dos equipamentos.

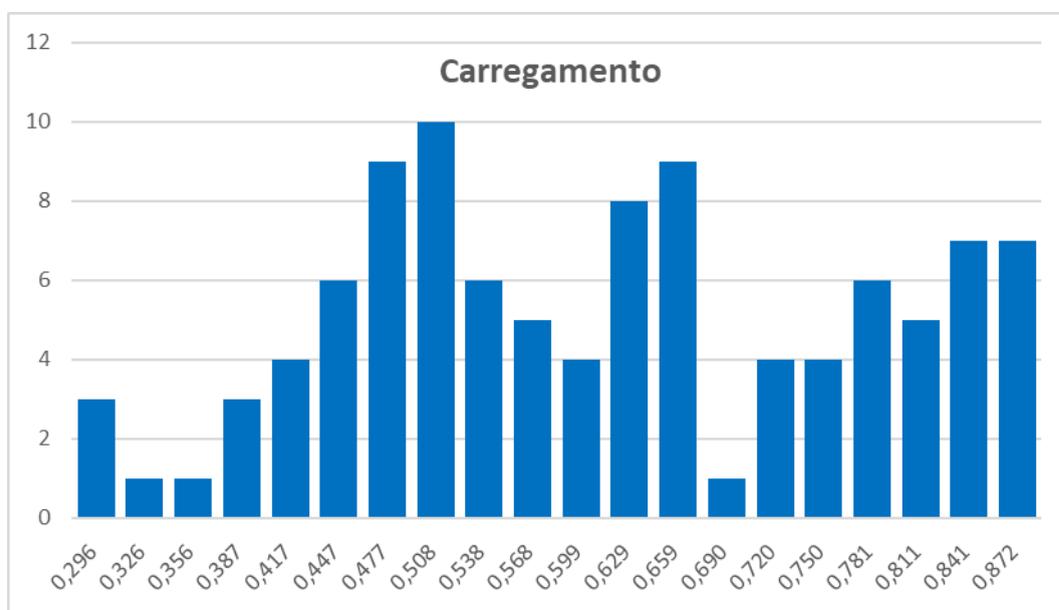
Para que essas variações sejam calibradas no modelo, foi realizada uma análise da distribuição dos indicadores entre os equipamentos que compõe o sistema, mostrando o seu comportamento passado e podendo ser inserido no modelo quais as possíveis alterações que podem ocorrer entre os possíveis equipamentos.

O primeiro gráfico, apresentado na Figura 13, mostra a distribuição dos carregamentos máximos entre os 104 transformadores estudados, considerando os dados dos últimos 5 anos, conforme apresentado anteriormente.

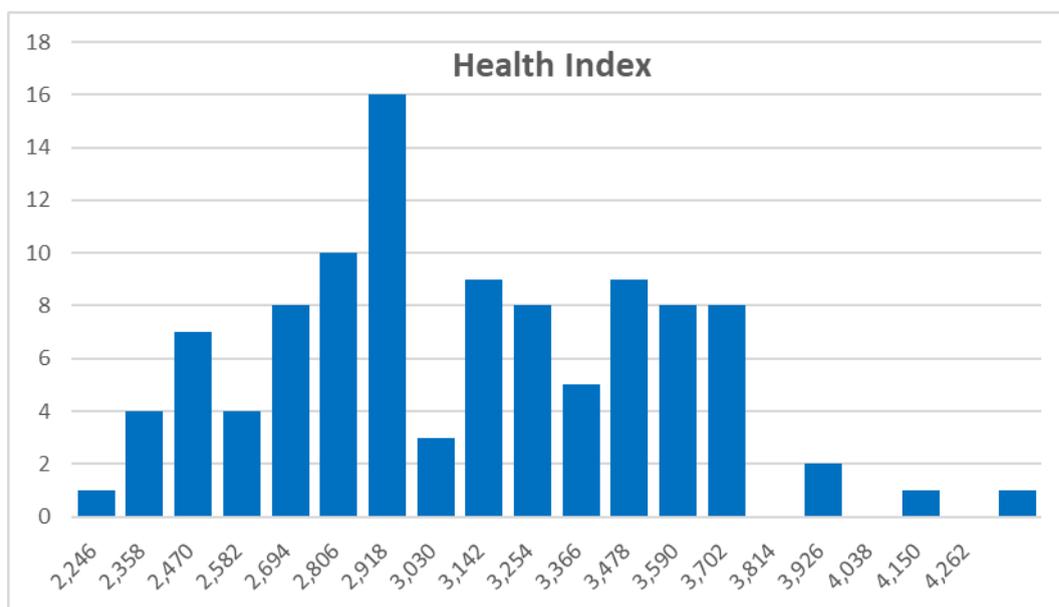
Para o levantamento dos dados, foram desconsiderados 1% dos maiores valores encontrados nas medições. Essa adequação dos dados foi necessária para eliminar *outliers*, ou seja, pontos fora da curva presentes nas medições, causados por erros de medição ou mesmo por algum evento inesperado e pontual. Os dados são apresentados em pu (por unidade), a fim de deixar todos os equipamentos na mesma escala através da normalização das medidas realizadas. Como visto no gráfico, os carregamentos não apresentam uma distribuição bem definida, ficando o carregamento máximo médio em 0,616 pu para os equipamentos alvo do estudo.

Já o *Health Index* (HI), com gráfico apresentado na Figura 14, possui a maioria dos transformadores com valores de HI mais próximos à média de 3,088. O desvio padrão encontrado para os valores é de 0,445, com todos os valores estando entre 2,190 e 4,430.

Figura 13 – Distribuição do carregamento máximo dos transformadores.



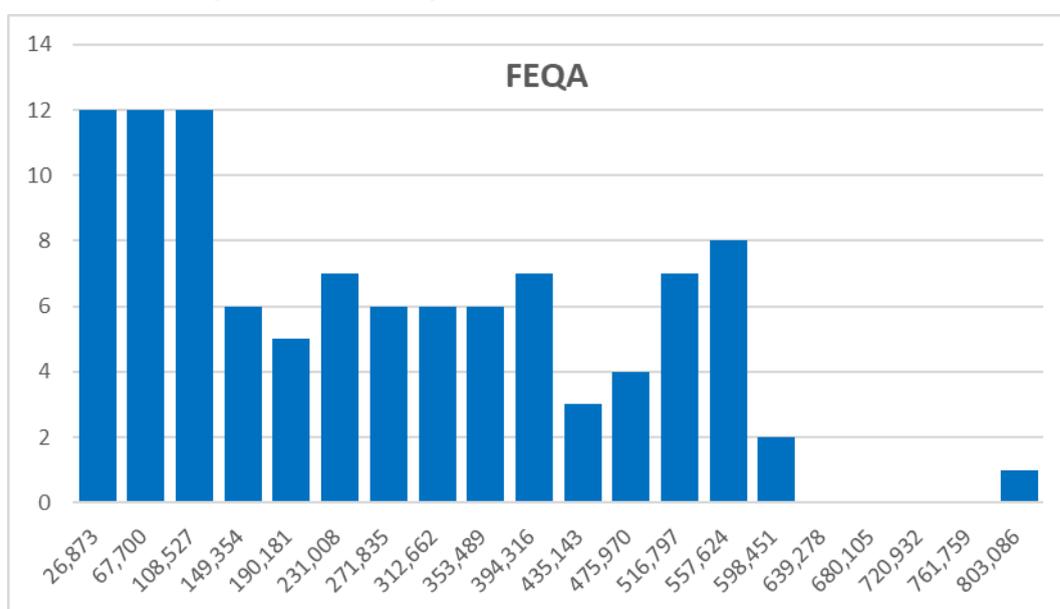
Fonte: Autor

Figura 14 – Distribuição do *Health Index* dos transformadores.

Fonte: Autor

A distribuição dos valores do indicador Fator de Envelhecimento Equivalente (FEQA) é apresentada na Figura 15. Os valores são distribuídos de uma forma mais uniforme, com uma maior concentração em valores abaixo de 120 e média 263,60. Devido à forma de distribuição dos valores, o desvio padrão calculado para os valores foi de 190,38.

Figura 15 – Distribuição do FEQA para os transformadores.

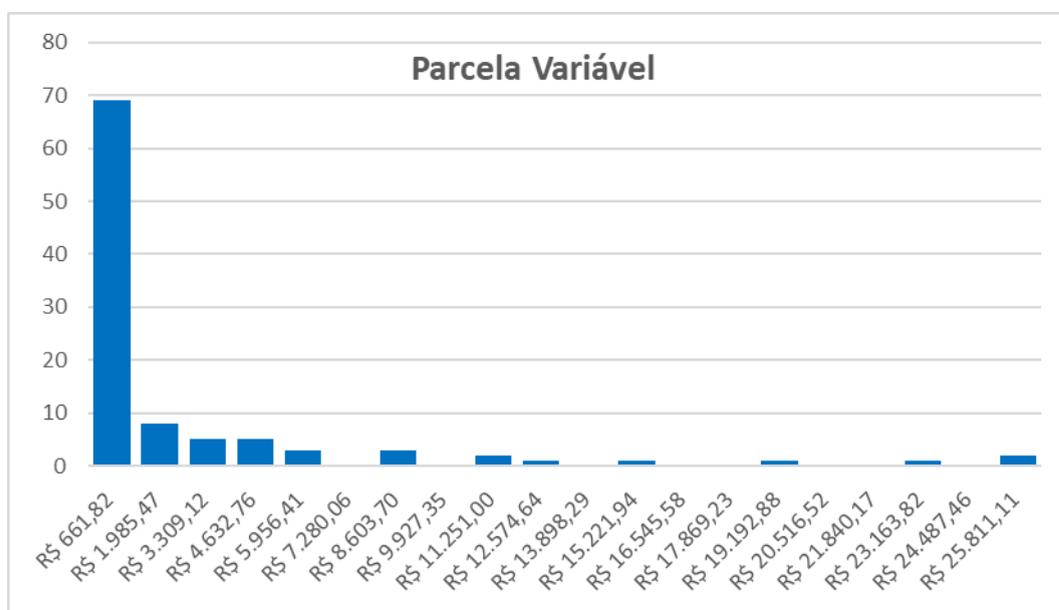


Fonte: Autor

Os valores da Parcela Variável, por sua vez, apresentam maior concentração em números mais baixos, com valores abaixo de R\$ 1000,00 no acumulado de 5 anos, como pode ser observado na Figura 16. A distribuição destes valores é resultado característico do indicador, o qual é gerado pelas saídas de operação dos equipamentos. Desta forma, a maioria dos transformadores sofre paradas curtas, gerando um baixo custo de Parcela Variável, enquanto alguns atingem valores elevados devido ao longo tempo de paradas, geralmente não programadas. Este comportamento gera uma distribuição com maior concentração em valores baixos, porém com uma cauda longa composta por poucos equipamentos com valores elevados, atingindo um valor médio de R\$ 2535,00 por equipamento e com desvio padrão de R\$ 5262,00.

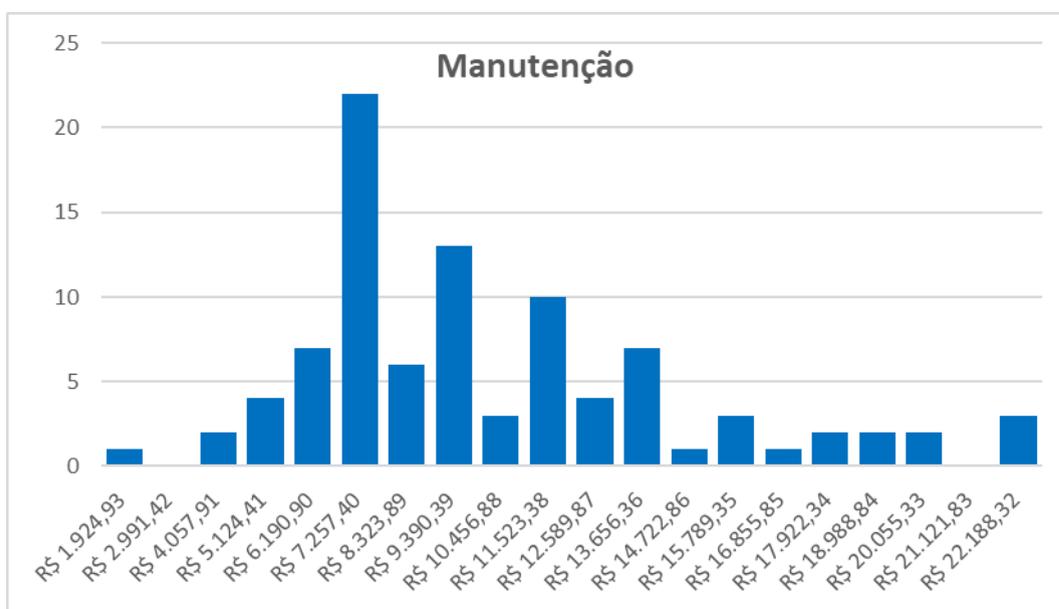
Enquanto isso, os valores de Manutenção, mostrados na Figura 17, apresentam um comportamento próximo a uma distribuição normal, com a maioria dos valores levantados para o período de 5 anos, ficando entre R\$ 5000,00 e R\$ 15000,00 por equipamento. A média calculada foi de R\$ 13377,00, com máximo custo encontrado de R\$ 9114,00 para um único equipamento.

Figura 16 – Distribuição Parcela Variável para os transformadores.



Fonte: Autor

Figura 17 – Distribuição do indicador Manutenção nos transformadores.



Fonte: Autor

Além dos indicadores apresentados, tem-se os indicadores referentes ao impacto no sistema que são o LOLD, LOLF, EENS e IS, como já apresentados nesse trabalho. Esses indicadores são gerados através da importância estrutural do equipamento para o sistema, portanto os mesmos somente são alterados quando há uma modificação estrutural do sistema de transmissão, como a implantação de uma

nova linha de transmissão, um novo barramento de ligação, uma subestação ou mesmo alteração de potência ou paralelismo entre transformadores. Como o método de Monte Carlo utiliza de variações aleatórias, esses indicadores serão tratados como fixos nas simulações, uma vez que as alterações na rede não seguem um comportamento aleatório e não ocorrem em períodos curtos.

Portanto, para a modelagem do Método de Monte Carlo a ser apresentada na seção 4.3, serão consideradas as possíveis variações apresentadas para os indicadores, sendo necessário, em caso de alteração na rede, serem realizadas novas simulações com os indicadores de impacto estrutural na rede recalculados a fim de gerar dados mais precisos que não consideram variações aleatórias em parâmetros que possuem características permanentes.

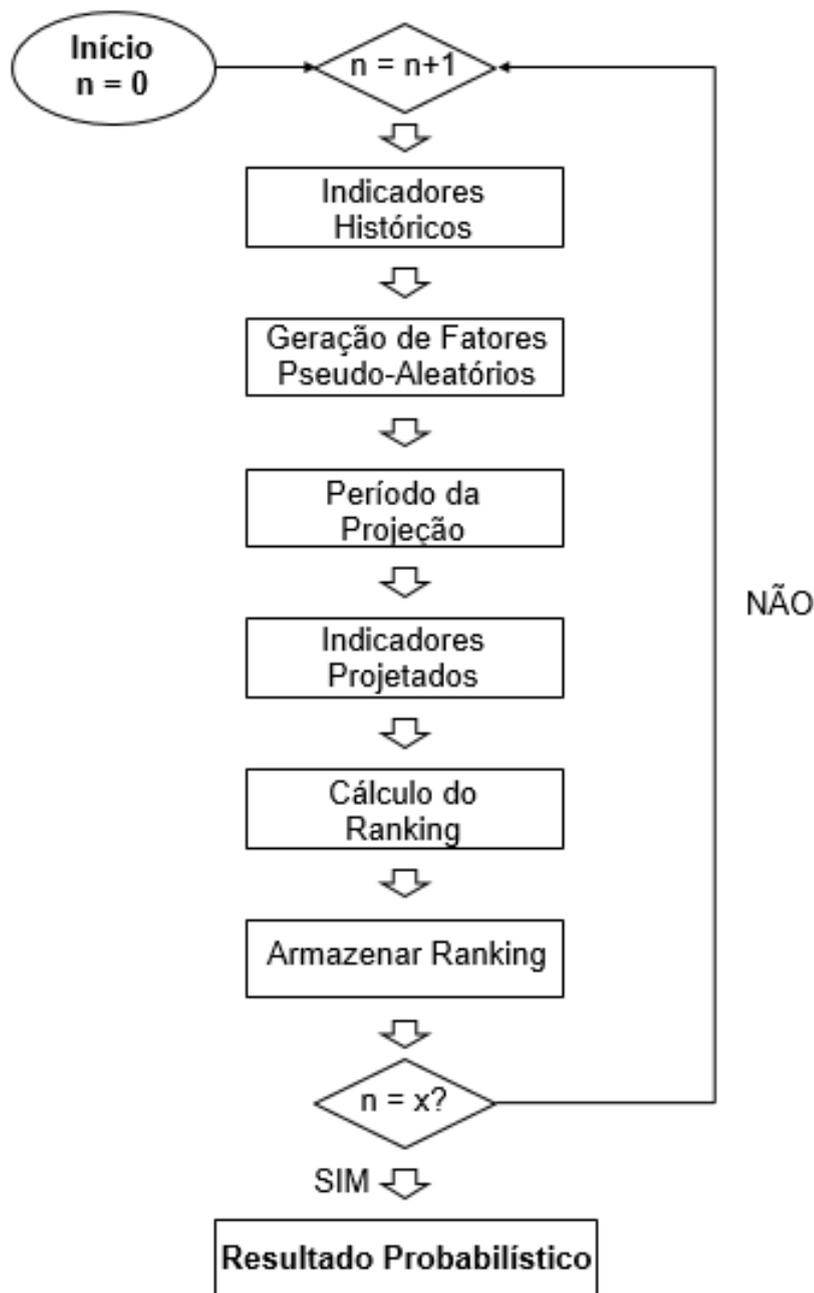
#### 4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

A aplicação do Método de Monte Carlo depende de uma programação a ser realizada em um sistema capaz de executar algumas funções, tais como armazenar uma base de dados de entrada, gerar números aleatórios dentro de um intervalo e distribuição pré-determinados no modelo, gerar repetições até que atinja o objetivo de parada do modelo proposto e armazenar os resultados de tais simulações.

No presente trabalho foi optado pela utilização do software Microsoft Excel, tal escolha foi realizada pelo programa atender à todas as necessidades, tendo geração de valores aleatórios e permitindo a realização de repetições e gravação de dados através da gravação de macros para automatizar o trabalho. Os macros são conjuntos de ações que podem ser executadas repetidas vezes através da gravação de uma rotina de comandos utilizados. A escolha da ferramenta também se deu pela disponibilidade do sistema e fácil replicação do método, além dos dados já estarem disponíveis em formato compatível com o programa para sua utilização.

A Figura 18 mostra uma fluxograma esquemático do sistema de Monte Carlo configurado para realizar as simulações do presente trabalho.

Figura 18 – Fluxograma do Método de Monte Carlo aplicado.



Fonte: Autor

O método se inicia através da contagem de repetições, estabelecendo-se o número inicial de simulações igual a zero ( $n=0$ ) para dar início à simulação. Após, é feita a leitura dos dados históricos dos indicadores, carregados na planilha no mesmo modelo utilizado na priorização dos equipamentos apresentada na Unidade 3 deste trabalho.

O passo seguinte consiste na geração de fatores pseudo-aleatórios. A

nomenclatura de pseudo-aleatórios se deve ao fato de que qualquer número gerado em um programa de computador segue alguma regra de geração, não sendo completamente aleatórios, porém os sistemas atuais permitem a geração de valores com comportamento muito próximo ao de valores aleatórios, não interferindo na geração dos resultados.

Esta etapa pode ser considerada a mais importante da Simulação de Monte Carlo, pois os fatores aqui colocados que irão ditar o comportamento dos indicadores nas simulações. Estes fatores são calculados conforme o comportamento dos indicadores, tratado na seção 4.2 deste trabalho. Eles darão os limites máximos em que o indicador poderá variar e também a distribuição dessa variação entre as simulações e entre os equipamentos. Os fatores serão os responsáveis por gerar cada cenário da simulação, podendo ser mais conservadores ou permitirem uma maior variação dos dados durante a simulação a fim de trazer um cenário mais amplo de possibilidades.

O período de projeção é o último dado de entrada da simulação, se refere ao número de anos que serão simulados à frente. Sua importância é elevada, principalmente, devido ao carregamento do equipamento, que pode ultrapassar a capacidade dos transformadores. Quanto maior o período utilizado na simulação, maiores serão as variações entre os resultados encontrados, uma vez que a variação dos dados ocorre anualmente, multiplicando os dados iniciais pelos fatores aleatórios gerados.

Com todos os dados de entrada presentes, são gerados os indicadores projetados, calculados através da correção do indicador histórico pelo fator aleatório elevado ao número de anos adotado na simulação. Esse cálculo gera uma nova tabela de indicadores para o período proposto, gerando um cenário possível para a condição dos equipamentos no período de simulação.

Os indicadores projetados são então submetidos ao cálculo do ranking dos equipamentos, apresentado na seção 3 deste trabalho, gerando um ranking de equipamentos mais críticos para a condição apresentada. Além do ranking, são salvos os carregamentos máximos dos transformadores para o período simulado, a fim de analisar a possibilidade de os equipamentos ultrapassarem a potência máxima, sendo necessária uma substituição por transformador com maior capacidade ou a ampliação do sistema com instalação de novos transformadores ou subestações.

Gerado o ranking e o carregamento projetado, os dados são salvos para cada transformador, concluindo a primeira repetição da simulação de Monte Carlo. Com isso, o número de repetições “n” é comparado com o número de repetições estipulado, caso não tenha sido atingido o processo retorna ao início, somando mais uma iteração à simulação e repetindo todos os passos apresentados até aqui.

Realizado o número de simulações definido, os dados armazenados são utilizados para calcular o resultado do cenário proposto, mostrando a probabilidade de cada transformador ultrapassar a sua capacidade nominal no período e a probabilidade do equipamento se encontrar entre os mais críticos do sistema após a janela de tempo analisada no cenário.

O modelo apresentado vai ao encontro do que diz Costa (1998), mostrando que os métodos de Monte Carlo variam, mas tendem a seguir um padrão específico: definir um domínio de possíveis entradas, gerar entradas aleatoriamente a partir de uma distribuição de probabilidade no domínio, realizar um cálculo determinístico nas entradas e agregar os resultados obtidos.

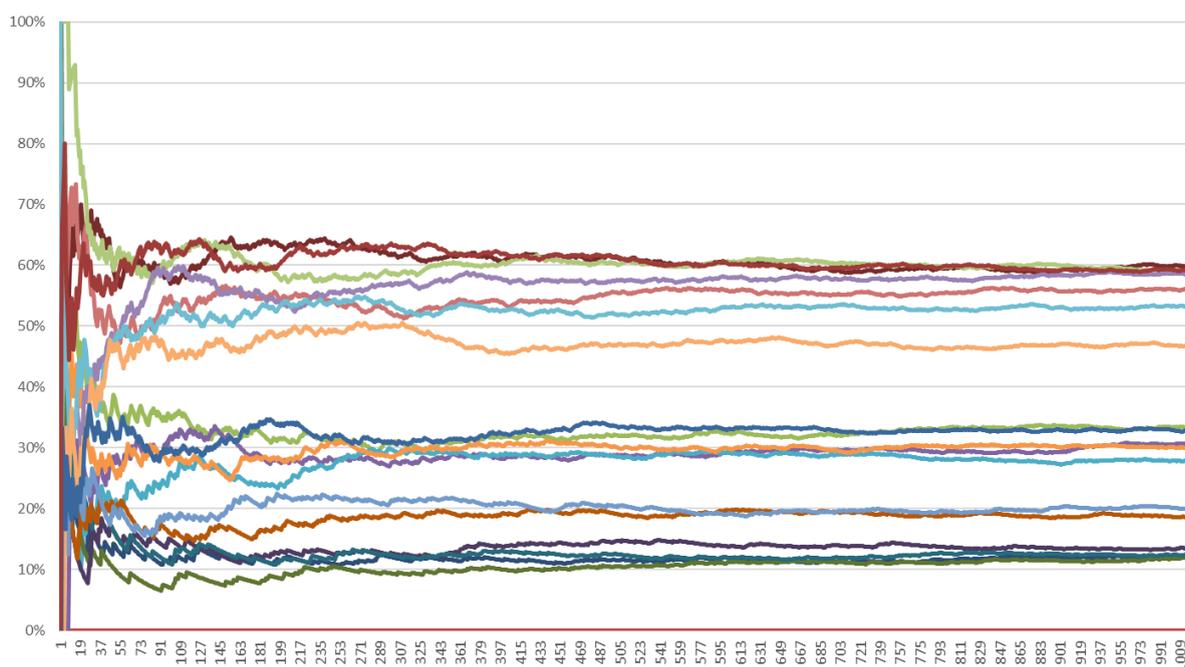
#### **4.4.1 Definição do Número de Simulações**

O Método de Monte Carlo necessita de uma regra de parada, caso contrário a simulação irá rodar continuamente e não irá ser finalizada devido à falta de uma regra que estabeleça o fim do processo. Basicamente existem duas regras possíveis de serem aplicadas como critério para finalizar a simulação, a primeira possibilidade é a utilização de erro máximo medido e a segunda é limitar o número de rotinas a serem realizadas. Mesmo no caso da regra do erro máximo, é necessário colocar uma métrica de número máximo de simulações a fim de parar de rodar o método caso os resultados não atinjam a convergência desejada.

A regra do erro máximo possui como principal problema a maior capacidade computacional envolvida, pois, além dos processos necessários para a geração dos valores simulados, é necessário rodar mais uma rotina de cálculos em todas as iterações realizadas, demandando mais tempo de simulação ou uma maior capacidade computacional para agilizar os cálculos. Essa regra é mais indicada em sistemas mais complexos, onde não existe a certeza que os dados irão convergir, podendo inclusive ser realizadas um número de simulações muito elevados com a simulação rodando por vários dias.

No presente trabalho, devido à simplicidade das regras de cálculo envolvidas, foi optado pela simulação com número de iterações previamente definida, pois existe a garantia de convergência dos valores. Para que seja analisada a convergência, pode-se utilizar tanto critérios matemáticos como o erro médio, quanto a análise gráfica. Neste trabalho foi utilizada a análise gráfica, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Convergência do Método de Monte Carlo.



Fonte: Autor

A Figura 19 mostra a convergência dos resultados para a simulação da probabilidade dos transformadores ultrapassarem o carregamento máximo, em um dos cenários simulados. Pelo gráfico, pode-se observar que os dados apresentam grande instabilidade nas primeiras iterações, tendendo a uma convergência conforme o número de iterações é aumentado.

No modelo proposto, pode-se observar que o número de 1.000 iterações já traz resultados com uma boa estabilidade, podendo ser o número de iterações a ser utilizado em análises recorrentes, uma vez que apresenta resultados convergentes e não necessita de grande potência computacional ou tempo de simulação.

Nas simulações utilizadas para o presente trabalho foi utilizado um computador com a seguinte configuração: Processador Intel Core i5-8265U, 1.80

GHz, Memória RAM de 4,00 GB, SSD de 256 GB. Foram realizadas 10.000 iterações para buscar um resultado minimizando o erro. Cada uma das simulações teve tempo aproximado de 3 horas de execução até a conclusão do número definido de iterações.

#### 4.5 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS

A última etapa da aplicação do Método de Monte Carlo consiste na elaboração de cenários de projeção que contemplem as possíveis variações que podem ocorrer no sistema em um horizonte definido. Para tal, é necessário desenvolver um conjunto de cenários que possa representar as diferentes condições de carregamento, custos e desempenho dos equipamentos que poderão ser encontradas no horizonte do estudo, a fim de auxiliar os agentes na tomada de decisão para investimento a médio e longo prazo, tanto no reforço das instalações, quanto na substituição dos equipamentos.

Serão tomados como parâmetros base dos cenários elaborados a variação encontrada nos indicadores conforme os dados históricos apresentados e dados do Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2031.

O PDE 2031 considera um cenário de crescimento econômico estimado de 2,9% ao ano no Produto Interno Bruto (PIB), com investimento aproximado de R\$ 530 bilhões na geração e transmissão de energia elétrica no Brasil para os próximos 10 anos. No cenário de referência, espera-se que a carga de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) cresça à taxa média de 3,4% a.a. entre 2021 e 2031. Entretanto, considerando-se a grande incerteza para o período decenal, foram elaborados dois cenários alternativos para os requisitos de geração.

No cenário inferior, com a dificuldade de aprovação de reformas, a expansão dos investimentos é mais fraca e vagarosa, implicando em um crescimento mais baixo da economia ao longo do horizonte decenal e levando a um crescimento da carga de energia aquém do observado no histórico, com taxa anual média de 2,8%. Já no cenário superior, há aprovação de reformas importantes e forte aumento dos investimentos, sobretudo em infraestrutura, que geram ganhos de produtividade relevantes. Com um ambiente de negócios melhor e maior competitividade, o dinamismo da economia é maior e a carga de energia cresce 4,0% ao ano.

Considerando esses dados, foram elaborados 3 cenários de estudo.

#### 4.5.1 Cenário 01

Para a simulação do cenário 01, foi considerado um ambiente de continuidade dos indicadores, com poucas alterações no comportamento dos dados, sendo utilizados os dados históricos como base para a simulação.

Portanto, para a configuração da simulação, partiu-se dos dados atuais históricos de cada um dos equipamentos, considerando que o comportamento irá permanecer semelhante aos valores históricos levantados durante o estudo. A partir dos valores atuais encontrados, permitiu-se uma variação correspondente a um desvio padrão para mais ou para menos nos indicadores de HI, FEQA, Parcela Variável e Custos de Manutenção, estabelecendo um comportamento de continuidade do comportamento atual.

Para os indicadores de impacto no sistema (LOLD, LOLF, EENS e IS), não foram consideradas variações aleatórias, uma vez que os mesmos seguem a configuração do sistema de transmissão existente. Os valores de custo de substituição também foram considerados constantes, pois, como se tratam de valores normalizados, o aumento dos preços deve ser linear entre os equipamentos, não alterando o impacto na modelagem. Devido a não apresentarem variações aleatórias, esses parâmetros foram considerados constantes nos 3 cenários apresentados.

A Figura 20 apresenta a configuração dos parâmetros de simulação para o Método de Monte Carlo simulado no Cenário 1.

O cenário 01 é o mais conservador dos 3 simulados, apresentando resultados de continuidade dos indicadores com uma pequena variação para analisar os resultados futuros.

Todas as simulações consideram um período de 10 anos, o mesmo que é utilizado no Plano Decenal de Expansão do Energia, a fim de padronizar as simulações, porém, o modelo proposto permite a alteração do período para a realização de novas simulações. Quanto ao número de iterações, foram realizadas 10.000 a fim de atingir uma convergência precisa dos dados, sendo possível reduzir esse valor para 1.000 para agilizar o processo, como mostrado na seção anterior.

Figura 20 – Configuração do Cenário 01 do Método de Monte Carlo.

Variação		Entrada		Número de simulações	
Carregamento	2,8%	Mín.	0,280	10000	
	4,0%	Máx.	0,887	Período de Previsão (anos)	10
HI	-0,44	Mín.	2,19	<b>Simular Ranking</b>	
	0,44	Máx.	4,43		
FEQA	-190,38	Mín.	6,46		
	190,38	Máx.	823,00	<b>Simular Carregamento</b>	
LOLD	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	0,16		
LOLF	0	Mín.	0,00	<b>Limpar</b>	
	0	Máx.	2,56		
EENS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	194,21		
IS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	3,72		
PV	-R\$ 5.262,84	Mín.	R\$ -		
	R\$ 5.262,84	Máx.	R\$ 134.941,52		
Manutenção	-R\$ 11.906,23	Mín.	R\$ 1.391,68		
	R\$ 11.906,23	Máx.	R\$ 91.141,71		
Substituição	0	Mín.	R\$ 5.067.254,68		
	0	Máx.	R\$ 13.036.386,97		

Fonte: Autor

#### 4.5.2 Cenário 02

O cenário 02 contempla um ambiente intermediário, considerando alguns aspectos da continuidade dos indicados, com maiores variações possíveis e retorno à médio nos indicadores que não são cumulativos. A Figura 21 mostra os parâmetros de entrada da simulação do cenário.

Para o Carregamento, foi mantido como base o cenário utilizado no PDE 2031, porém com a duplicação do limite superior, chegando a 8% a.a., e com o limite inferior sendo anulado, considerando o cenário da possibilidade de não crescimento da demanda de carga nos transformadores.

Os valores de HI e FEQA foram simulados nas mesmas condições do Cenário 01, sendo mantida a variação de um desvio padrão em torno dos valores atuais calculados.

Figura 21 – Configuração do Cenário 02 do Método de Monte Carlo.

Variação		Entrada		Número de simulações	
Carregamento	0,0%	Mín.	0,280	10000	
	8,0%	Máx.	0,887	Período de Previsão (anos)	10
HI	-0,44	Mín.	2,19	<b>Simular Ranking</b>	
	0,44	Máx.	4,43		
FEQA	-190,38	Mín.	6,46		
	190,38	Máx.	823,00	<b>Simular Carregamento</b>	
LOLD	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	0,16	<b>Limpar</b>	
LOLF	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	2,56		
EENS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	194,21		
IS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	3,72		
PV	Desvio padrão		Média		
Dist. Normal	R\$ 5.262,84		R\$ 2.535,12		
Manutenção	Desvio padrão		Média		
Dist. Normal	R\$ 11.906,23		R\$ 13.377,31		
Substituição	0	Mín.	R\$ 5.067.254,68		
	0	Máx.	R\$ 13.036.386,97		

Fonte: Autor

Já para os valores de Parcela Variável e Custos de Manutenção, foi realizada uma alteração nos parâmetros, considerando o retorno de todos os valores à média, pois os valores históricos podem estar ligados à eventos não recorrentes, o que pode distorcer os resultados. Por este motivo, a simulação do Cenário 02 considerou os valores médios e uma distribuição normal dos valores em torno destes valores, semelhante ao comportamento observado na Figura 16 e Figura 17.

#### 4.5.3 Cenário 03

O terceiro cenário simulado foi o com maior grau de liberdade na variação dos indicadores, permitindo testar um ambiente em que possam ocorrer grandes variações no comportamento entre os transformadores, a fim de analisar quais podem se tornar críticos quando submetidos a variações mais extremas no horizonte analisado. A Figura 22 mostra a tela de entrada da simulação realizada.

Figura 22 – Configuração do Cenário 03 do Método de Monte Carlo.

Variação		Entrada		Número de simulações	
Carregamento	-6,1%	Mín.	0,280	10000	
	12,8%	Máx.	0,887	Período de Previsão (anos)	10
HI	Desvio padrão	Mín.	Média	<b>Simular Ranking</b>	
Dist. Normal	0,445	Máx.	3,088		
FEQA	0,00	Mín.	0,00		
Dist. Linear	615,000	Máx.	615,000	<b>Simular Carregamento</b>	
LOLD	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	0,16	<b>Limpar</b>	
LOLF	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	2,56		
EENS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	194,21		
IS	0	Mín.	0,00		
	0	Máx.	3,72		
PV	Desvio padrão		Média		
Dist. Normal	R\$ 5.262,84		R\$ 2.535,12		
Manutenção	Desvio padrão		Média		
Dist. Normal	R\$ 11.906,23		R\$ 13.377,31		
Substituição	0	Mín.	R\$ 5.067.254,68		
	0	Máx.	R\$ 13.036.386,97		

Fonte: Autor

Neste cenário, para o carregamento, foram consideradas a mínima e máxima variação anual encontradas nos dados históricos, conforme apresentado na seção 4.1 deste trabalho, assim a possibilidade de variação ficou entre -6,1 e 12,8% ao ano.

Os dados de *Health Index* e Fator de Envelhecimento Equivalente foram também trazidos à média e foi utilizada a distribuição apresentada na seção 4.2 como parâmetro para as variações permitidas entre os equipamentos e as iterações. Portanto os valores de HI foram configurados com a média em 3,088 e obedecendo uma distribuição normal com desvio padrão de 0,445. Já os valores de FEQA foram configurados para uma distribuição linear entre 0 e 615. Quanto aos valores de Parcela Variável e Manutenção, foram configurados os mesmos parâmetros do Cenário 02.

Cabe ressaltar que, em todos os cenários e a cada iteração, são realizados todos os cálculos apresentados na unidade 3 para o ranqueamento dos equipamentos, incluindo a normalização dos dados, que permite que não haja

distorções devido à escala dos indicadores.

Os cenários foram configurados com base em dados históricos dos equipamentos e no Plano Decenal de Expansão de Energia, porém o modelo permite a rápida configuração para a simulação de novos cenários e projeções, se adequando a realidade encontrada na concessionária e ao planejamento a ser analisado pelos gestores e técnicos de podem se beneficiar do uso do sistema.

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

O Capítulo 4 apresenta um detalhamento da coleta de dados e do levantamento do histórico de carregamento dos transformadores. Os dados históricos foram coletados junto à concessionária CEEE Transmissão, utilizando o sistema de aquisição de dados do sistema. Após, os dados foram organizados e tratados a fim de se verificar o comportamento do carregamento entre os equipamentos e no decorrer do tempo. Foram também apresentados os comportamentos dos demais indicadores entre os transformadores, servindo como base para a posterior elaboração dos cenários.

Após, é apresentado o detalhamento da aplicação do Método de Monte Carlo, apresentando a ferramenta utilizada para o desenvolvimento do método, o fluxograma para a sua aplicação e como foram definidos os números de iterações necessária para atingir um resultado confiável nas simulações.

O capítulo também apresenta a configuração de 3 cenários que terão seus resultados analisados no Capítulo 5. Os cenários foram configurados conforme o comportamento dos indicadores, partindo de um cenário com menor grau de liberdade até um que permite maior variação dos indicadores. A ferramenta permite a fácil alteração dos cenários, adequando os mesmos a qualquer teste.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados dos cenários simulados mostra qual pode ser o comportamento dos equipamentos em um horizonte futuro, no caso das simulações realizadas no presente trabalho, em um período de 10 anos.

Os resultados permitem que sejam comparadas as condições atuais dos equipamentos, dadas pelo ranking estático apresentado na Unidade 3, com cenários futuros que dependem de eventos aleatórios passíveis de ocorrências no período analisado. Também permitem uma análise comparativa entre cenários, verificando o possível comportamento dos equipamentos quando se aumenta o grau de liberdade das simulações, permitindo maiores variações dos indicadores e ampliando as probabilidades de ocorrência de comportamentos mais variados e divergentes dos dados atuais.

Portanto, para que sejam apresentados e discutidos os resultados de maneira adequada, os mesmos serão organizados em duas seções, sendo primeiro discutidos os resultados das simulações de carregamento, e, posteriormente, as simulações de equipamentos críticos de acordo com o ranking elaborado através do método AHP.

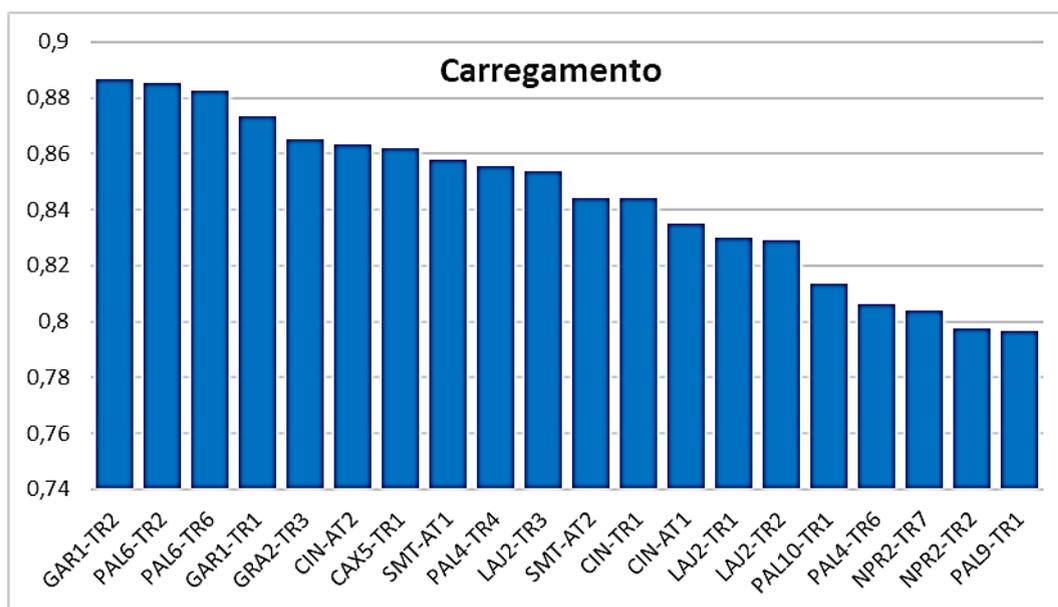
### 5.1 SIMULAÇÕES DE CARREGAMENTO

O carregamento dos equipamentos é um importante indicador a ser analisado, pois é um dos principais critérios utilizados para a definição da substituição do equipamento ou reconfiguração do sistema, a fim de distribuir a carga em outros equipamentos da rede, permitindo que o equipamento opere dentro de sua capacidade nominal. O uso do transformador com carregamento acima da capacidade nominal acarreta em grande envelhecimento adicional ao mesmo, devendo ser monitorado com atenção.

Para que sejam analisados os dados das projeções realizadas, parte-se dos dados atuais de carregamento encontrados para todos os transformadores. Os valores foram levantados para o período de 5 anos, conforme apresentado na Seção 4.1, sendo os mesmos padronizados para o Sistema por Unidade (pu) a fim de manter todos em uma mesma escala, independente da potência do transformador. Os dados medidos geraram um valor médio de 0,616 pu para o carregamento

máximo, com nenhum equipamento atingindo 0,900 pu. A Figura 23 apresenta os 20 equipamentos com carregamento mais crítico.

Figura 23 – Transformadores com maior carregamento atual.

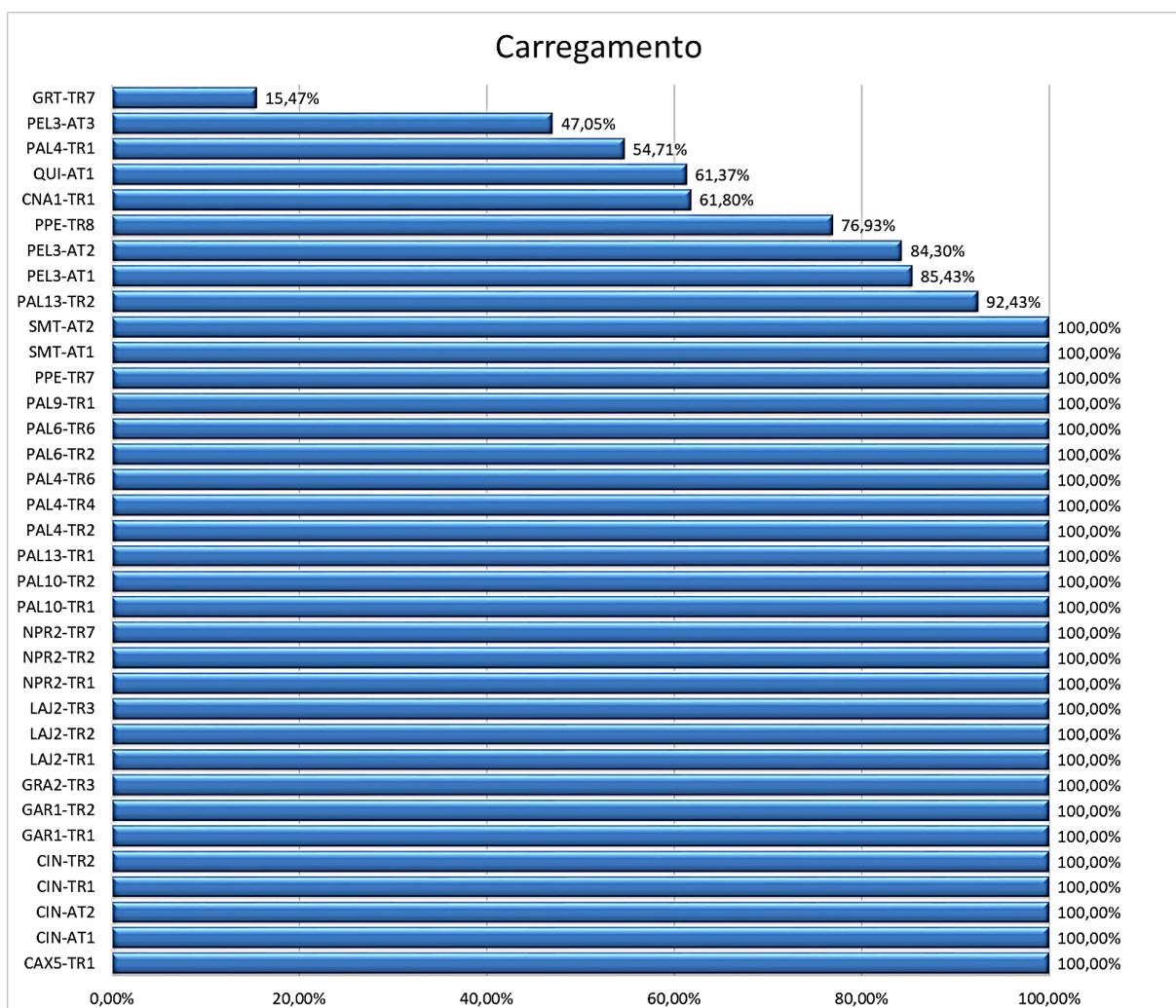


Fonte: Autor

Como as simulações dos cenários partem todas do carregamento máximo atual de cada equipamento, projetando, a partir destes dados, um comportamento de desempenho dos mesmos, se torna natural que os equipamentos com maior possibilidade de atingir um carregamento crítico são os que possuem um carregamento atual mais elevado. Esses resultados são reflexo do Método de Monte Carlo, que aplica multiplicadores aleatórios na previsão futura. A maioria das projeções de carga realizadas utiliza outras metodologias para garantir o máximo de proximidade dos valores de previsão adquiridos, porém, como se trata de um horizonte de longo prazo, as variáveis muitas vezes são de difícil previsão, sendo este método utilizado para uma análise probabilística, e não de uma previsão precisa do carregamento futuro.

A análise do Cenário 01 para o carregamento (Figura 24) mostra que 26 equipamentos devem atingir o carregamento máximo de 100% da capacidade nominal durante o período de 10 anos, considerando um crescimento regular entre os equipamentos entre 2,8 e 4,0%. Ou seja, mesmo que todos os equipamentos tenham aumento de carga em linha com o cenário mais conservador do PDE 2031, 26 equipamentos irão ultrapassar a potência nominal do transformador no período.

Figura 24 – Principais resultados para carregamento no Cenário 01.



Fonte: Autor

Quanto aos equipamentos, 15 se encontram na região metropolitana de Porto Alegre, nas subestações CIN, GRA2, PAL4, PAL6, PAL9, PAL10, PAL13 e PPE, enquanto 6 transformadores se encontram na região da serra gaúcha, nas subestações CAX5, NPR2 e GAR1. Os demais equipamentos estão localizados na subestação de Lajeado (LAJ2), 3 transformados e os 2 restantes na subestação SMT em Passo Fundo.

Analisando os históricos de carregamento, os transformadores da subestação LAJ2 já apresentaram redução significativa da carga entre o fim do ano de 2020 e início de 2021, ficando os carregamentos dos três transformadores longe das máximas após esse período. Esse fato se alinha aos resultados encontrados e elimina a subestação do ponto de atenção em relação ao carregamento.

Os transformadores da subestação SMT apresentam carregamento

crecente, com crescimento médio acima de 3% para todos os equipamentos. Porém, os 2 transformadores com maior potência da subestação, TR3 e TR11, apresentam carregamento inferior a 50% de sua potência nominal, podendo ser analisada uma possível redistribuição de carga entre os equipamentos da mesma subestação.

Já para os equipamentos da região metropolitana de Porto Alegre e Serra é necessária uma análise da possível instalação de novas subestações ou ampliação das existentes com reconfiguração das cargas, a fim de equalizar a carga nos equipamentos para os próximos anos. Esse planejamento de ampliação e redistribuição da carga não faz parte do escopo do presente trabalho, o mesmo se limitando a apresentar uma ferramenta de apoio na identificação de possíveis equipamentos críticos presentes no sistema.

Os resultados completos das simulações se encontram nos Anexos F a K do presente trabalho, apresentando os dados simulados para todos os transformadores do estudo.

Para o Cenário 02 da simulação de carregamento, os principais resultados são apresentados na Figura 25. Pode-se observar que nenhum dos transformadores atinge 100% de probabilidade de chegar ao carregamento crítico para sua potência nominal, tal fato é facilmente explicado pela configuração dos dados de entrada do cenário, onde são consideradas variações de 0 a 8% no carregamento.

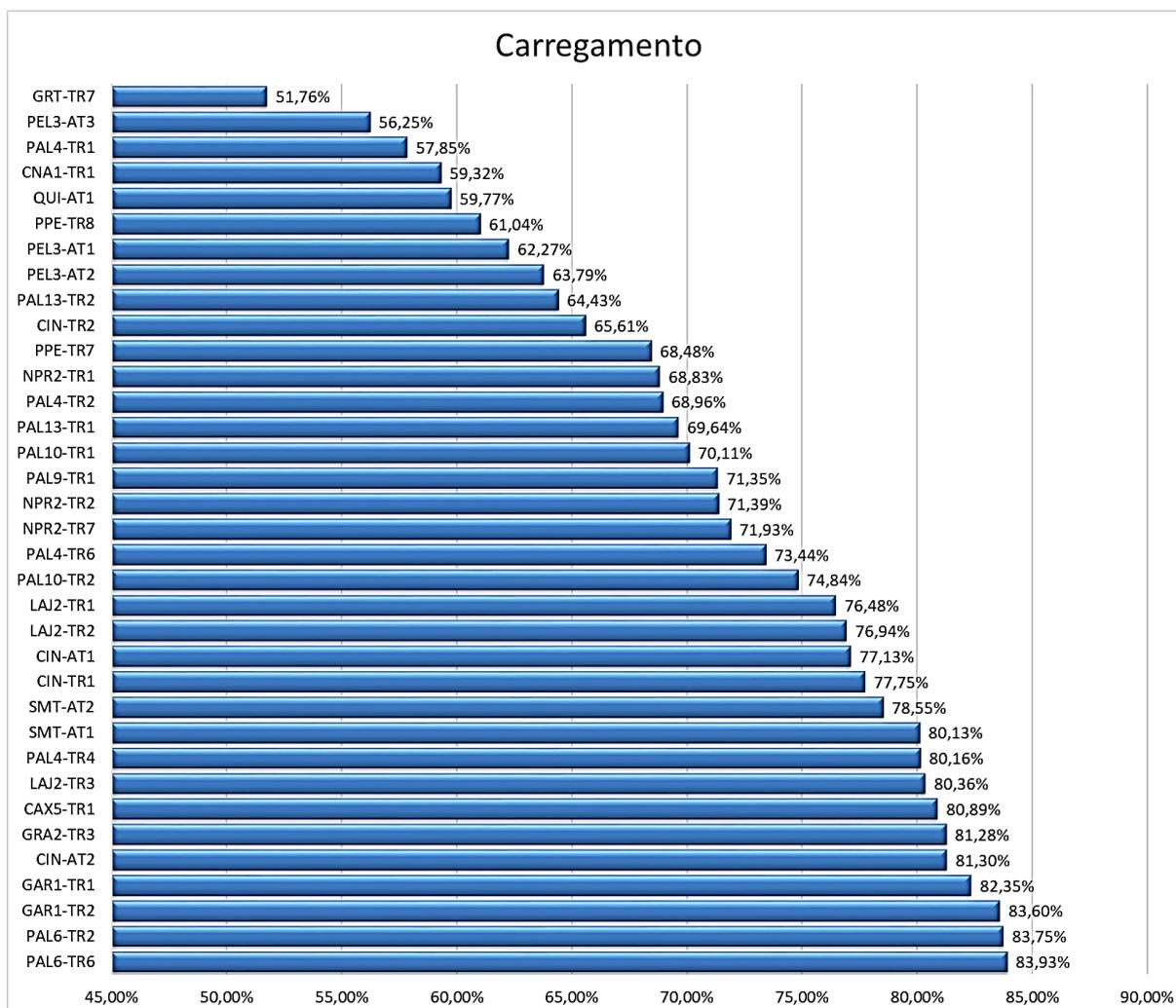
Neste cenário, porém, os mesmos 35 transformadores que apresentaram chance acima de 0% de atingirem o carregamento limite no cenário anterior, apresentam probabilidade acima de 50% de chegar ao carregamento limite. Destaque para 4 transformadores da região sul, instalados na subestação PEL3 e QUI que, apesar de apresentarem chance acima de 50% de ultrapassar a capacidade nominal, apresentam carregamento decrescente no período de 5 anos usado para levantamento de dados. Por fim, neste cenário 86 dos 104 transformadores analisados apresentam alguma possibilidade de atingir o carregamento máximo nos próximos 10 anos.

O Cenário 03, por sua vez, apresenta o maior grau de liberdade para a variação do carregamento, gerando uma maior distribuição da probabilidade dos equipamentos atingirem a capacidade máxima, como mostra a Figura 26 e o Anexo J. Neste cenário, 91 equipamentos apresentam probabilidade de atingir o carregamento limite, com apenas 13 estando completamente livres de atingir a

capacidade nominal do transformador.

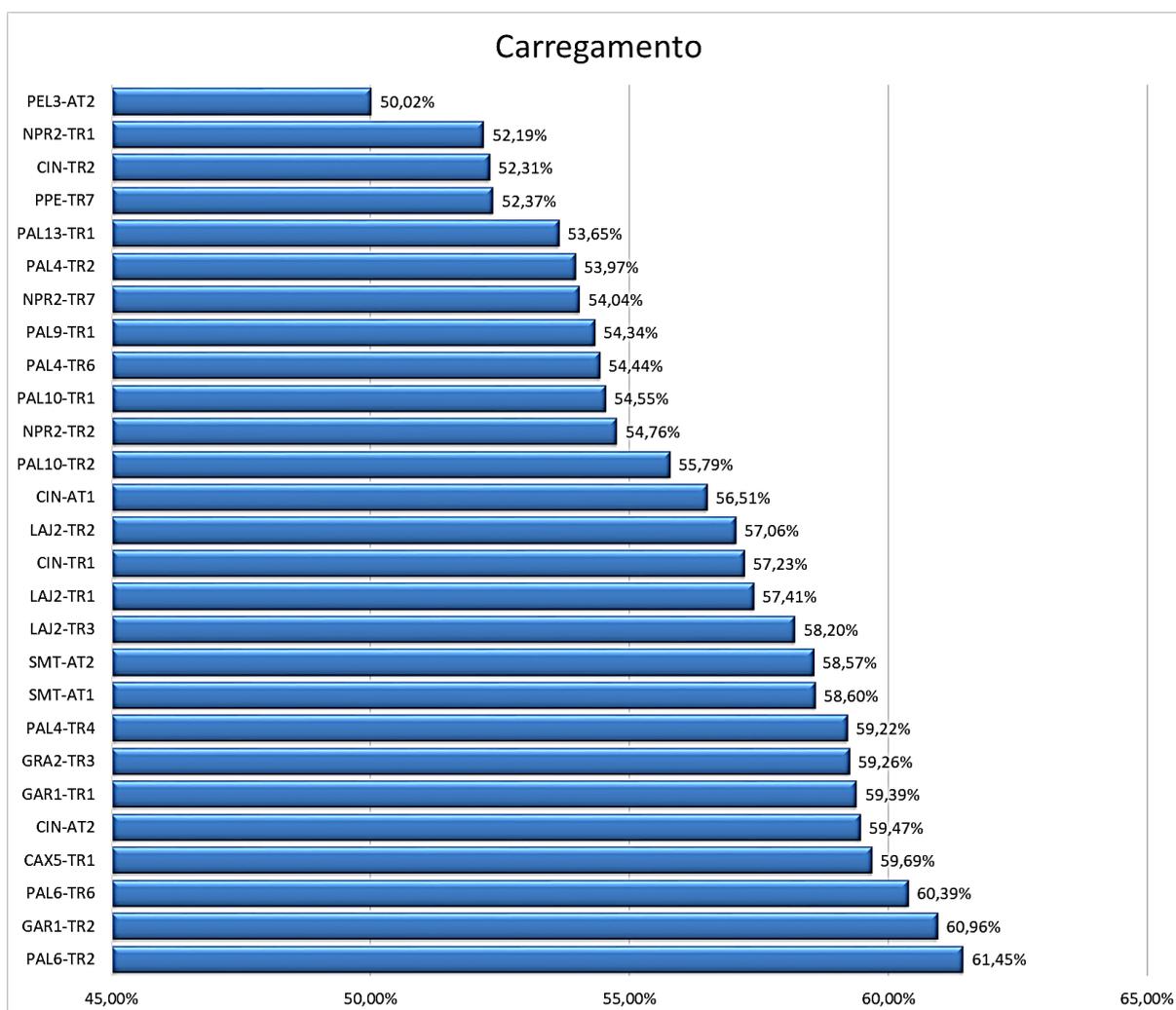
Os três cenários simulados apresentam, com diferentes graus de liberdade, as probabilidades de os equipamentos atingirem um carregamento crítico, em que sejam necessárias providências a fim de manter o carregamento dentro da capacidade dos equipamentos, seja pela substituição, reforço ou redistribuição da carga. Apesar das diferenças significativas entre os cenários apresentados, os três apresentam, em comum, as regiões metropolitana de Porto Alegre e região da Serra como principais pontos de atenção, sendo muito elevada a probabilidade de ser necessária a realização de reforços nas regiões a fim de melhor distribuição das cargas entre os equipamentos. Os demais transformadores apresentam situações específicas, onde cabe o monitoramento, porém com riscos menos elevados quanto ao limite do equipamento.

Figura 25 – Principais resultados para carregamento no Cenário 02.



Fonte: Autor

Figura 26 – Principais resultados para carregamento no Cenário 03.



Fonte: Autor

## 5.2 SIMULAÇÕES DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS

As simulações de equipamentos críticos, por sua vez, consideram a metodologia AHP apresentada na Unidade 3 para o ranqueamento dos equipamentos, considerando o carregamento, vida útil, impacto estrutural no sistema e impacto financeiro ocasionado por cada equipamento, através do uso de diversos indicadores.

Para a comparação entre os cenários projetados, foi considerada a probabilidade do equipamento se encontrar entre os 10 equipamentos mais críticos segundo a metodologia. Não foram consideradas diferenças entre as posições dentro desta faixa, pois toda a faixa é considerada como crítica para os equipamentos. O posicionamento do equipamento entre os críticos acarreta em

necessidade de atenção, a fim de monitorar os aspectos que contribuem para que o equipamento esteja dentro desta faixa, realizando as possíveis intervenções, caso necessárias. Essas intervenções podem prolongar a vida útil do equipamento, reduzir custos, ou mesmo antecipar a substituição de um equipamento que esteja gerando custos ou riscos operacionais para a concessionária.

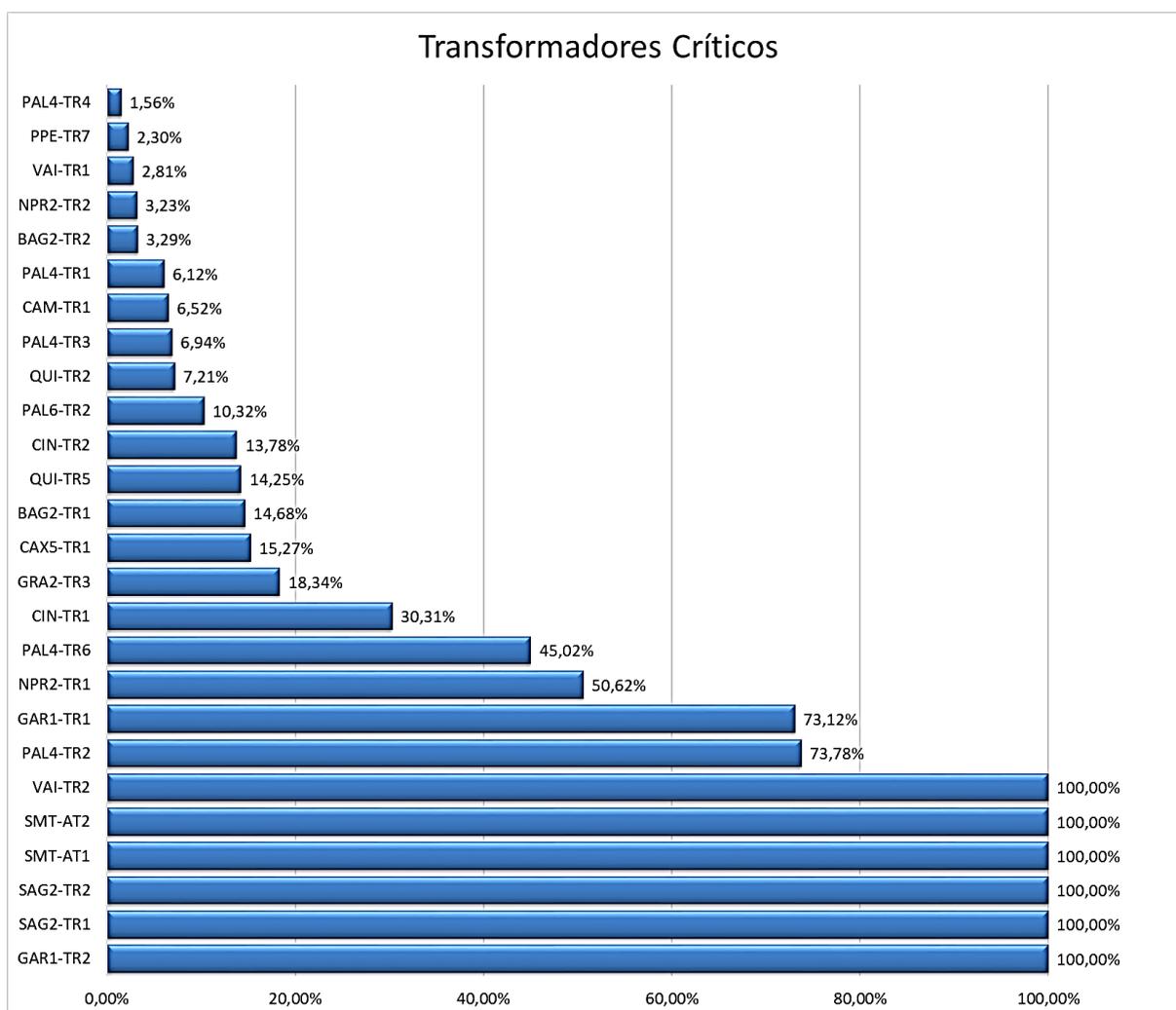
O Cenário 01, apresentado em destaque na Figura 27 e com a lista completa no Anexo G, apresenta a probabilidade do equipamento estar entre os críticos para um ambiente com condições de continuidade dos indicadores atuais, permitindo pequenas variações. Neste cenário foi configurada a variação no carregamento entre 2,8 e 4% e de um desvio padrão em relação aos indicadores atuais para HI, FEQA, Parcela Variável e custos de Manutenção.

Como se trata de um cenário de continuidade, a lista de transformadores com maior probabilidade de estarem entre os críticos possui grande semelhança ao ranking apresentado na Unidade 3. Destaque para os 6 transformadores que possuem 100% de chance de permanecer entre os críticos, VAI-TR2, SMT-AT1 e AT2, SAG2-TR1 e TR2 e GAR1-TR2. Além disso, o cenário mostra que 34 dos 104 equipamentos possuem chances de estar entre os mais críticos, sendo 9 destes acima de 50% de chance.

Para o Cenário 02, com destaques apresentados na Figura 28 e lista completa no Anexo I, foi utilizado um ambiente de simulação que permitiu um grau de liberdade um pouco maior para os indicadores. Para o carregamento, foi considerada a variação de 0 a 8%, enquanto para os custos com Parcela Variável e Manutenção foi simulado um ambiente de retorno a valores médios históricos para todos os equipamentos, com custos distribuídos através de uma distribuição normal em torno dos valores médios. Já para os demais indicadores, foram considerados os mesmos parâmetros do Cenário 01.

Como destaques deste cenário, tem-se a entrada do transformador QUI-TR5 entre os mais críticos do sistema, enquanto ocupava a posição 17 no ranking atual. Tal mudança ocorreu devido ao mesmo possuir custo zero no histórico de Parcela Variável, baixando sua posição no ranking, apesar de possuir outros indicadores com valores mais críticos.

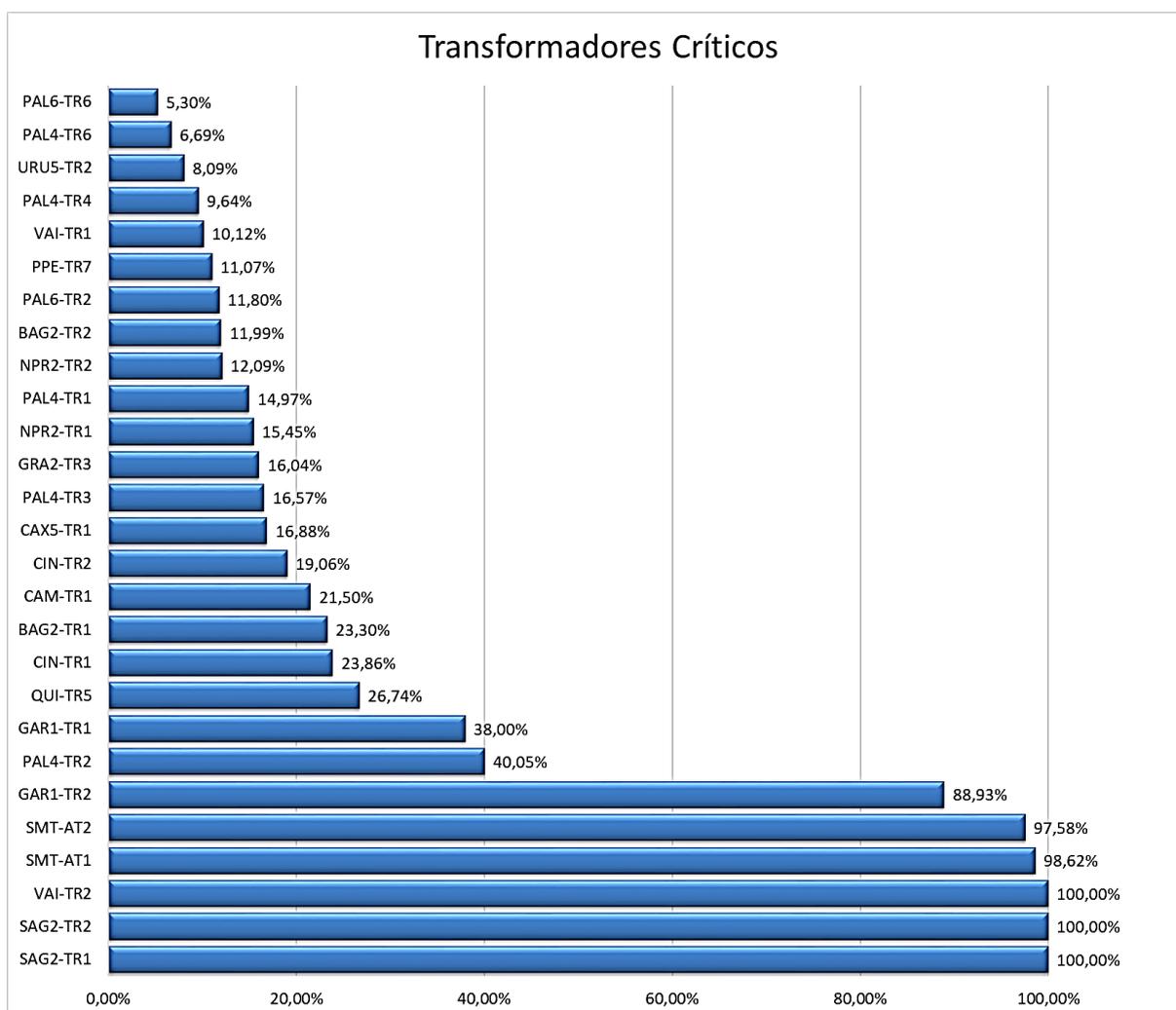
Figura 27 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 01.



Fonte: Autor

Já para os transformadores NPR2-TR1 e PAL4-TR6 ocorreu uma situação oposta, caindo das posições atuais 8 e 10, para as posições 17 e 26, respectivamente. Este fato ocorre porque os custos históricos com parcela variável e manutenção dos dois equipamentos era elevado, ou seja, em um cenário que estes custos possam ser trazidos a uma média, tais transformadores deixam de ser críticos para o sistema.

Figura 28 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 02.



Fonte: Autor

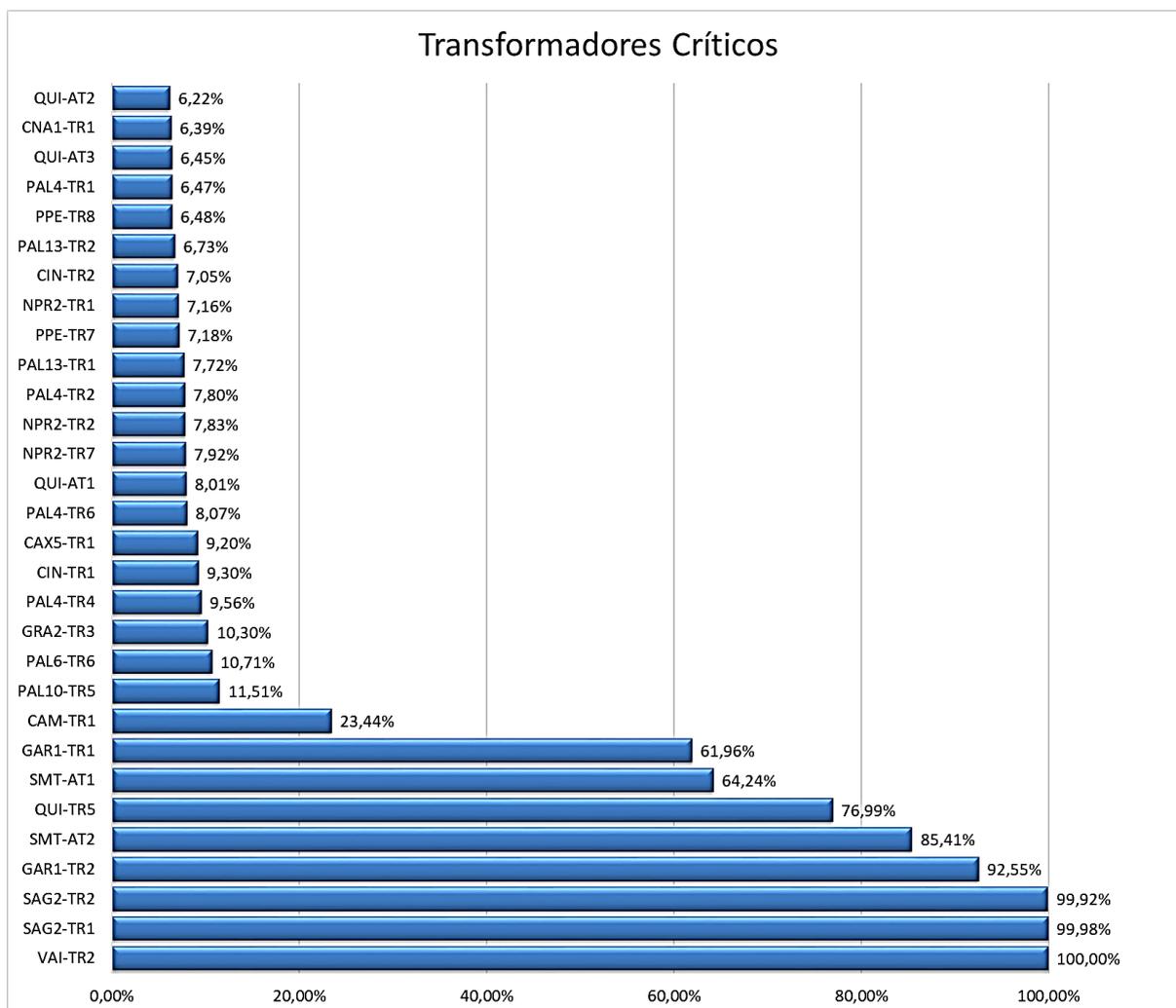
O Cenário 03 (Figura 29) simula o ambiente de maior grau de liberdade para os dados de entrada, visando buscar as possíveis variações do sistema em caso de maior variação dos indicadores. Para o carregamento, foi considerada a variação de -6 a +12% ao ano, como encontrado nos dados históricos. Já para os indicadores FEQA, *Health Index*, Parcela Variável e Manutenção, foram consideradas as distribuições em torno do valor médio dos indicadores, considerando todos os equipamentos em condições de entrada com retorno à média.

O Cenários 03 apresentou 8 transformadores em destaque com chances acima de 50% de permanecer entre os críticos, enquanto 95 apresentaram chances abaixo de 12%, sendo que todos possuem chances de atingir o patamar de equipamento crítico neste cenário.

O principal destaque deste cenário é o transformador PAL10-TR5, que no

ranking atual com dados históricos se encontra na posição 85, sem qualquer risco de estar entre os críticos, e no cenário simulado aparece entre os 10 equipamentos com maior chance de se tornar crítico, demandando monitoramento.

Figura 29 – Principais resultados equipamentos críticos no Cenário 03.



Fonte: Autor

Realizada a análise dos três cenários, pode-se verificar que alguns equipamentos podem trazer comportamentos mais ou menos críticos, dependendo do grau de liberdade utilizado para os indicadores, além dos dados de entrada, sendo utilizados os valores históricos ou um retorno à média. Porém, pode se destacar que, independente do cenário utilizado, 6 equipamentos permanecem sempre entre os transformadores críticos para o sistema. Ou seja, os transformadores VAI-TR2, SAG-TR1 e TR2, SMT-AT1 e AT2 e GAR1-TR2 se encontram sempre entre os 10 equipamentos mais críticos do sistema, independente

do cenário utilizado.

Quando estes equipamentos são analisados de forma individual, pode observar as causas de os mesmos serem destaques. Os equipamentos VAI-TR2, SMT-AT1 e AT2 possuem mais de 40 anos em operação e apresentam valores de HI e FEQA fortemente acima da média. Além disso, o equipamento VAI-TR2 apresenta todos os indicadores de confiabilidade sistêmica próximos aos valores máximos calculados, enquanto os equipamentos SMT-AT1 e AT2 apresentam os maiores custos de manutenção aliados a um baixo custo de substituição. Esses fatores toram estes 3 equipamentos fortes candidatos a serem substituídos em um horizonte de curto a médio prazo.

Quanto aos equipamentos GAR1-TR2, SAG-TR1 e TR2, apesar de não apresentarem um tempo de operação elevado, possuem todos os indicadores elevados, com valores próximos ou acima da média. Destaque para o transformador GAR1-TR2 que possui o maior carregamento dentre todos os equipamentos analisado.

Desde modo pode-se considerar que a ferramenta pode auxiliar na identificação de equipamentos a serem monitorados com maior atenção, permitindo também a simulação de ambientes já modificados, considerando alterações pontuais e correções de possíveis estratégias a serem adotadas pela gestão.

### 5.3 SIMULAÇÕES DE ALTERAÇÕES NO SISTEMA

A ferramenta apresentada pode ser utilizada não somente para utilizar o sistema atual com uma projeção de cenário futuro, mas também, sempre em paralelo à outras ferramentas de gestão e planejamento da concessionária, para analisa o impacto que possíveis alterações podem gerar ao longo do tempo no sistema a na condição de criticidade dos equipamentos.

Para ilustrar essa aplicação, é apresentado um cenário alterado, considerando algumas modificações que são propostas com base na análise dos cenários apresentados. Cabe ressaltar que este trabalho tem por finalidade servir como ferramenta de apoio na gestão dos equipamentos. Desta forma, esta ferramenta deve ser utilizada em conjunto com as demais ferramentas e procedimentos técnicos da empresa, utilizando simulações de despacho de carga para prever as alterações do sistema e seus carregamentos e também dados

históricos e paradas e manutenções para avaliar os custos envolvidos.

Nesta simulação são utilizadas variações pontuais para os indicadores de alguns equipamentos, atribuídas de forma linear a fim de demonstrar a aplicação para a ferramenta. Assim, foram realizadas as seguintes alterações:

- Redução de 0,20 pu no carregamento dos transformadores CIN-AT1, AT2, TR1 e TR2, PAL4-TR2, TR4 e TR6, PAL6-TR2 e TR6, PAL9-TR1, PAL10-TR1 e TR2, PAL13-TR1 e TR2, PPE-TR7 e TR8 e GRA2-TR3, simulando possíveis adequações de carga com a instalação de nova subestação ou reforço das existentes na região metropolitana de Porto Alegre;

- Redução de 0,20 pu no carregamento dos transformadores CAX5-TR1, GAR1-TR1 e TR2, NPR2-TR1, TR2 e TR7, simulando possíveis adequações de carga com a instalação de nova subestação ou reforço das existentes na região da serra;

- Redução de aproximadamente 0,23 pu para os transformadores LAJ2-TR1, TR2 e TR3. Tal redução foi observada no histórico de carregamento do último ano dos 3 equipamentos;

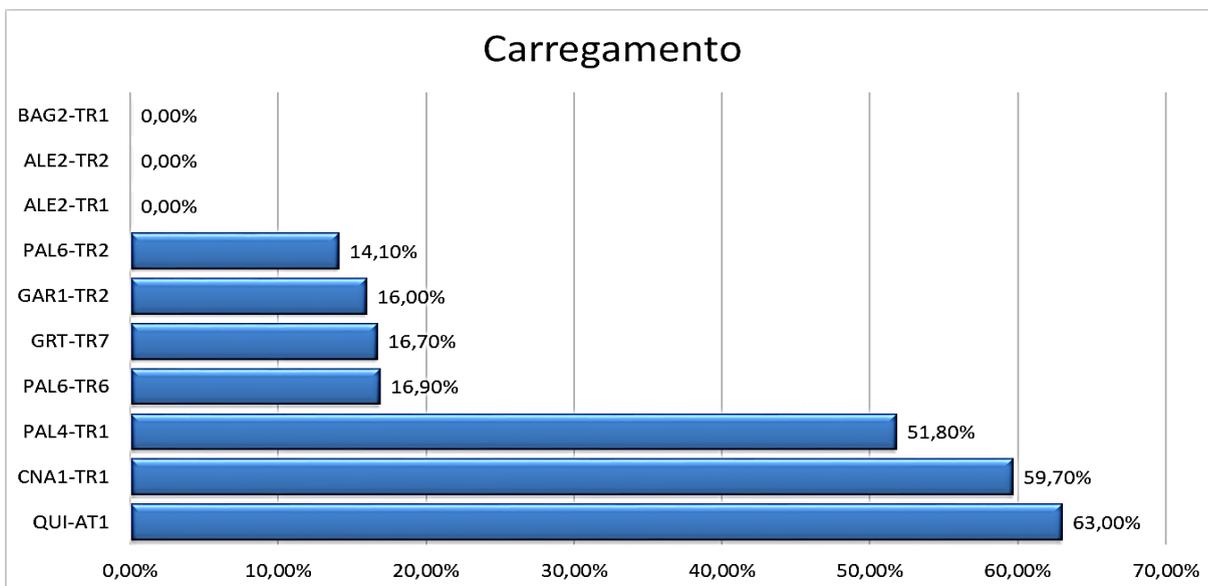
- Substituição dos equipamentos SMT-AT1 e AT2 por equipamentos de maior potência (83 kVA) e rebalanceamento da carga dos transformadores da subestação;

- Substituição do transformador VAI-TR2 e adequações na subestação a fim de trazer os indicadores de confiabilidade e FEQA para valores próximos à média dos demais equipamentos;

- Implantação de melhorias ou reforços na subestação SAG a fim de melhorar os indicadores de confiabilidade sistêmica dos dois equipamentos.

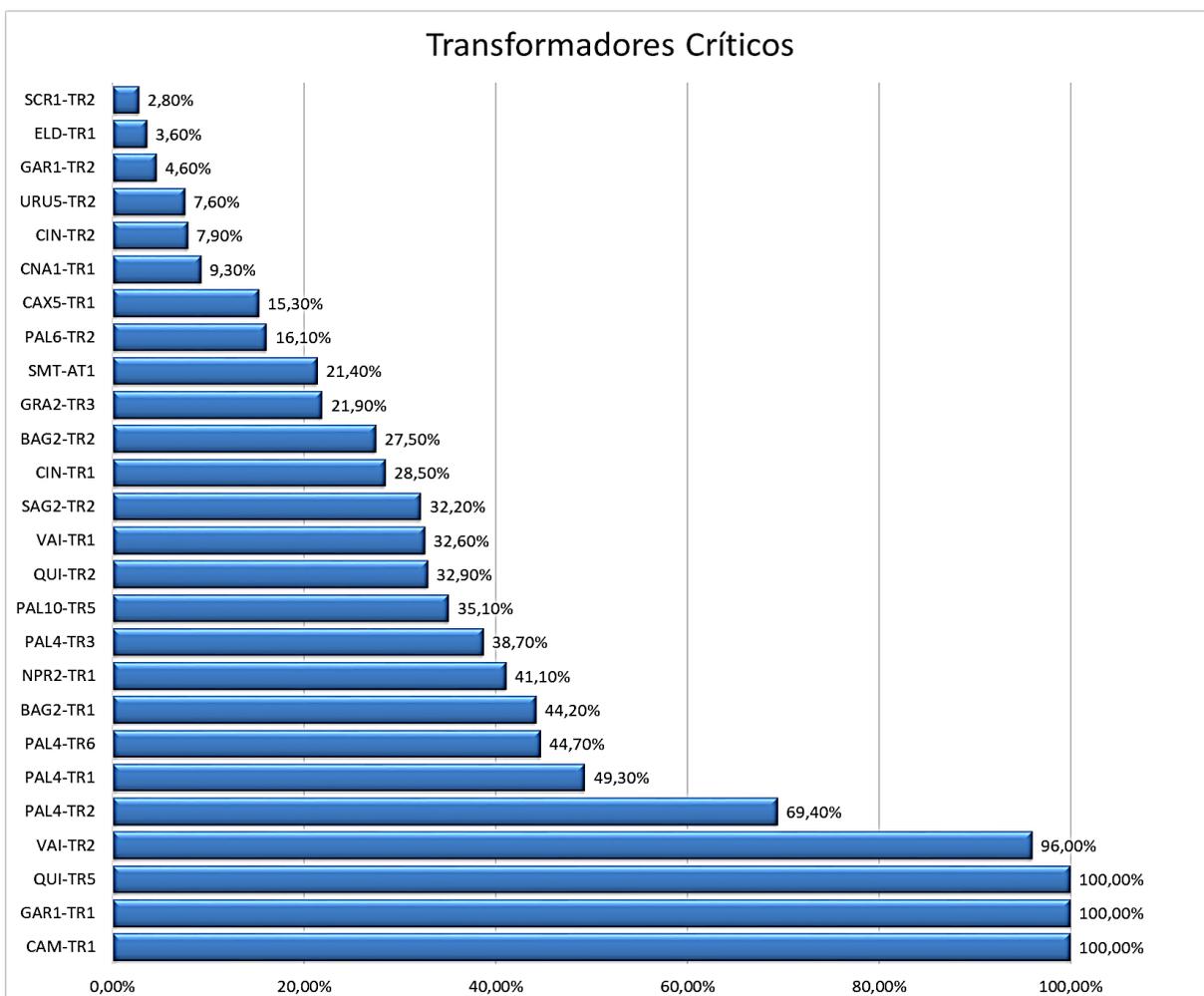
Todas as alterações propostas foram simuladas realizando a alteração nos dados de entrada, tendo como base a configuração do Cenário 01. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 – Resultados para carregamento no cenário com alterações.



Fonte: Autor

Figura 31 – Equipamentos críticos no cenário com alterações.



Fonte: Autor

Após a alteração do carregamento conforme descrito, nenhum dos equipamentos apresentou 100% de chance de atingir o carregamento máximo no período, enquanto somente 7 equipamentos apresentaram tal possibilidade. Assim, as alterações devem ser suficientes para atender as demandas dos próximos 10 anos, considerando o cenário de crescimento proposto.

Quanto aos equipamentos críticos, houve um maior equilíbrio nos resultados, sendo que dos 6 equipamentos que possuíam 100% de chances de estar entre os mais críticos do sistema, nenhum apresentou tal possibilidade após as alterações, sendo o transformador VAI-TR2, com 96% de probabilidade. Após tais alterações, os equipamentos a serem monitorados com maior atenção seriam QUI-TR5, GAR-TR1 e CAM-TR1.

Cabe aqui ressaltar que a proposta não apresenta um planejamento definitivo para a gestão dos equipamentos ou para o sistema elétrico de transmissão. A ferramenta tem aplicação no auxílio na gestão de equipamentos, devendo ser utilizada em paralelo com a análise de fluxo de potência, análise de planejamentos financeiro e demais métodos já utilizados pela concessionária.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A simulação de cenários e sua análise permite que sejam comparados resultados em um horizonte de tempo definido, verificando o possível comportamento dos equipamentos quando submetidas a várias situações de operação. Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados para 3 cenários com graus de liberdade distintos. Além da comparação entre cenários, também é realizada uma discussão que envolve as condições atuais para carregamento e equipamentos críticos.

Os cenários de carregamento mostram cenários com diferentes graus de variação entre os equipamentos, partindo dos dados do PDE 2031, com variação entre 2,8 e 4%, até um cenário que considera as medições dos últimos 5 anos como parâmetro, variando entre -6,1 e 12,8% ao ano. No cenário de menor variação, como todos os equipamentos tendo crescimento de carga pequeno, porém contínuo, é verificado que diversos equipamentos podem ultrapassar a capacidade nominal nos próximos 10 anos.

Quanto aos equipamentos críticos, mesmo com a variação dos cenários simulados, os principais equipamentos se mantêm como críticos nos 3 cenários apresentados. Isso mostra que as condições atuais dos mesmos devem ser observadas a fim de encontrar uma possível solução para a gestão dos mesmos. São também apresentados os principais indicadores que influenciaram os equipamentos a estarem enquadrados entre os equipamentos de maior risco.

Analisados os cenários, foram propostas alterações no sistema e equipamentos a fim de mitigar possíveis problemas. Dentre as alterações estão a implantação de novas subestações nos próximos anos, a substituição e a manutenção de transformadores. Tais alterações foram propostas para demonstrar o uso da ferramenta desenvolvida, cabendo aos gestores uma análise do sistema em conjunto com as demais ferramentas e informações disponíveis para um planejamento do sistema no médio e longo prazo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma nova ferramenta para servir de auxílio na gestão de equipamentos do sistema elétrico de potência, assim como sua aplicação em um estudo de caso de transformadores de potência do sistema de transmissão da CEEE Transmissão, englobando as subestações presentes no estado do Rio Grande do Sul.

Primeiramente o trabalho aborda a importância de uma metodologia ampla, que contemple tanto aspectos de vida útil do equipamento, importância ao sistema e também os aspectos financeiros envolvidos.

Diante da necessidade, através da Método e Análise Hierárquica de Processos – AHP, foi realizado um ranqueamento dos transformadores quanto a sua criticidade para o sistema. Para tal, foram levantados os principais indicadores que afetam o desempenho dos equipamentos e que contribuem para que o mesmo seja substituído pelas concessionárias. Os indicadores foram submetidos a um grupo de especialistas com atuações diversas, tanto em empresas fornecedoras, quanto concessionárias e do meio acadêmico, para comparação pareada da importância de cada atributo. Através dos pesos atribuídos, chegou-se a um ranking de equipamentos mais críticos para os sistemas. Os indicadores também foram submetidos à uma análise de correlação e sensibilidade para sua validação.

Após, foram analisados os comportamentos de todos os indicadores e sua distribuição entre os equipamentos, além da evolução histórica dos dados de carregamento por equipamento. Com base nestes dados, foram elaborados 3 cenários base para a aplicação do Método de Monte Carlo. Os cenários foram configurados para um horizonte de 10 anos, analisando-se, de forma probabilística, o comportamento dos transformadores em cada um dos cenários quanto ao seu carregamento e à sua criticidade.

Com base nos resultados das simulações, foram propostas alterações para adequar o sistema no horizonte projetado, reduzindo os equipamentos críticos do sistema e equalizando o carregamento a fim de não deixar nenhum equipamento em condição de ultrapassar a capacidade em situação de carregamento máximo.

Os resultados obtidos mostram uma ferramenta de fácil operação e de grande

utilidade para a previsão de cenários e auxílio no planejamento do sistema elétrico. Podem ser simulados, com praticidade e rapidez, diferentes condições de operação dos equipamentos, com variação tanto dos dados de entrada para os indicadores, quanto do grau de liberdade para sua variação no decorrer do tempo. A ferramenta, porém, deve ser utilizada em paralelo com outras ferramentas e dados para um planejamento dos sistemas de transmissão, servindo como suporte na elaboração de estratégias e na tomada de decisões.

## 6.2 OPORTUNIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

De modo a complementar o estudo desenvolvido, sugere-se o desenvolvimento de outros trabalhos, sendo:

- Desenvolvimento de um planejamento de longo prazo utilizando a metodologia proposta em conjunto com a análise do despacho de carga para o sistema;
- Aplicação da ferramenta proposta em outros tipos de equipamentos e em outras concessionárias para validação da metodologia;
- Elaboração de uma análise de custos com projeção de investimentos a serem realizados e sua viabilidade econômica;
- Aplicação de inteligência artificial para projeção dos indicadores.

## 6.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Durante o doutorado, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos:

### 6.3.1 Artigos Completos Publicados em Eventos

**Campanhola, F. P.;** Feil, D. P.; Schaefer, J. L.; Marchesan, T. B.; Siluk, J. C. M. Metodologia para Análise de Custos da Indisponibilidade de Transformadores de Potência em Subestações Brasileiras. **SEPOC 2021 – 13º Seminar on Power Electronics and Control**. Local/Data: Santa Maria/RS, 16 de Maio de 2021.

**Campanhola, F. P.;** Feil, D. P.; Siluk, J. C. M.; Marchesan, T. B.; Carraro, R. Análisis Multicriterios para Priorizar la Sustitución de Transformadores de Potencia en

Subestaciones. **XX SEPROSUL – Semana de la Ingeniería de Producción y Mecánica Sudamericana.** Local/Data: La Plata – Argentina, 14 e 15 de Outubro de 2021.

**Campanhola, F. P.;** Feil, D. P.; Carraro, R. M.; Beltrame, R. C.; Marchesan, T. B. Desarrollo de Metodología Computacional para la Gestión de Activos Aplicada a Transformadores de Energía. **XX SEPROSUL – Semana de la Ingeniería de Producción y Mecánica Sudamericana.** Local/Data: La Plata – Argentina, 14 e 15 de Outubro de 2021.

Marchesan, T. B.; **Campanhola, F. P.;** Feil, D. P.; Viana, S.; Beltrame, R. C.; Carraro, R. M.; Bortolini, R.; Selinke, R. Desenvolvimento de Metodologia Computacional para Gestão de Ativos Aplicada a Transformadores de Potência da Rede Básica. **XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.** Local/Data: Rio de Janeiro/RJ, 15 a 18 de Maio de 2022.

### **6.3.2 Artigos Submetidos à Periódicos**

**Campanhola, F. P.;** Feil, D. P.; Schaefer, J. L.; Marchesan, T. B.; Siluk, J. C. M. Methodology for Cost Analysis of the Unavailability of Power Transformers in Brazilian Substations. **Electric Power Components and Systems.**

**Campanhola, F. P.;** Schaefer, J. L.; Feil, D. P.; Beltrame, R. C.; Marchesan, T. B.; Siluk, J. C. M. Computational Methodology for Asset Management Applied to Power Transformers. **International Journal of Energy Economics and Policy.**

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnicas. **NBR 5416**: Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento. Rio de Janeiro, 1997. 73 p.

ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A. Asset management techniques for transformers. **Electric Power Systems Research**. Vol. 80, n. 4, Apr. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779609002405>>. Acesso em: 12 jan. 2020. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.10.008.

ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A.; BARTNIKAS, R. A Techno-Economic Method for Replacing Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 26, n. 2, Apr. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5674120/>>. Acesso em: 12 jan. 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2091289.

ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A.; IBRAHIM, M. Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 27, issue: 4, Oct. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6255812/>>. Acesso em: 08 jun. 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.

ACZÉL, J.; SAATY; T. L. Procedures for synthesizing ratio judgements. **Journal of mathematical Psychology**, v. 27, n. 1, p. 93-102, 1983. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022249683900287f>>. Acesso em: 12 mai. 2020.

ALDHUBAIB, H. A.; SALAMA, M. M. A. A novel approach to investigate the effect of maintenance on the replacement time for transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 29, n.4, Aug. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6861488/>>. Acesso em: 25 jan. 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2321409.

ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo: **Atlas**, 2013.

ALTRAN, A. Sistema inteligente para previsão de séries temporais: uma aplicação em previsão de carga em sistemas elétricos de potência. [s.l.] **UNESP**, 2010.

AMORIN, F. R.; ABREU, P. H.; PATINO, M. T. O.; TERRA, L. A. A. Análise dos riscos em projetos: Uma aplicação do Método de Monte Carlo em uma empresa do setor moveleiro. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**, 2018

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição, 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo2\\_V2.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo2_V2.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica: Regulamentação da Parcela Variável**. Brasília, 23 Mar. 2006. Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2005/043/apresentacao/aneel-ap\\_043-05.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2005/043/apresentacao/aneel-ap_043-05.pdf)>. Acesso em 23 jun. 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Homologatória nº 758, de 6 de janeiro de 2009.** Homologa as Metodologias para definição e atualização do Banco de Preços de Referência ANEEL a ser utilizado nos processos de autorização, licitação para outorga de concessão e revisão tarifária das concessionárias de transmissão de energia elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atreh2009758.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 729, de 28 de junho de 2016.** Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão integrantes da Rede Básica e das instalações de transmissão de energia elétrica destinadas a interligações internacionais que se conectam à Rede Básica, conforme Resolução Normativa nº 442, de 26 de julho de 2011, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2020.

ALEXANDRINO, J. L.; ZANCHETTIN, C.; CARVALHO FILHO, E. A hybrid intelligent system clonart for short and mid-term forecasting for the Brazilian Energy Distribution System. **IEEE International Joint Conference on Neural Networks**, 2008.

ALMEIDA, F. S. Uma contribuição ao estudo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas com base no Método de Monte Carlo. Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal De Minas Gerais, UFMG**. 2020.

ALON, N.; SPENCER, J. H. **The probabilistic method**. John Wiley & Sons, 2004.

ANDRADE, W. S. **Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição e Sub-Transmissão Considerando Geração Distribuída**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

ASHKEZARI, A. D. et al. Application of fuzzy support vector machine for determining the Health Index of insulation system of in-service power transformers. **IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation**, v.20, n. 3, p. 965-973, 2013.

ATTRI, R. et al. Analysis of barriers of total productive maintenance (TPM). **International Journal of System Assurance Engineering and Management**. Vol. 4, issue 4, Oct-Dec 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/257798580\\_Analysis\\_of\\_barriers\\_of\\_total\\_productive\\_maintenance\\_TPM](https://www.researchgate.net/publication/257798580_Analysis_of_barriers_of_total_productive_maintenance_TPM)>. Acesso em: 15 out. 2020. DOI: 10.1007/s13198-012-0122-9.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N.. **Reliability Evaluation of Engineering Systems - Concepts and Techniques**. New York and London: Plenum Press, 1992.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 4 edition ed. **Hoboken**, N.J: Wiley, 2008.

BHUSHAN, N.; RAI, K. Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process. London: **Springer**, 2004.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: MME/EPE, 2022.

CAMPELO, F. et al. Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives. **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol.10, ISS. 9. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7491548/>>. Acesso em: 25 jan. 2017. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.1112.

CARRARO, R. Desenvolvimento de um "Health Index" para Transformadores de Potência. [s.l.] **Universidade Federal de Santa Maria**, 2017.

CARAYANNIS, E. G. et al. MCDA in knowledge-based economies: Methodological developments and real world applications. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518301306>>.

CARMONA, D. et al. Electric energy demand forecasting with neural networks. **IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]**, v. 2, p. 1860–1865, 2002.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. **A CEEE: Transmissão**. 2020. Disponível em: <<https://www.ceee.com.br/a-ceee/transmissao>>. Acesso em 20 jan. 2020.

CERÓN, A. F. et al. Panorama de La Gestión de Activos para Transformadores de Potencia. **Información Tecnológica**. Vol. 26, n. 3, jun. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642015000300014](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642015000300014)>. Acesso em: 18 jun. 2020. DOI: 10.4067/S0718-07642015000300014.

CERRI, R. Redes neurais e algoritmos genéticos para problemas de classificação hierárquica multirrótulo. 2014. **USP**, São Carlos - SP, 2014.

Chelaru, E.; Grigoras, G. Decision Making Strategies to Establish the Replacement Priority of Transformers from Electric Distribution Substations. **International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)**. 2020a. DOI:10.1109/epe50722.2020.930562.

Chelaru, E.; Grigoras, G. Decision Support System to Determine the Replacement Ranking of the Aged Transformers in Electric Distribution Networks. **International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**. 2020b. DOI: 10.1109/ECAI50035.2020.9223122.

CIGRÈ - COMITÊ NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **GT A2.23 - Gerenciamento de Dados para Monitoramento e Avaliação da Condição Operativa de Transformadores**. Rio de Janeiro, BRA, mar. 2006.

CHEBERLE, L. A. D. **A vida útil das instalações no setor elétrico e sua influência na definição de tarifas de distribuição de energia no Brasil**. UnB, Brasília, 2013.

COSTA, C. E. **Elaboração de orçamento de vendas**. 1998. Disponível em <[www.administradores.com.br/informe-se/artigos/elaboracao-de-orcamentode-vendas/29869](http://www.administradores.com.br/informe-se/artigos/elaboracao-de-orcamentode-vendas/29869)>.

DEDE, G.; KAMALAKIS, T.; SPHICOPOULOS, T. Theoretical estimation of the probability of weight rank reversal in pairwise comparisons. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 252, n. 2, p. 587–600, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221716300029>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

EBELING, C. E. **An introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. Universidade de Michigan: McGraw Hill, 2001.

EDIGER, V., AKAR, S. (2007). ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in turkey. **Energy Policy**, 35(3), 1701-1708. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.05.009>.

ENERGY. **Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid**: Infrastructure Security and Energy Restoration Office of Electricity Delivery and Energy Reliability U.S. Department of Energy. Department of Energy. Apr. 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/LPTStudyUpdate-040914.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

FEIL, D. L. P. Substituição de Transformadores de Potência em Subestações de Energia: Uma Estratégia Global, **Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, 2019.

FELIPE, L. M.; LEISMANN, E. L. Análise de viabilidade em projetos: comparação entre os métodos determinísticos e probabilísticos. **Revista de Ciências Empresariais da UNIPAR**, Umuarama, v. 20, n. 1, p. 83-106, jan./jun. 2019.

FERNANDES, R. A. S. Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais. [s.l.] **USP**, 2009.

FERREIRA, L. N.; LAZO, M. J. Método de Monte Carlo Aplicado ao Cálculo Fracionário. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, 23, N. 2. 2022. DOI: 10.5540/tcam.2022.023.02.00243.

FISCHER, S. Series Univariantes de Tempo — Metodologia de Box & Jenkins. 1981. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1981.

GHODS, L.; KALANTAR, M. Different methods of long-term electric load demand forecasting; a comprehensive review. **Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 249–259, 2011.

GUO, Z.; LI, W.; LAU, A.; INGA-ROJAS, T.; WANG, K. Detecting X-Outliers in Load Curve Data in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 27, n. 2, p. 875–884, maio 2012.

GRABISCH, M.; LABREUCHE, C.; RIDAOUI, M. On importance indices in multicriteria decision making. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 277, n. 1, p. 269–283, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221719301833>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

GUIRELLI, C. R. Previsão da carga de curto prazo de áreas elétricas através de técnicas de inteligência artificial. 2006. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, 2006.

Hasan, R.; Viele, M.; Winters, W.; Allen, D. J. Optimization of Transformer Sparing and Replacement Strategies using Probabilistic Simulation. **IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)**. 2020. DOI: 10.1109/POWERCON48463.2020.9230536.

HAYKIN, S. Neural networks: a comprehensive foundation. [s.l.] **MacMillan Publishing Company**, 1994.

HAYKIN, S. S. Redes neurais - principios e prática. 2 edition ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2001.

Hu, J.; Xu, Y.; Wen, F.; Huang, G.; Chen, M. An Opportunity Cost Based Replacement Strategy for Transformers. **IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. 2021. DOI: 10.1109/EI252483.2021.9713438

IAM. **The Institute of Asset Management**. 2020. Disponível em: <<https://theiam.org/>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

IEEE. **C57.91**: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. **IEEE Standards Association**. Mar. 2012.

ISHIZAKA, A.; BALKENBORG, D.; KAPLAN, T. Influence of aggregation and measurement scale on ranking a compromise alternative in AHP. **Journal of the Operational Research Society**, [s. l.], v. 62, n. 4, p. 700–710, 2011. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/jors.2010.23>>. Acesso em: 14 jun. 2020.

JAHAN, A. et al. A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 411–420, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3366-7>>.

JAHROMI, A. N. et al. An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 25, n.2, mar./abr. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4802595/>>. Acesso em: 25 jun. 2020. DOI: 10.1109/MEI.2009.4802595.

KAINULAINEN, T. et al. A statistical approach to assessing interval scale preferences in discrete choice problems. **Journal of the Operational Research Society**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 252–258, 2009. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/palgrave.jors.2602554>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

KAYA, I.; ÇOLAK, M.; TERZI, F. **Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review**. International Journal of Energy Research. 2018. DOI: 10.1002/er.4016.

KERMANSHAHI, B. Recurrent neural network for forecasting next 10 years loads of nine Japanese utilities. **Neurocomputing**, v. 23, n. 1–3, p. 125–133, 1998.

KHOA, D.; PHUONG, L. M.; LIEN, H. Application of Wavelet and Neural Network to Long-Term Load Forecasting. n. November, p. 21–24, 2004.

MARQUES, J. B. V. et al. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. **Pro-Posições**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 389–415, 2018. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-73072018000200389&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-73072018000200389&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 5 abr. 2020.

MARTINS, M. A. G. Gestão da vida útil dos transformadores. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**. Vol. 21, n.º 3/4, Lisboa, jul. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-83122009000200002](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200002)>. Acesso em: 12 jan. 2020. ISSN 0870-8312.

MATHWORKS. **Matlab: Overview**. 2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 05 ago. 2020

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo Method. **Journal of the American Statistical Association**, 44, Set. 1949.

MORALES-TORRES, A. et al. Decision Support Tool for energy-efficient, sustainable and integrated urban stormwater management. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 84, p. 518–528, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216304248>>.

MORDECHAI, S. **Applications of Monte Carlo method in science and engineering**. London, 2011.

MOREIRA, M. O. Um Estudo de Caso para a Previsão de Carga de Médio e Longo Prazo Brasileira. Campinas, SP: **UNICAMP**, 2015.

MORI, H.; KURATA, E. Graphical Modeling for Selecting Input Variables of Short-term Load Forecasting. In: **Power Tech**, jul. 2007.

OKAMOTO, M. Previsão Decenal de Carga de Energia Elétrica Utilizando Inteligência Computacional. [s.l.] **UFRJ**, 2008

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Sistema Interligado Nacional. 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em 25 jun. 2020.

PALISADES. **RISK User's Guide: Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel**. Ithaca, NY: Palisade Software, 2013.

PAN, X.; LEE, B. A comparison of support vector machines and artificial neural networks for mid-term load forecasting. mar. 2012.

PAN, W. et al. Establishing and Weighting Decision Criteria for Building System Selection in Housing Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 138, n. 11, p. 1239–1250, 2012. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0000543>>.

PEIMANKAR, A. et al. Evolutionary multi-objective fault diagnosis of power transformers. **Swarm and Evolutionary Computation**, Corrected Proof in Press, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650216301699>>. Acesso em: 19 de maio de 2017.

PESSANHA, J. F. M. et al. Avaliação dos custos operacionais eficientes das empresas de transmissão do setor elétrico Brasileiro: uma proposta de adaptação do modelo DEA adotado pela ANEEL. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.30, n.3, set./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pope/v30n3/v30n3a02.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

PHIMPHACHANH, S. et al. Using Neural Network for Long Term Peak Load Forecasting in Vientiane Municipality. **Tencon 2004**, p. 319–322, 2004.

POWELL, C. The Delphi technique: myths and realities. **Journal of advanced nursing**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 376–82, 2003. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12581103>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

RENDER, B. et al. **Quantitative analysis for management**. São Paulo: Pearson, 2017.

RESENDE, L., SOARES, M., FERREIRA, P. Electric power load in Brazil: view on the long-term forecasting models. **Production**. 2018. DOI: 10.1590/0103-6513.170081.

RIGATOS, G.; SIANO, P. Power transformers' condition monitoring using neural modeling and the local statistical approach to fault diagnosis. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v.80, p. 150-159, 2016.

RIGO, P. D. Modelo de diagnóstico para projetos de micro e minigeração distribuída de energia fotovoltaica. 2019. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – **Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, RS, 2019.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 161–176, 1987.

SAATY, T. L. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 3. ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 2012.

SAGE, A. P.; SINGH, M. G. Concise encyclopedia of information processing in systems & organizations. [s.l.] **Pergamon Press**, 1990.

SCHIJNDEL, A.; WOUTERS, P. A. A. F.; WETZER J. M. Modeling of Replacement Alternatives for Power Transformer Populations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.27, n.2, p. 506-513, 2012.

SI, J. et al. Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 27, p. 106–115, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670716301238>>.

Silva, E. R.; Feil, D. L. P.; Bernardon, D. P.; Marchesan, T. B.; Ortiz, M. S.; Eisenkraemer, P. H.. Ranking of Priorities for the Management of Distribution Transformers: a Multicriterial Approach. **IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA)**. 2020. DOI:10.1109/tla47668.2020.932621.

SIQUEIRA, M. L. A demanda por energia elétrica no nordeste brasileiro após o racionamento de 2001-2002 : previsões de longo prazo \*. p. 137–178, 2010.

SOARES, S. R. Análise multicritério com instrumento de gestão ambiental. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2003. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/ecocon](http://www.elsevier.com/locate/ecocon)>. Acesso em: 12 jun. 2020.

TAKAHASHI, T.; OKAMOTO, T. Development of asset management support tools for oil-immersed transformer. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 2016. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005574.

TAYLOR, J. W. An evaluation of methods for very short-term load forecasting using minute-by-minute British data. **International Journal of Forecasting**, v. 24, n. 4, p. 645–658, 2008.

TAVARES, A. D.; GOMES, C. F. S. ISO 55000: A Evolução da Gestão de Ativos. **Business and Management Review**. v. 4, n. 8, Mar. 2015. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/274698990>>. Acesso em: 20 out. 2020. ISSN: 2047 – 0398.

TRAPPEY, A. J. C. et al. Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions. **Computers & Industrial Engineering**, v.84, p. 3-11, 2015.

VALIPOUR, M. Sprinkle and Trickle Irrigation System Design Using Tapered Pipes for Pressure Loss Adjusting. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 12, p. 125, 2012.

VALIPOUR, M.; BANIHABIB, M. E.; BEHBAHANI, S. M. R. Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 433–441, 2013.

VELLASCO, M. M. B. R. Redes Neurais Artificiais. Rio de Janeiro, Brasil, PUC, notas de Aula, Brasil, 2007. Disponível em: <<http://www.ica.ele.pucio.br/Downloads%5C33/ICA-introdu%C3%A7%C3%A3o%20RNs.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2020.

VIGLIONI, G. M. C.; CURY, M. V. Q.; DA SILVA, P. A. L. Comparação entre Redes Neurais e Técnicas Clássicas para Previsão de Demanda de Transporte Ferroviário. 2006.

WANG, J.-J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009.

WATTAKAPAIBOON, W.; PATTANADECH, N. **The new developed helth index for transformer condition assessment**. 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. **Anais...IEEE**, set. 2016 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7757760/>>. Acesso em: 04 de maio de 2020.

WENZLER, I. **Development of an Asset Management Strategy for a Network Utility Company: Lessons from a Dynamic Business Simulation Approach**. Simulation & Gaming, 2005.

WIDROW, B.; LEHR, M. A. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 9, p. 1415–1442, 1990.

YANG, W.; TIAN, C. Monte-Carlo simulation of information system project performance. **Systems Engineering Procedia**, 2012.

Yang, F.; Li, J.; Liu, S.; Chen, F. Lasso-GBDT-based Investment Forecasting for Distribution Transformer Replacement Projects. **IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)**. 2023. DOI: 10.1109/ICICACS57338.2023.10100179.

ZAMBON, R. C. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. **Revista USP**, São Paulo, n.104, jan./mar. 2015. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/106762/105400>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

ZHANG, P. Probabilistic methods used in environmental risk evaluation for groundwater protection. 2010. Faculty of Mathematics and Natural Sciences – **University of Oslo**, Oslo. Disponível em: <<https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/12317/Zhang-avhandling-publ.pdf?sequence>>. Acesso em: 13 mai. 2022.

ZARKOVIC, M.; STOJKOVIC, Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics. **Electric Power Systems Research**, v.149, p. 125-136, 2017.

ZEINODDINI-MEYMAND, H.; VAHIDI, B. Health Index calculation for power transformers using technical and economical parameters. **IET Science, Measurement & Technology**, v.10, n.7, p. 823-830, 2016.

ZHONG, J.; LI, W.; WANG, C. ; YU, J.; XU, R. Determining Optimal Inspection Intervals in Maintenance Considering Equipment Aging Failures. **IEEE Transactions on Power Systems**. 2016. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2580508.

ZYOUD, S. H.; FUCHS-HANUSCH, D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 78, p. 158–181, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417417300982>>. Acesso em: 13 jun. 2020

## **ANEXO A – Formulário submetido aos especialistas**

### **CRITÉRIOS PARA SUBSTITUIÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM SUBESTAÇÕES**

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, por intermédio do Prof. Dr. Tiago Marchesan e do doutorando Filipe Campanhola, vem à presença de Vossa Senhoria apresentar o Projeto de Pesquisa que trata da substituição de transformadores em subestações.

O objetivo deste formulário é auxiliar no desenvolvimento de uma metodologia para substituição de transformadores de subestações com mais de 35 anos em operação, considerando a resolução nº 443/2011, alterada pela resolução nº 643/2014, que estabelece que a concessionária de transmissão deverá encaminhar à ANEEL, ao ONS, à EPE e ao MME a relação dos equipamentos que necessitam substituição.

Assim, gostaríamos de contar com seu apoio respondendo o presente questionário. Solicitamos, por fim, que seja autorizado o uso acadêmico dos dados obtidos, reiterando que, após a conclusão desta pesquisa, serão disponibilizados os resultados em produção acadêmica.

Este formulário está organizado em 3 etapas, sendo:

Etapa 1: Ponderação da importância dos critérios;

Etapa 2: Ponderação da importância dos indicadores de cada critério;

Etapa 3 (não obrigatória): Observações referentes ao questionário.

Os valores de importância devem seguir a seguinte escala:

1 - Igualmente importantes;

3 - Pouco mais importante;

5 – Mais importante;

7 – Muito mais importante;

9 – Extremamente mais importante;

2, 4, 6, 8 – Valores intermediários.

Exemplo de preenchimento: Quando avaliada a aquisição de um veículo, o

que é mais importante e qual seu grau de importância?

CONFORTO

SEGURANÇA

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (X) (8) (9)

Resposta: Segurança é muito mais importante que conforto, nesta avaliação.

Os dados de identificação do respondente serão mantidos em sigilo, sendo usados apenas para organização da pesquisa. Os dados coletados nos formulários das etapas 1, 2 e 3 serão utilizados para fins de acadêmicos, de pesquisa e desenvolvimento. Você AUTORIZA a utilização desses dados?

SIM

### Dados de Identificação

Nome:

E-mail:

Formação Acadêmica:

Empresa/Instituição:

Cargo:

Cidade/Estado:



**ETAPA 1:**

Nesta etapa será avaliada a relação de importância entre os seguintes critérios:

**VIDA ÚTIL:** engloba a vida remanescente estimada do equipamento e o fator de envelhecimento equivalente causado pelo seu carregamento;

**CARREGAMENTO:** considera o carregamento médio a que o transformador de potência está submetido;

**IMPACTO NO SISTEMA:** envolve os fatores de frequência de duração da perda de carga no sistema, índice de severidade do transformador para o sistema e energia não suprida ao sistema;

**FINANCEIRO:** engloba as perdas financeiras, como as multas por parcela variável, custos de manutenção e substituição de equipamentos.

Assinale qual critério possui maior importância e seu grau de importância em relação ao seu par:

**VIDA ÚTIL e CARREGAMENTO**

( ) VIDA ÚTIL

( ) CARREGAMENTO

1   2   3   4   5   6   7   8   9

Igualmente importantes          Extremamente mais importante

**VIDA ÚTIL e IMPACTO NO SISTEMA**

( ) VIDA ÚTIL

( ) IMPACTO NO SISTEMA

1   2   3   4   5   6   7   8   9

Igualmente importantes          Extremamente mais importante

**VIDA ÚTIL e IMPACTO FINANCEIRO**

( ) VIDA ÚTIL

( ) IMPACTO FINANCEIRO

1   2   3   4   5   6   7   8   9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

### CARREGAMENTO e IMPACTO NO SISTEMA

( ) CARREGAMENTO

( ) IMPACTO NO SISTEMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

### CARREGAMENTO e IMPACTO FINANCEIRO

( ) CARREGAMENTO

( ) IMPACTO FINANCEIRO

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

### IMPACTO NO SISTEMA e IMPACTO FINANCEIRO

( ) IMPACTO NO SISTEMA

( ) IMPACTO FINANCEIRO

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

**ETAPA 2:**

Nesta etapa será avaliada a relação de importância entre os seguintes indicadores:

HI: Health Index é um índice da condição geral de operação de um transformador;

FEQA: Fator de envelhecimento equivalente é o envelhecimento normal a que está sendo submetido o transformador devido ao seu carregamento;

LOLD: duração média da perda de carga de um transformador;

LOLF: frequência da perda de carga de um transformador;

EENS: valor esperado na energia não suprida pelo sistema em um período;

IS: duração equivalente da perda total de carga do sistema em condições de pico de carga;

PV: custos anuais com desconto por Parcela Variável de cada transformador;

MANUTENÇÃO: custos anuais de manutenção por transformador;

SUBSTITUIÇÃO: custo de substituição de um transformador.

Assinale qual critério possui maior importância e seu grau de importância em relação ao seu par:

Quanto a vida útil

( ) HI

( ) FEQA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Igualmente importantes	<input type="radio"/>	Extremamente mais importante							

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) LOLD

( ) LOLF

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Igualmente importantes	<input type="radio"/>	Extremamente mais importante							

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) LOLD

( ) EENS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) LOLD

( ) IS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) LOLF

( ) EENS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) LOLF

( ) IS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

Quanto ao Impacto ao Sistema

( ) EENS

( ) IS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Igualmente importantes

Extremamente  
mais importante

Quanto ao Impacto Financeiro

( ) PV

( ) Manutenção

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Igualmente importantes	<input type="radio"/>	Extremamente mais importante								

Quanto ao Impacto Financeiro

( ) PV

( ) Substituição

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Igualmente importantes	<input type="radio"/>	Extremamente mais importante								

Quanto ao Impacto Financeiro

( ) Manutenção

( ) Substituição

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Igualmente importantes	<input type="radio"/>	Extremamente mais importante								

**ETAPA 3:**

Nesta etapa serão ouvidas as opiniões dos especialistas referentes ao questionário aplicado.

Na sua opinião, quais critérios deveriam ser avaliados para complementar a tomada de decisão na substituição de transformadores e quais suas implicações nos resultados?

---

Qual a importância desses parâmetros no auxílio a tomada de decisão sobre a substituição de transformadores de potência em subestações?

---

Em nome da Universidade Federal de Santa Maria, agradecemos a colaboração com essa pesquisa!



## ANEXO B – Respostas dos Especialistas quanto aos Critérios

Especialista 1:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,17	0,13	7,00
Carregamento	6,00	1,00	0,14	0,11
Impacto no Sistema	8,00	7,00	1,00	5,00
Impacto Financeiro	0,14	9,00	0,20	1,00

Especialista 2:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,20	0,20	0,14
Carregamento	5,00	1,00	0,14	0,13
Impacto no Sistema	5,00	7,00	1,00	6,00
Impacto Financeiro	7,00	8,00	0,17	1,00

Especialista 3:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,14	0,17
Carregamento	0,14	1,00	0,13	0,14
Impacto no Sistema	7,00	8,00	1,00	8,00
Impacto Financeiro	6,00	7,00	0,13	1,00

Especialista 4:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	2,00	3,00	5,00
Carregamento	0,50	1,00	6,00	3,00
Impacto no Sistema	0,33	0,17	1,00	5,00
Impacto Financeiro	0,20	0,33	0,20	1,00

Especialista 5:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,13	7,00
Carregamento	0,14	1,00	0,13	0,14
Impacto no Sistema	8,00	8,00	1,00	8,00
Impacto Financeiro	0,14	7,00	0,13	1,00

Especialista 6:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	5,00	0,33	3,00
Carregamento	0,20	1,00	0,14	0,25
Impacto no Sistema	3,00	7,00	1,00	4,00
Impacto Financeiro	0,33	4,00	0,25	1,00

Especialista 7:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,33	0,33
Carregamento	0,14	1,00	0,14	0,14
Impacto no Sistema	3,00	7,00	1,00	0,17
Impacto Financeiro	3,00	7,00	6,00	1,00

Especialista 8:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	6,00	7,00	7,00
Carregamento	0,17	1,00	7,00	0,17
Impacto no Sistema	0,14	0,14	1,00	6,00
Impacto Financeiro	0,14	6,00	0,17	1,00

Especialista 9:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,17	0,17	0,17
Carregamento	6,00	1,00	0,17	0,17
Impacto no Sistema	6,00	6,00	1,00	0,17
Impacto Financeiro	6,00	6,00	6,00	1,00

Especialista 10:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,14	0,14	5,00
Carregamento	7,00	1,00	0,14	8,00
Impacto no Sistema	7,00	7,00	1,00	6,00
Impacto Financeiro	0,20	0,13	0,17	1,00

Especialista 11:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	5,00	0,14	0,14
Carregamento	0,20	1,00	0,11	0,11
Impacto no Sistema	7,00	9,00	1,00	4,00
Impacto Financeiro	7,00	9,00	0,25	1,00

Especialista 12:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,20	0,17
Carregamento	0,14	1,00	0,17	0,20
Impacto no Sistema	5,00	6,00	1,00	7,00
Impacto Financeiro	6,00	5,00	0,14	1,00

Especialista 13:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	8,00	0,11	0,13
Carregamento	0,13	1,00	0,11	0,11
Impacto no Sistema	9,00	9,00	1,00	7,00
Impacto Financeiro	8,00	9,00	0,14	1,00

Especialista 14:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,14	0,14
Carregamento	0,14	1,00	0,14	0,14
Impacto no Sistema	7,00	7,00	1,00	9,00
Impacto Financeiro	7,00	7,00	0,11	1,00

Especialista 15:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	9,00	9,00	9,00
Carregamento	0,11	1,00	9,00	9,00
Impacto no Sistema	0,11	0,11	1,00	9,00
Impacto Financeiro	0,11	0,11	0,11	1,00

Especialista 16:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,14	0,17
Carregamento	0,14	1,00	0,14	0,14
Impacto no Sistema	7,00	7,00	1,00	6,00
Impacto Financeiro	6,00	7,00	0,17	1,00

Especialista 17:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	3,00	5,00	5,00
Carregamento	0,33	1,00	3,00	3,00
Impacto no Sistema	0,20	0,33	1,00	1,00
Impacto Financeiro	0,20	0,33	1,00	1,00

Especialista 18:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	7,00	0,11	0,14
Carregamento	0,14	1,00	0,14	0,13
Impacto no Sistema	9,00	7,00	1,00	9,00
Impacto Financeiro	7,00	8,00	0,11	1,00

Especialista 19:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,20	5,00	5,00
Carregamento	5,00	1,00	0,20	5,00
Impacto no Sistema	0,20	5,00	1,00	7,00
Impacto Financeiro	0,20	0,20	0,14	1,00

Especialista 20:

IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS				
	Vida Útil	Carregamento	Impacto no Sistema	Impacto Financeiro
Vida Útil	1,00	0,11	0,11	0,11
Carregamento	9,00	1,00	0,11	0,11
Impacto no Sistema	9,00	9,00	1,00	5,00
Impacto Financeiro	9,00	9,00	0,20	1,00

Especialista 21:

<b>IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS</b>				
	<b>Vida Útil</b>	<b>Carregamento</b>	<b>Impacto no Sistema</b>	<b>Impacto Financeiro</b>
<b>Vida Útil</b>	1,00	2,00	0,25	0,33
<b>Carregamento</b>	0,50	1,00	0,20	0,25
<b>Impacto no Sistema</b>	4,00	5,00	1,00	2,00
<b>Impacto Financeiro</b>	3,00	4,00	0,50	1,00

## ANEXO C – Respostas dos Especialistas quanto a Vida Útil

Especialista 1:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	0,50
FEQA	2,00	1,00

Especialista 2:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 3:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	5,00
FEQA	0,20	1,00

Especialista 4:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	8,00
FEQA	0,13	1,00

Especialista 5:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 6:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	0,33
FEQA	3,00	1,00

Especialista 7:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	8,00
FEQA	0,13	1,00

Especialista 8:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	0,17
FEQA	6,00	1,00

Especialista 9:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	5,00
FEQA	0,20	1,00

Especialista 10:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 11:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	4,00
FEQA	0,25	1,00

Especialista 12:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 13:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	9,00
FEQA	0,11	1,00

Especialista 14:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	8,00
FEQA	0,13	1,00

Especialista 15:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	8,00
FEQA	0,13	1,00

Especialista 16:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 17:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	3,00
FEQA	0,33	1,00

Especialista 18:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	0,20
FEQA	5,00	1,00

Especialista 19:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	5,00
FEQA	0,20	1,00

Especialista 20:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	7,00
FEQA	0,14	1,00

Especialista 21:

VIDA ÚTIL		
	HI	FEQA
HI	1,00	9,00
FEQA	0,11	1,00

## ANEXO D – Respostas dos Especialistas quanto ao Impacto no Sistema

Especialista 1:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	8,00	6,00	8,00
LOLF	0,13	1,00	6,00	7,00
EENS	0,17	0,17	1,00	0,13
IS	0,13	0,14	8,00	1,00

Especialista 2:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	8,00	0,13	8,00
LOLF	0,13	1,00	0,13	0,14
EENS	8,00	8,00	1,00	8,00
IS	0,13	7,00	0,13	1,00

Especialista 3:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	1,00	1,00	0,33
LOLF	1,00	1,00	3,00	5,00
EENS	1,00	0,33	1,00	4,00
IS	3,00	0,20	0,25	1,00

Especialista 4:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,14	8,00	0,17
LOLF	7,00	1,00	6,00	0,20
EENS	0,13	0,17	1,00	0,17
IS	6,00	5,00	6,00	1,00

Especialista 5:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	6,00	6,00	7,00
LOLF	0,17	1,00	0,14	0,17
EENS	0,17	7,00	1,00	0,14
IS	0,14	6,00	7,00	1,00

Especialista 6:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	1,00	0,20	0,20
LOLF	1,00	1,00	0,20	0,20
EENS	5,00	5,00	1,00	0,33
IS	5,00	5,00	3,00	1,00

Especialista 7:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	6,00	0,17	7,00
LOLF	0,17	1,00	0,17	0,14
EENS	6,00	6,00	1,00	7,00
IS	0,14	7,00	0,14	1,00

Especialista 8:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	5,00	0,17	0,14
LOLF	0,20	1,00	0,17	0,17
EENS	6,00	6,00	1,00	6,00
IS	7,00	6,00	0,17	1,00

Especialista 9:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	6,00	0,17	0,17
LOLF	0,17	1,00	0,20	0,17
EENS	6,00	5,00	1,00	6,00
IS	6,00	6,00	0,17	1,00

Especialista 10:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	8,00	0,13	8,00
LOLF	0,13	1,00	3,00	0,25
EENS	8,00	0,33	1,00	5,00
IS	0,13	4,00	0,20	1,00

Especialista 11:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,20	0,25	3,00
LOLF	5,00	1,00	0,33	5,00
EENS	4,00	3,00	1,00	4,00
IS	0,33	0,20	0,25	1,00

Especialista 12:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	7,00	0,14	0,20
LOLF	0,14	1,00	0,14	0,17
EENS	7,00	7,00	1,00	7,00
IS	5,00	6,00	0,14	1,00

Especialista 13:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,13	8,00	0,11
LOLF	8,00	1,00	7,00	0,11
EENS	0,13	0,14	1,00	0,11
IS	9,00	9,00	9,00	1,00

Especialista 14:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	4,00	4,00	0,20
LOLF	0,25	1,00	1,00	0,20
EENS	0,25	1,00	1,00	0,17
IS	5,00	5,00	6,00	1,00

Especialista 15:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,11	9,00	0,11
LOLF	9,00	1,00	8,00	8,00
EENS	0,11	0,13	1,00	0,13
IS	9,00	0,13	8,00	1,00

Especialista 16:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	7,00	0,17	0,17
LOLF	0,14	1,00	0,14	0,14
EENS	6,00	7,00	1,00	0,14
IS	6,00	7,00	7,00	1,00

Especialista 17:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,33	3,00	0,33
LOLF	3,00	1,00	5,00	0,33
EENS	0,33	0,20	1,00	0,33
IS	3,00	3,00	3,00	1,00

Especialista 18:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	5,00	0,14	0,14
LOLF	0,20	1,00	0,11	0,14
EENS	7,00	9,00	1,00	7,00
IS	7,00	7,00	0,14	1,00

Especialista 19:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	6,00	5,00	0,20
LOLF	0,17	1,00	0,20	0,20
EENS	0,20	5,00	1,00	7,00
IS	5,00	5,00	0,14	1,00

Especialista 20:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	0,13	8,00	0,13
LOLF	8,00	1,00	9,00	0,11
EENS	0,13	0,11	1,00	0,13
IS	8,00	9,00	8,00	1,00

Especialista 21:

IMPACTO NO SISTEMA				
	LOLD	LOLF	EENS	IS
LOLD	1,00	5,00	0,33	5,00
LOLF	0,20	1,00	0,20	3,00
EENS	3,00	5,00	1,00	5,00
IS	0,20	0,33	0,20	1,00

## ANEXO E – Respostas dos Especialistas quanto ao Impacto Financeiro

Especialista 1:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	7,00	7,00
Manutenção	0,14	1,00	0,13
Substituição	0,14	8,00	1,00

Especialista 2:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	9,00	9,00
Manutenção	0,11	1,00	0,13
Substituição	0,11	8,00	1,00

Especialista 3:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	5,00	0,14
Manutenção	0,20	1,00	0,14
Substituição	7,00	7,00	1,00

Especialista 4:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	6,00	6,00
Manutenção	0,17	1,00	6,00
Substituição	0,17	0,17	1,00

Especialista 5:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	7,00	0,14
Manutenção	0,14	1,00	0,14
Substituição	7,00	7,00	1,00

Especialista 6:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	3,00	5,00
Manutenção	0,33	1,00	4,00
Substituição	0,20	0,25	1,00

Especialista 7:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	8,00	8,00
Manutenção	0,13	1,00	7,00
Substituição	0,13	0,14	1,00

Especialista 8:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	0,17	6,00
Manutenção	6,00	1,00	0,20
Substituição	0,17	5,00	1,00

Especialista 9:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	0,17	5,00
Manutenção	6,00	1,00	5,00
Substituição	0,20	0,20	1,00

Especialista 10:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	0,14	0,33
Manutenção	7,00	1,00	0,14
Substituição	3,00	7,00	1,00

Especialista 11:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	7,00	6,00
Manutenção	0,14	1,00	0,50
Substituição	0,17	2,00	1,00

Especialista 12:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	0,14	7,00
Manutenção	7,00	1,00	7,00
Substituição	0,14	0,14	1,00

Especialista 13:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	8,00	0,11
Manutenção	0,13	1,00	0,11
Substituição	9,00	9,00	1,00

Especialista 14:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	1,00	1,00
Manutenção	1,00	1,00	1,00
Substituição	1,00	1,00	1,00

Especialista 15:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	8,00	0,14
Manutenção	0,13	1,00	0,14
Substituição	7,00	7,00	1,00

Especialista 16:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	6,00	0,14
Manutenção	0,17	1,00	0,14
Substituição	7,00	7,00	1,00

Especialista 17:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	3,00	3,00
Manutenção	0,33	1,00	0,33
Substituição	0,33	3,00	1,00

Especialista 18:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	5,00	5,00
Manutenção	0,20	1,00	0,14
Substituição	0,20	7,00	1,00

Especialista 19:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	7,00	0,20
Manutenção	0,14	1,00	0,17
Substituição	5,00	6,00	1,00

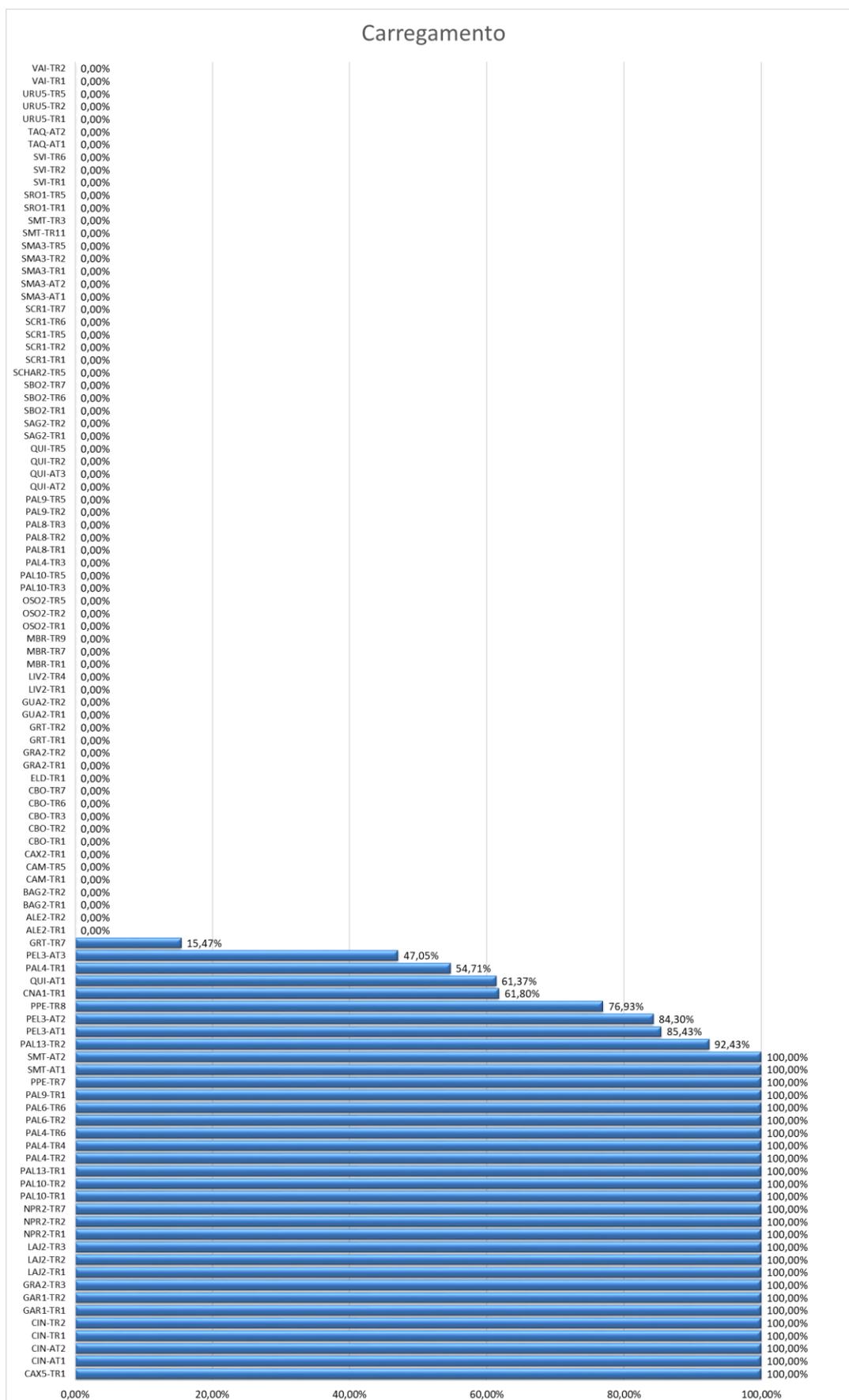
Especialista 20:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	9,00	9,00
Manutenção	0,11	1,00	1,00
Substituição	0,11	1,00	1,00

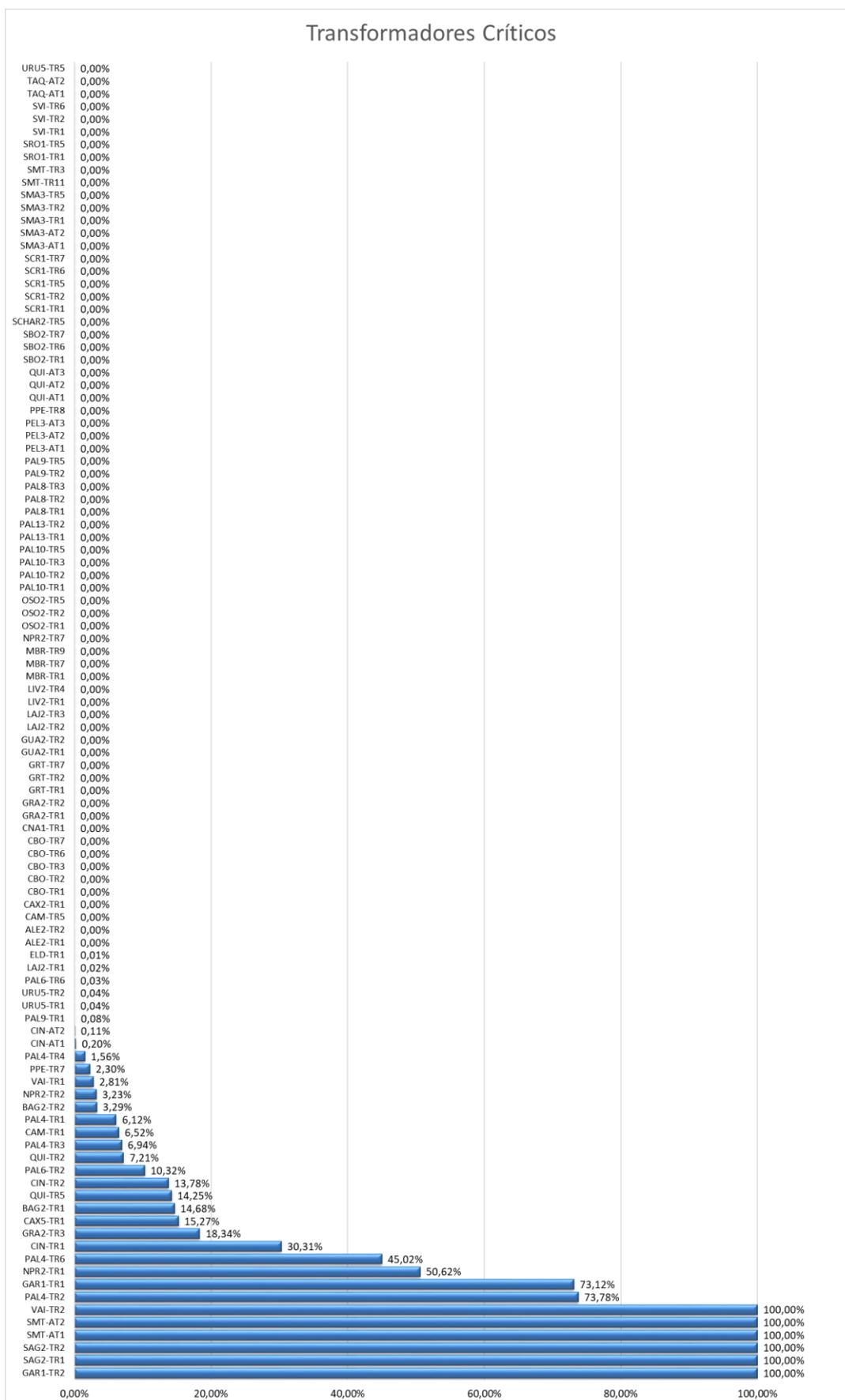
Especialista 21:

IMPACTO FINANCEIRO			
	PV	Manutenção	Substituição
PV	1,00	0,20	0,20
Manutenção	5,00	1,00	0,20
Substituição	5,00	5,00	1,00

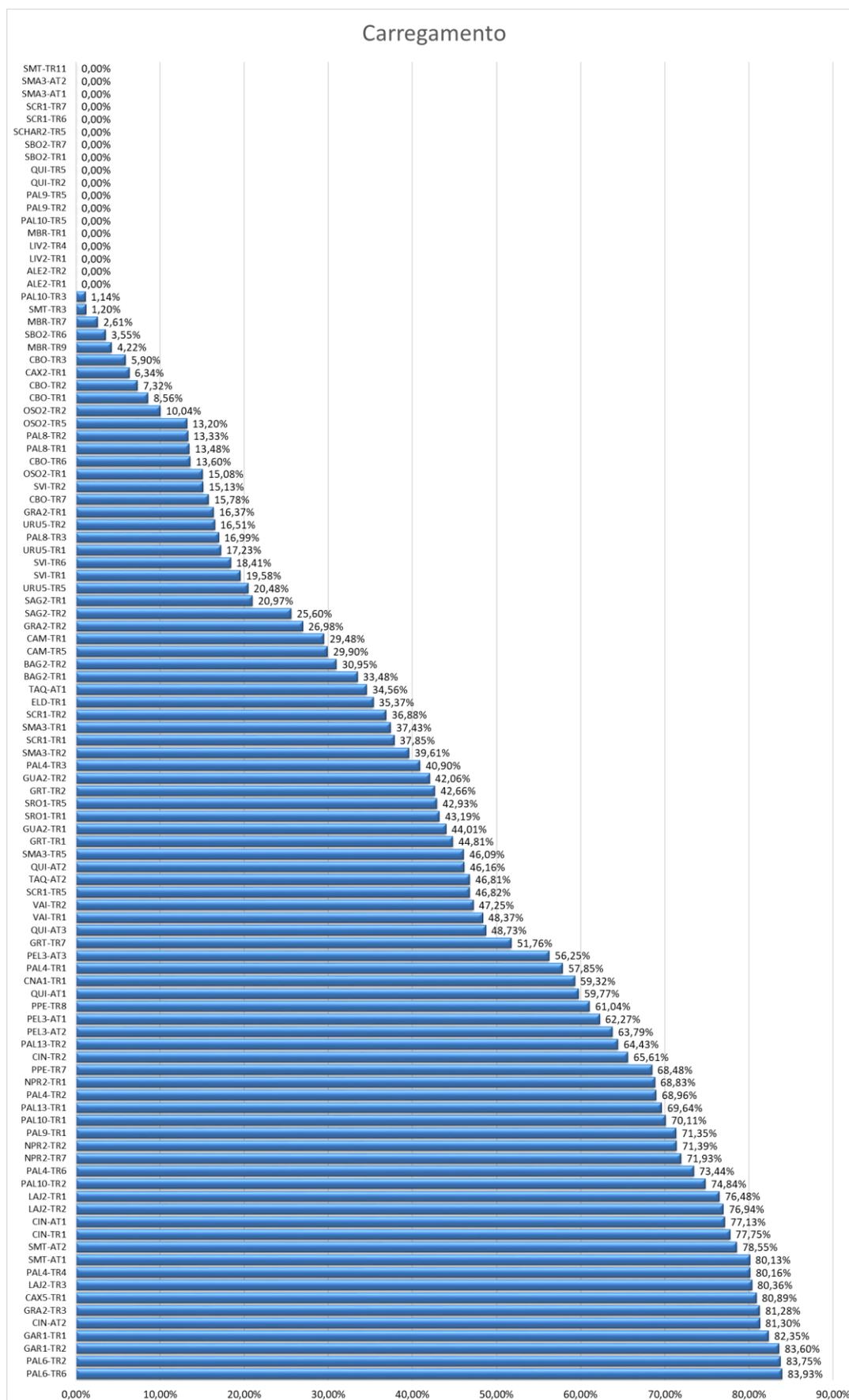
## ANEXO F – Cenário 01: Resultados Simulados de Carregamento



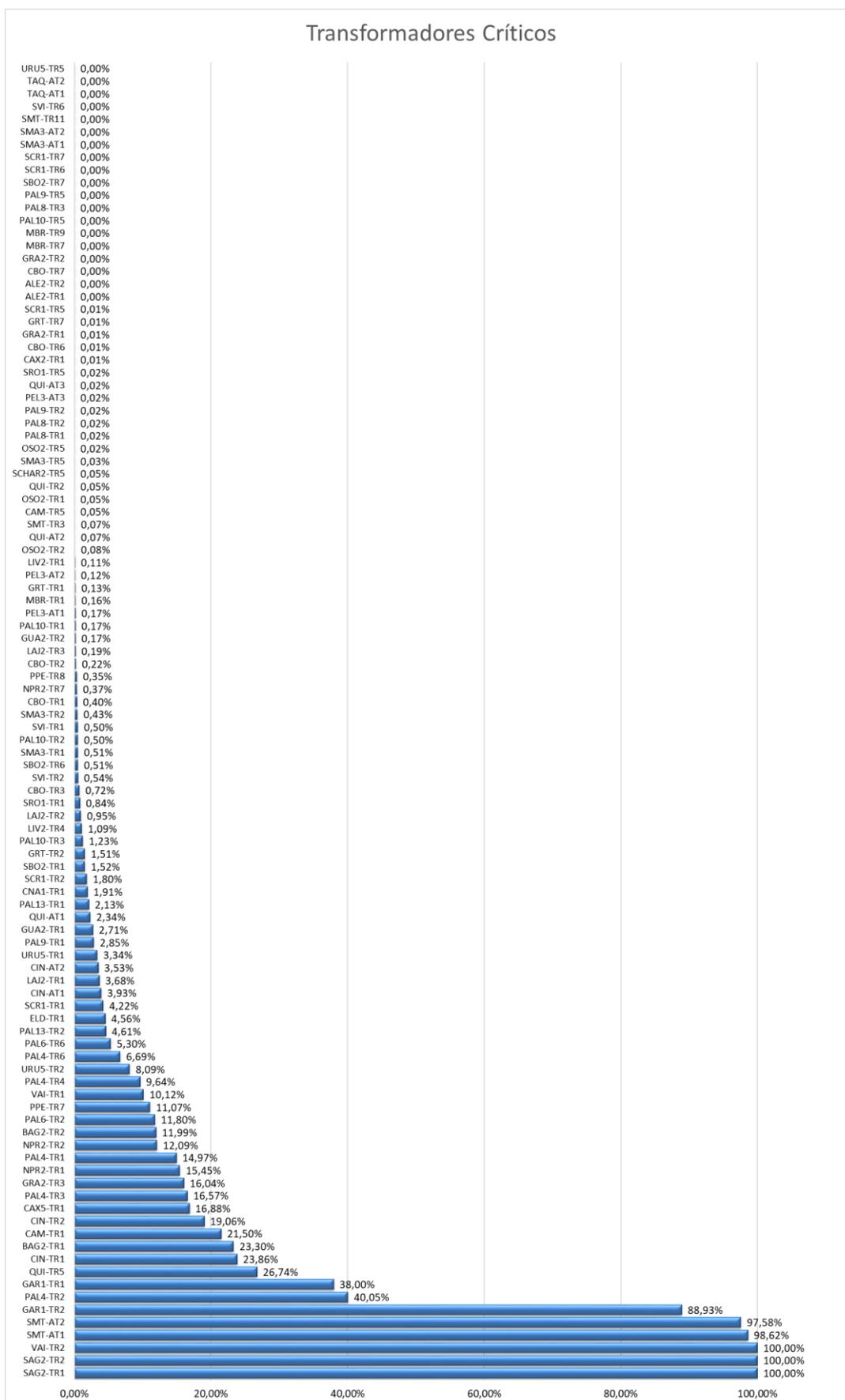
## ANEXO G – Cenário 01: Resultados para Equipamentos Críticos



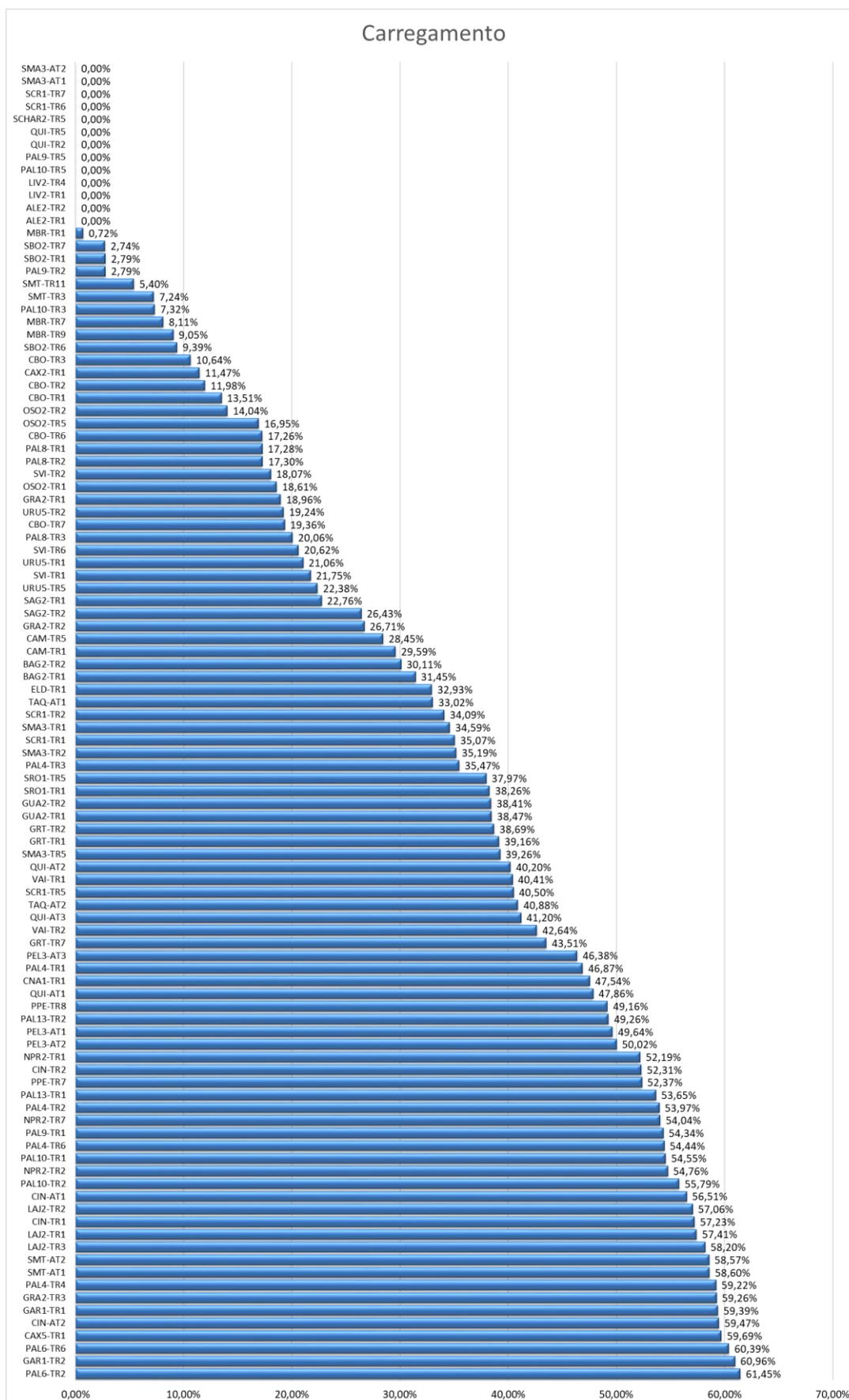
## ANEXO H – Cenário 02: Resultados Simulados de Carregamento



## ANEXO I – Cenário 02: Resultados para Equipamentos Críticos



## ANEXO J – Cenário 03: Resultados Simulados de Carregamento



## ANEXO K – Cenário 03: Resultados para Equipamentos Críticos

