

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

Éderson Possobom Pereira

**INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL PARA
PRIORIZAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO
ÁCIDO VENTILADA EM SUBESTAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Santa Maria, RS

2021

Éderson Possobom Pereira

**INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL PARA PRIORIZAÇÃO E
SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO VENTILADA EM
SUBESTAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS, Brasil

2021

Pereira, Éderson Possobom
INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL PARA PRIORIZAÇÃO
E SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO VENTILADA EM
SUBESTAÇÃO / Éderson Possobom Pereira.- 2021.
78 p.; 30 cm

Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Subestação 2. Bateria de Chumbo Ácido Ventilada 3.
Banco de Baterias 4. Manutenção I. Abaide, Alzenira da
Rosa II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. 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.

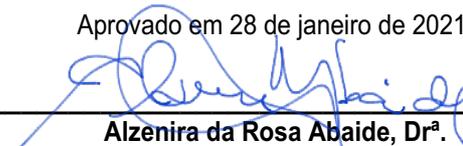
Declaro, ÉDERSON POSSOBOM PEREIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, 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.

Éderson Possobom Pereira

**INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL PARA
PRIORIZAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO
ÁCIDO VENTILADA EM SUBESTAÇÃO**

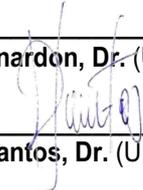
Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 28 de janeiro de 2021.



Alzenira da Rosa Abaide, Dr^a.
(Presidente/Orientadora) - Videoconferência

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM) - Videoconferência



Moises Machado Santos, Dr. (UNIJUÍ) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

À minha esposa Denise e filhos Júlia, Filipe
e Murilo...

AGRADECIMENTOS

A finalização deste trabalho deve-se ao auxílio, compreensão e dedicação de algumas pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo. E de uma maneira especial, agradeço:

- À minha linda esposa e filhos por estarem sempre em minha companhia;
- Aos sogros Roberto e Sandra pela hospedagem oferecida em Santa Maria/RS durante o período de aulas na universidade;
- Ao Msc. Eng.º Luciano Favretto da Rocha pela disposição de tempo na solução de dúvidas que foram surgindo durante a elaboração desta dissertação. E também a disponibilização das informações técnicas dos bancos de baterias;
- À Dr.^a Eng.^a Alzenira da Rosa Abaide pela ajuda no entendimento de muitos conceitos relacionados aos métodos multicritérios e pela orientação nesta dissertação.

A vida é como uma bola de neve. O importante é encontrar neve molhada e uma colina muito longa. (Warren Buffet)

RESUMO

Dissertação de mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL PARA PRIORIZAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO VENTILADA EM SUBESTAÇÃO

AUTOR: ÉDERSON POSSOBOM PEREIRA
ORIENTADORA: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Local e Data da defesa: Santa Maria, 28 de janeiro de 2021.

Esta dissertação apresenta uma metodologia para a classificação e indicação de substituição de bateria de chumbo ácido ventilada usada em subestações através da utilização do indicador de fragilidade operacional composta por dois critérios: situação de equipamento e situação operacional. Este indicador permite o reconhecimento de qual bateria tem prioridade de substituição em um conjunto de subestações. O critério situação de equipamento tem a formação da capacidade de descarga, condutância, tempo de operação e queda de tensão terminal. Enquanto o critério situação operacional representa a característica da subestação como potência transformada, existência de bateria e gerador diesel reserva. Os critérios que foram escolhidos para a tomada de decisão são divididos em dois grupos: Critério Situação de Equipamento (CSE) e Critério Situação Operacional (CSO). O CSE apresenta as características elétricas do banco de baterias enquanto o CSO apresenta a condição do equipamento com relação a localização e equipamentos reservas. Os métodos de análise multicriterial AHP e PROMETHEE foram usados neste trabalho. O primeiro na definição dos pesos dos critérios, e o segundo para obtenção do IFO. O indicador de fragilidade operacional tem uma importante aplicação no planejamento de manutenção corretiva da concessionária de energia elétrica. A metodologia é comprovada em um estudo de caso abrangendo 25 bancos de baterias instaladas em 18 subestações de uma transmissora de energia brasileira.

Palavras-chave: Subestação. Bateria de Chumbo Ácido Ventilada. Banco de Baterias. Manutenção.

ABSTRACT

Masters Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

OPERATIONAL FRAGILITY INDICATOR FOR PRIORIZATION AND REPLACEMENT OF VENTILATED ACID LEAD BATTERIES IN SUBSTATION

AUTHOR: ÉDERSON POSSOBOM PEREIRA
ADVISOR: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Place and Date: Santa Maria, January 28th, 2021.

This dissertation presents a methodology for the classification and indication of replacement of ventilated lead acid batteries used in substations through the use of the operational fragility indicator composed of two criteria: equipment situation and operational situation. This indicator allows the recognition of which battery has replacement priority in a set of substations. The equipment situation criterion has the formation of the discharge capacity, conductance, operating time and terminal voltage drop. While the operational situation criterion represents the substation's characteristic as transformed power, existence of battery and backup diesel generator. The criteria that were chosen for decision making are divided into two groups: Equipment Situation Criterion (ESC) and Operational Situation Criterion (OSC). The ESC presents the electrical characteristics of the battery bank while the OSC presents the condition of the equipment with respect to location and backup equipment. The multicriterial analysis methods AHP and PROMETHEE were used in this work. The first to define the weights of the criteria, and the second to obtain the OFI. The operational fragility indicator has an important application in the corrective maintenance planning of the electric utility. The methodology is proven in a case study covering 25 battery banks installed in 18 substations of a Brazilian energy transmitter.

Keywords: Substation. Ventilated Lead Acid Battery. Battery Bank. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Estrutura hierárquica do problema de tomadas de decisão com AHP ..	30
Figura 3.2 - Função de preferência	35
Figura 3.3 – Tipos de critérios generalizados ($P(d)$:funções de preferência).....	37
Figura 3.4 - Gráfico <i>Outranking</i> valorizados.....	39
Figura 4.1 - Organização dos critérios	42
Figura 4.2 - Tensão de descarga de banco de baterias.....	45
Figura 4.3 - Medidor de condutância Midtronics	48
Figura 4.4 - Condutância (% do VRC) versus ciclos	49
Figura 4.5 - Capacidade nominal versus ciclos.....	49
Figura 4.6 - Curva indicadora do ciclo de vida	51
Figura 5.1 - Mapa de concessão da CEEE-GT	57
Figura 5.2 - Histograma IFO.....	61
Figura 5.3 - Contribuição individual dos critérios do BAT13 no fluxo Phi do IFO.....	62
Figura 5.4 - Contribuição individual dos critérios do BAT16 no fluxo Phi do IFO.....	63
Figura 5.5 - Contribuição individual dos critérios do BAT20 no fluxo Phi do IFO.....	64
Figura 5.6 - Contribuição individual dos critérios do BAT5 no fluxo Phi do IFO.....	65
Figura 5.7 - Contribuição individual dos critérios do BAT6 no fluxo Phi do IFO.....	65
Figura A.1 - Célula bateria de chumbo ácido ventilada.....	73
Figura A.2- Banco de baterias de chumbo ácido composto de 60 elementos	74
Figura A.3 -Efeito da temperatura na vida útil de bateria de chumbo acido.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Pesos dos critérios	53
Tabela 5.1 - Dados dos bancos de baterias e subestações.....	58
Tabela 5.2 - Critérios do estudo de caso.....	59
Tabela 5.3 - Classificação de banco de baterias.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1- Escala de comparação de critérios	31
Quadro 3.2- Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n.....	33
Quadro 3.3- Importância relativa de pesos	34
Quadro 4.1 - Fator de correção de temperatura (K_T)	46
Quadro 4.2 - Funções de preferência.....	54
Quadro A.1-Capacidade de uma bateria típica de chumbo ácido.....	76
Quadro A.2 - Efeito da temperatura na capacidade da bateria	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADMC	Análise de Decisão Multicritério
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEEE-GT	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
ELECTRE	Elimination Et Choix Tradistian La Realité
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Assistance
GE	Gravidade Específica
IBR	Índice de Bateria Reserva
IC	Índice de Consistência
ICD	Índice de Capacidade de Descarga
ICT	Índice de Condutância
ICV	Índice de Ciclo de Vida
IFO	Indicador de Fragilidade Operacional
IGR	Índice de Gerador Diesel Reserva
IPT	Índice de Potência Transformada
IQT	Índice de Queda de Tensão
IR	Índice Randômico
ONS	Operador Nacional do Sistema
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
PV	Parcela Variável
RC	Razão de Consistência
SE	Subestação
SE	Situação de Equipamento
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO	Situação Operacional
TCA	Tensão de Circuito Aberto
TD	Tomador de Decisão

VRC

Valor de Referência para Condutância

LISTA DE SÍMBOLOS

Ah	Ampère hora
A	Âmpère
λ	Auto valor de matriz
BAT _i	Bancos de baterias que compõem o conjunto de alternativas
S_i	Condutância do elemento i
g_j	Critério genérico
K _t	Fator de correção para temperatura da célula antes do início do teste de descarga
ϕ	Fluxo líquido
ϕ^-	Fluxo <i>Outranking</i> negativo
ϕ^+	Fluxo <i>Outranking</i> positivo
°C	Grau Célsius
π	Grau de preferência
Hz	Hertz
H	Horas
kV	Kilovolt
q	Limiar de indiferença
p	Limiar de preferência estrita
P	Limites de preferência
A	Matriz de julgamento
$\min S_i$	Mínima condutância encontrada em banco de baterias específico
n	Número de alternativas ou atributos
ω	Peso
a_{ij}	Peso na comparação de A_i com A_j
PU	Por Unidade
\forall	Qualquer
λ	Taxa de falhas
t_s	Tempo em minutos especificado pelo fabricante para obtenção do valor mínimo de tensão terminal da célula
t_a	Tempo em minutos para obtenção do valor mínimo de tensão terminal da célula
V_i	Tensão terminal da célula i .

S	Unidade de condutância
d_j	Valor de alternativa para critérios genéricos
S	Valor intermediário entre p e q
V	Volt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	20
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivo geral	21
1.2.2. Objetivos específicos	21
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (ADMC)	26
2.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	28
3. TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO	29
3.1. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)	29
3.2. PROMETHEE	33
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	40
4. METODOLOGIA PROPOSTA	41
4.1. INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL (IFO)	41
4.2. CRITÉRIO SITUAÇÃO OPERACIONAL (CSO)	42
4.3. CRITÉRIO SITUAÇÃO DE EQUIPAMENTO (CSE)	43
4.4. FUNÇÃO OBJETIVO DO INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL (IFO)	52
4.5. DEFINIÇÃO DOS PESOS COM A METODOLOGIA AHP	53
4.6. MODELAGEM DO PROBLEMA COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE	53
4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	54
5. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	65
6. CONCLUSÃO	67
6.1. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	68

6.2. TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXO A - BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO VENTILADA.....	73

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é transmitida entre regiões de um país por diversas linhas de transmissão e subestações. Estas subestações são compostas por uma diversidade de equipamentos: transformadores de potência e instrumentos, disjuntores, seccionadoras. E os sistemas de proteção, telecomunicação, controle e supervisão.

As transmissoras de energia brasileiras são remuneradas de acordo com a disponibilidade de operação dos equipamentos da subestação. Contudo, está prevista a utilização de um desconto denominado Parcela Variável (PV) em caso de indisponibilidade e em restrição operacional do equipamento. Em caso de indisponibilidade não programada, o desconto pode variar dependendo do equipamento entre 50 até 150 vezes a remuneração recebida durante o período de indisponibilidade \referenciar.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o responsável pela aplicação das penalidades bem como a coordenação e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O banco de baterias é o responsável pelo suprimento da energia necessária para operação dos disjuntores, dispositivos de proteção, supervisão e controle. Sem o suprimento de energia necessária para operação do disjuntor, uma falha na abertura pode provocar um incêndio no transformador ou a indisponibilidade da linha de transmissão no caso de uma falha no fechamento ocasionando grandes perdas financeiras para a transmissora (DESANTI; SCHWEITZ, 2006).

Subestações de diversas tensões e potências fazem parte do sistema de transmissão brasileiro. Estas subestações possuem banco de baterias que necessitam de constante supervisão das grandezas elétricas como tensão e corrente flutuantes. A classificação da bateria que possui uma maior prioridade de intervenção sobre as demais é complexa, pois as subestações possuem bancos de baterias com diferentes tempo de operação, estados de conservação e características elétricas.

A manutenção preventiva em um banco de baterias estacionária é realizada de acordo com os critérios recomendados pela norma (IEEE STD 450, 2010). A

periodicidade de inspeções e testes para a bateria de chumbo ácido ventilada é mensal para inspeção visual, verificação da tensão flutuante e nível de eletrólito. E anual para ensaio de descarga e medida de resistência e condutância (IEEE STD 450, 2010).

Chumbo ácido e níquel cádmio são os tipos mais comuns de baterias usadas em aplicações estacionárias por possuírem baixo custo, alta confiabilidade e vida longa.

Os seguintes tipos de baterias estacionárias são utilizados em usinas e subestações:

- Chumbo ácido ventilada;
- Chumbo cálcio;
- Chumbo antimônio;
- Chumbo selênio;
- Chumbo estanho;
- Chumbo puro;
- Chumbo ácido regulado por válvula;
- Eletrólito absorvido;
- Eletrólito gelificado.

A bateria utilizada nesta dissertação é do tipo puro chumbo ácido ventilada.

O método desenvolvido nesta dissertação apresenta uma metodologia para ranqueamento de banco de baterias para substituição com a avaliação dos parâmetros Critério Situação de Equipamento (CSE) e Critério Situação Operacional (CSO) na construção do Indicador de Fragilidade Operacional (IFO). O indicador coloca em classificação de prioridade de substituição um determinado conjunto de banco de baterias levando em consideração critérios técnicos e operacionais. Na geração do indicador é utilizado o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) junto com o *Analytic Hierarchy Process*

(AHP). O PROMETHEE é um método utilizado na solução de problemas de ranqueamento enquanto o AHP define os pesos dos critérios envolvidos.

1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A resolução da ANEEL 643/2014 (ANEEL, 2014) determina a substituição dos equipamentos de subestações em situação de obsolescência, final de vida útil, desgaste prematuro, risco de dano às instalações ou restrições operativas. A concessionária de transmissão fica obrigada a enviar anualmente à ANEEL, ao ONS, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e ao Ministério de Minas e Energia (MME) uma relação dos equipamentos com vida útil esgotada e com vida remanescente de até quatro anos, calculados a partir de taxas de depreciação estabelecidas no Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE). Na relação devem ser identificados os equipamentos que permanecem em operação por tempo adicional a vida útil com a justificativa, as ações propostas e o investimento esperado.

A resolução ANEEL 729/2016 (ANEEL, 2016) institui as disposições referentes à qualidade do serviço de transmissão de energia associadas à disponibilidade e capacidade operativa das concessionárias de transmissão. A redução do prejuízo financeiro resultante de penalidades por PV devido à indisponibilidade ou restrição operacional dos equipamentos de subestações é um parâmetro para o planejamento da manutenção de banco de baterias.

Estes termos tornam importante a criação de um indicador para a priorização de manutenção e possível substituição de bancos de baterias de chumbo ácido ventilado em subestação. A experiência do especialista não é o suficiente na tomada de decisão para análise e seleção de um equipamento que pertence a um conjunto de diversos bancos de baterias, já que envolve uma ampla quantidade de dados, critérios técnicos, econômicos, e algumas restrições operacionais. Deste modo, há a necessidade da utilização de uma metodologia matemática como ferramenta de apoio ao tomador de decisão.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para estabelecer o indicador de fragilidade operacional que apontará um ranqueamento de banco de baterias de chumbo ácido ventilado em subestações com vista à manutenção e substituição.

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisar conceitos para um embasamento teórico da dissertação;
- Estudar métodos de análise multicritério com a finalidade da escolha do método multicritério para elaboração de uma metodologia de classificação e seleção de banco de baterias;
- Estabelecer o Critério Situação de Equipamento e Critério Situação Operacional;
- Definir os pesos e estabelecer os parâmetros que irão impactar o critério situação de equipamento e operacional para o indicador de fragilidade operacional;
- Validar a metodologia desenvolvida através de um estudo de caso real com os diversos bancos de baterias.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos para melhor organização e narração da realização das atividades:

- No capítulo 1 é apresentada uma introdução do trabalho com as justificativas e objetivos;
- Uma revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 2 com publicações em artigos que tratam das várias metodologias utilizadas para sistemas de monitoramento de baterias. São comentadas algumas das principais metodologias multicritério com uma revisão de trabalhos publicados que

as utilizam e uma abordagem mais aprofundada nos métodos AHP e PROMETHEE que são utilizados na elaboração desta dissertação;

- O capítulo 3 é constituído pelo embasamento teórico utilizado pelo método de análise de decisão multicritério AHP na obtenção dos pesos relativos de cada critério de decisão e também destinado à teoria do método de análise de decisão multicritério PROMETHEE usado para classificar os bancos de baterias segundo as prioridades definidas ao longo do trabalho;
- O capítulo 4 é realizada a composição do IFO com a definição individual de cada critério. A função objetivo é traçada com os pesos calculados pelo método AHP e a modelagem do problema com o método PROMETHEE;
- Um estudo de caso é apresentado no capítulo 5 através da análise de 25 bancos de baterias de chumbo ácido distribuídos em 18 subestações reais. Em sequência, são inseridos os dados relativos à condição operacional e técnica de todos os bancos de baterias. A metodologia proposta é legitimada por meio do cálculo de cada critério e da parametrização no IFO e os resultados encontrados no estudo de caso são apresentados;
- O capítulo 6 é dedicado à conclusão da dissertação e sugestões de futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica utilizada nesta dissertação com o intuito de fundamentar a proposta do trabalho e apresentar as publicações científicas que tratam do tema de monitoramento de banco de baterias, bem como as metodologias e critérios utilizados nestas publicações para o processo de tomada de decisão.

Existem vários estudos recentes no sentido de acompanhar a vida útil de uma bateria. A condição de uma bateria é monitorada através de diferentes metodologias utilizando suas características físicas para se determinar o estado da carga e o estado de saúde.

O trabalho de (LIU et al., 2017) propõe um método para estimar o estado de saúde de baterias de chumbo ácido com base no estado de descarga e flutuação. No estado de descarga, as baterias são descarregadas por 8h relacionando tensão de descarga e tempo de operação da bateria. Enquanto no estado de flutuação, as baterias estão conectadas ao carregador (retificador) para manter a máxima potência relacionando a resistência interna e com o tempo de operação.

A teoria da onda viajante é utilizada em um sistema de monitoramento de baterias com aplicação de um sinal de onda quadrada e coleta a diferença da onda refletida em várias frequências para detectar a posição da bateria anormal (NAKJUY; KHOMFOI, 2018).

O estado de saúde é determinado em (SHAHRIARI; FARROKHI, 2010) usando o método dos mínimos quadrados e a lógica difusa. É baseado na inclinação da relação linear entre a potência disponível e a tensão de circuito aberto da bateria. Três baterias fornecem informações referentes a uma bateria saudável, uma bateria descarregada e uma bateria seminova. O resultado é utilizado para estimar o estado de saúde de uma bateria desconhecida.

A rede neural probabilística é usada em (LIN; LIANG; CHEN, 2013) para estimar o estado de saúde de baterias. É realizada carga e descarga com corrente e tensão constantes para o teste de ciclo de vida. Os dados obtidos das cargas e descargas são utilizados para estimar o estado de saúde. Os resultados indicam que o tempo de carga de corrente constante, a queda de tensão no início da

descarga e a tensão de circuito aberto são as características mais importantes para estimar o estado de saúde. Um total de 110 baterias é utilizado, sendo 100 unidades para treinar a rede neural probabilística e o restante para testar a viabilidade do método.

Uma metodologia desenvolvida por (CHEN et al., 2016) é aplicada com a utilização de um filtro Kalman que consiste de um algoritmo matemático proposto por Rudolf Kálmán nos anos 1960. A estimativa do estado de carga de baterias de chumbo ácido é determinada com o monitoramento da tensão terminal, tensão de circuito aberto e corrente de descarga.

A aplicação de um filtro de *Kalman* estendido combinado com um sistema por unidade (PU) é descrito por (KIM; CHO, 2011).

O modelo apresentado por (SZUMANOWSKI; CHANG, 2008) está baseado na descarga da bateria e nas características de carga sob diferentes correntes constantes. A influência da temperatura é analisada no desempenho da bateria e os dados obtidos são utilizados para determinar o estado de carga da bateria.

Um sistema de monitoramento do nível de carga em banco de baterias de chumbo ácido em painel solar é apresentado por (VENANCIO et al., 2019). O sistema implementa a relação linear aproximada entre o nível de carga e a tensão atual através de uma modelagem com a lógica Fuzzy.

Em (ARAUJO LEÃO et al., 2010), três diferentes metodologias de monitoramento do estado de carga de baterias são desenvolvidos e comparados entre si. Eles são baseados em um contador de Ah, na tensão de circuito aberto e uma rede neural artificial. Esta rede monitora variáveis como corrente, tensão e temperatura.

Um sistema de monitoramento *on-line* da resistência interna e a tensão da bateria de chumbo ácido, temperatura e umidade do ar é proposto em (NAKAJO et al., 2016). O monitoramento e a gravação das informações são realizados em um circuito Arduino com um drive de cartão SD para gravação dos dados de medida e uma interface *Ethernet* para transmissão a um servidor para ser acessado a qualquer tempo por um navegador de internet.

Um software desenvolvido em ambiente WEB, linguagem JAVA e servidor de banco de dados SQL é apresentado em (FÁTIMA et al., 2010). O software, denominado GEBAT, acompanha a evolução de medidas como densidade, tensão, impedância e/ou condutância com objetivo de obter diagnósticos de falhas prematuras em baterias de chumbo ácido estacionárias.

Os dados de tensão de circuito aberto são utilizados em (DANG et al., 2016) para estimar o estado de carga de uma bateria com a utilização de dois modelos de redes neurais conectados em série. A primeira parte da rede neural é utilizada para identificar parâmetros eletroquímicos e a segunda parte captura a relação entre a tensão de circuito aberto e o estado de carga.

O estado de saúde é estimado por (ZHOU et al., 2015) através de uma rede neural de regressão generalizada. A comprovação do método é feita com a utilização de dados obtidos de 12 baterias de íons de lítio sofrendo processo de carga e descarga até que a capacidade caia abaixo de 80% da nominal. Seis baterias são utilizadas para treinar a rede neural e a viabilidade do teste é verificada pelos dados das baterias restantes.

A implementação de um sistema de gerenciamento de baterias é apresentado em (ELSAYED; LASHWAY; MOHAMMED, 2016), em que um conjunto de baterias são monitorados e gerenciados individualmente. Com base nas medições de tensão, corrente e energia, o sistema tem a capacidade de isolar cada bateria para aplicar diferentes perfis de carga e diagnósticos para detectar os corretos defeitos.

O monitoramento da capacidade de baterias chumbo ácido é apresentado em (ZHANG et al., 2019). O sistema sugere a substituição do tradicional retificador trifásico por um conversor AC/DC trifásico bidirecional. Desta forma, tornando-se desnecessária a desconexão da bateria para realizar o teste.

Um projeto com redes neurais artificiais é proposto por (TRINANDANA et al., 2020). Esta rede neural é projetada para estimar o valor do estado de carga de uma bateria de chumbo ácido através do monitoramento dos valores de tensão e corrente com a utilização de sensores. As medidas são coletadas em um microcontrolador e enviadas via *bluetooth* para um centro de controle.

(SAYEED et al., 2019) propõe um sistema que monitora parâmetros como tensão, corrente de carga, temperatura e nível de eletrólito da bateria de chumbo ácido. O sistema alerta o usuário através de conexão à Internet via *Wi-Fi* se a temperatura da bateria está alta ou se o nível de eletrólito está baixo.

2.1. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (ADMC)

A “tomada de decisão multicritério” é um assunto de pesquisa operacional considerada frequentemente como um subcampo da matemática que aplica métodos analíticos avançados para obter a melhor solução de complexos problemas de tomada de decisão. A ADCM lida explicitamente com problemas de decisão que usam múltiplos critérios para determinar a melhor solução possível entre as analisadas. (JAHAN; EDWARDS, 2013). A análise de decisão com multicritério visa ajudar os usuários com problemas de decisão. O usuário também é chamado como tomador de decisão (TD). Os métodos multicritérios não têm objetivo de substituir o TD e tomar uma decisão em seu lugar. Eles estruturam o problema de decisão e fornecem uma visão das preferências do TD (SOBRIE, 2016).

A grande maioria das decisões não é muito fácil de ser tomada, pois são envolvidos objetivos múltiplos e conflitantes.

Uma metodologia para definir uma escala de prioridades de ações em equipamentos de subestação é apresentada em (VIANNA et al., 2017). A partir do desenvolvimento de um índice principal são construídos dois outros índices auxiliares que representam as características físicas e funcionais dos equipamentos que podem comprometer seu desempenho e contribuir para a ocorrência de falhas. São utilizados dois sistemas Fuzzy em cascata do tipo Mandani na definição dos índices. A metodologia é verificada através da avaliação de disjuntores a SF6 utilizando-se dados coletados de equipamentos instalados em empresa transmissora de energia elétrica.

Em (SCHMITZ et al., 2018) é apresentada uma metodologia para classificação e substituição de transformadores de potência com a utilização de um indicador de vulnerabilidade operacional. Este indicador consiste em dois grupos de critérios com a condição técnica e operacional do equipamento e permite identificar

quais transformadores de potência dentre um conjunto têm prioridade para substituição considerando informações técnicas e operacionais. A modelagem e parametrização são definidas com a utilização dos métodos multicritério AHP E PROMETHEE. A metodologia é verificada com um estudo de 39 transformadores de potência pertencente a uma transmissora de energia elétrica.

Os autores de (SOARES; DA ROSA ABAIDE; BERNARDON, 2014) propõe uma metodologia para priorização de investimentos em obras de melhoria e ampliação das redes primárias de distribuição de energia elétrica. O objetivo do método é de auxiliar as distribuidoras de energia elétrica na tomada decisão da alocação de recursos em áreas onde haja retorno em melhorias no desempenho dos sistemas elétricos e na contribuição de metas regulatórias. O método AHP é implementado para atribuir um índice de prioridade a cada área de atuação da empresa e o método PROMETHEE a priorização de cada obra de melhoria. A metodologia é verificada com aplicação em uma área de concessão de uma distribuidora de energia elétrica do Rio Grande do Sul, Brasil.

Um modelo de avaliação dos fatores que influenciam na saúde de transformadores de potência como gás dissolvido, teste elétrico, teste de óleo é apresentado por (SUN et al., 2016). A avaliação é realizada com a utilização dos métodos Fuzzy e AHP e a verificação da eficiência da metodologia é através da aplicação em um conjunto de transformadores de potência pertencentes a uma transmissora de energia elétrica chinesa.

Os autores do trabalho (KAMBLE; VADIRAJACHARYA; PATIL, 2018) utilizam os métodos de tomada de decisão AHP e PROMETHEE com o objetivo de encontrar a melhor configuração radial em um sistema de distribuição. Os atributos como: custo de capital, perdas anuais de energia, segurança do sistema, disponibilidade de fornecimento, restrições de capacidade e comprimento do circuito devem ser minimizados no mínimo possível. A metodologia é simulada em uma rede teste que inclui sete centros de carga, representando a carga acumulada da rede de distribuição de 11 kV em cada ponto de conexão, bem como 17 transformadores existentes e uma série de cabos subterrâneos e linhas aéreas existentes.

Em (BERNARDON et al., 2015), os autores apresentam uma metodologia para alocação de comutadores controlados remotamente em redes de distribuição

usando o método AHP com a finalidade de melhorar o índice de confiabilidade dos sistemas de distribuição com a utilização do índice de frequência de interrupção média do sistema, índice de duração média de interrupção do sistema e energia não fornecida. A metodologia proposta é demonstrada em um sistema atual da concessionária AES Sul.

Avaliar o risco de equipamentos de distribuição com base na teoria de risco juntamente com um método de cálculo probabilístico ponderado para verificar as probabilidades de risco de falha de equipamentos é apresentado em (LI; LI; ZHAO, 2014). O processo de hierarquia analítica (AHP) e a técnica de preferência de pedido por similaridade à solução ideal (TOPSIS) são utilizados para sequenciar a importância dos equipamentos para o risco de falha da rede de distribuição. Os valores de risco dos equipamentos são calculados com os dados estatísticos históricos e status de execução em tempo real.

O autor (KITUR, 2015) apresenta uma metodologia com a utilização dos métodos PROMETHEE e TOPSIS para avaliar o melhor custo de geração de energia em um dia. O método AHP é utilizado na determinação dos pesos relativos dos critérios de evolução.

2.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada uma revisão de alguns conceitos como confiabilidade, disponibilidade, manutenção e os tipos de baterias estacionárias.

Publicações de autores que utilizam diversas metodologias para o monitoramento e substituição de banco de baterias também foram apresentadas no capítulo.

Na sequência, são descritos os conceitos gerais de análise de decisão multicritério com exemplos de publicações que se utilizavam de algum tipo de metodologia multicritério. Uma maior ênfase foi dada nas metodologias AHP e PROMETHEE que foram utilizadas na elaboração desta dissertação. O método AHP contribuiu na estruturação do problema e o PROMETHEE na elaboração do ranking esperado.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Este capítulo é dedicado a realizar um detalhamento aprofundado sobre os métodos AHP e PROMETHEE, sendo que eles foram utilizados nesta dissertação para modelagem do problema proposto.

3.1. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

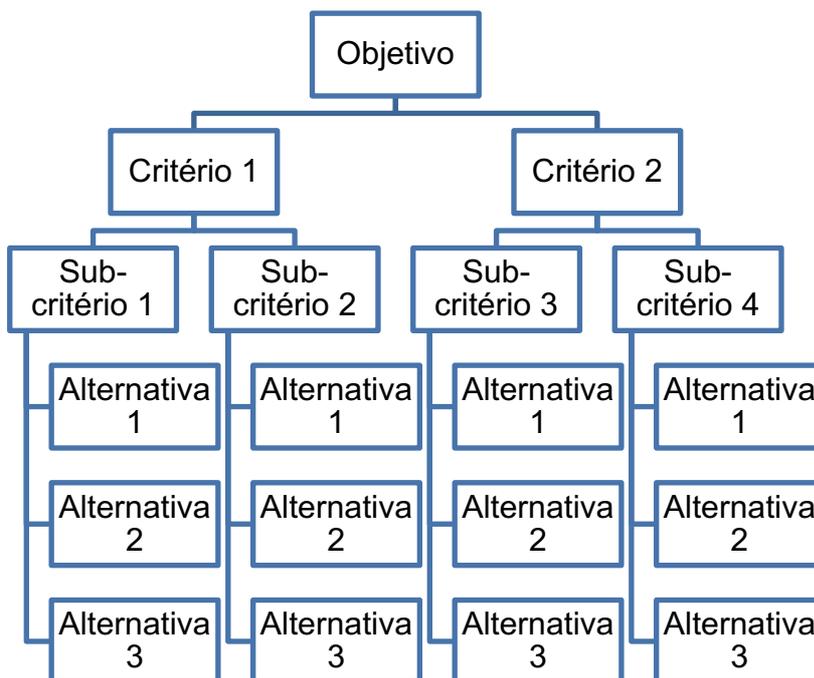
O método Analytic Hierarchy Process (AHP) ,desenvolvido por Thomas Saaty (SAATY, 1980), é um método de análise de decisões complexas e fornece um conjunto de prioridades para se determinar a melhor escolha entre todas as alternativas. A metodologia usa a comparação por pares de fatores de decisão para analisar um problema de decisão e agregar os resultados algebricamente para, então, derivar uma comparação geral das alternativas.

O processo de tomada de decisão envolvido pelo método AHP envolve quatro passos básicos (SAATY, 1980):

- 1) Definição da estrutura hierárquica do problema;
- 2) Entrada de dados;
- 3) Estimativa dos pesos relativos dos critérios de avaliação;
- 4) Combinação dos pesos relativos para realizar uma avaliação geral das alternativas (agregação de critérios)

O desenho da hierarquia depende da natureza do problema, bem como do conhecimento, julgamento e valores do tomador de decisão. Os critérios podem ser divididos em subcritérios em tantos níveis quanto forem necessários pelo problema. Em um problema de classificação, os elementos do último nível representam as escolhas disponíveis para o tomador de decisão em relação à classificação das alternativas. A Figura 3.1 ilustra um exemplo de hierarquia do processo de decisão com o método AHP.

Figura 3.1 - Estrutura hierárquica do problema de tomadas de decisão com AHP



Fonte: Adaptada de (KUBLER et al., 2016).

O tomador de decisão para comparar os elementos de decisão deve atribuir valores em uma escala de números que indica quantas vezes um elemento é mais importante ou dominante sobre outro elemento. A escala de números representa a intensidade de preferência para cada elemento em comparação com cada um dos outros elementos em nove pontos, que inclui qualquer valor no intervalo de 1 a 9 e os valores recíprocos associados como definidos no Quadro 3.1.

Quadro 3.1- Escala de comparação de critérios

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois criterios contribuem de forma idêntica para o objetivo
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é pouco mais importante que o outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2,4,6,8	Valores intermediários	Também podem ser utilizados

Fonte: Adaptada de (SAATY, 1980).

De posse de n elementos ($A_1, A_2...A_n$), as comparações são realizadas em uma matriz A do tipo quadrada $n \times n$ onde n representa o número de alternativas ou atributos e o elemento a_{ij} representa o peso prioritário relativo de A_i obtido na comparação com A_j . Os resultados são apresentados na forma matricial:

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1/a_{in} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Fonte: Adaptada de (WEBB, 2018).

Na atribuição de pesos numéricos w_i , os métodos mais utilizados são os métodos do autovetor e método das médias geométricas. O método do autovetor deriva os pesos com prioridade w_i resolvendo o problema de autovetor da seguinte forma:

$$A \begin{pmatrix} w_1 \\ \cdots \\ w_1 \end{pmatrix} = \lambda_{max} \begin{pmatrix} w_1 \\ \cdots \\ w_1 \end{pmatrix} \quad 3.2)$$

Onde λ_{max} é o maior autovalor de A

Em uma matriz quadrada $n \times n$, um número $\lambda \in \mathbb{R}$ é um autovalor de A quando exista um autovetor não nulo \vec{v} tal que:

$$A \vec{v} = \lambda \vec{v} \quad 3.3)$$

Os tomadores de decisão não fazem os julgamentos com perfeita consistência e isto implica em imprecisões nas estimativas dos pesos numéricos. (SAATY, 1980) definiu o Índice de Consistência (IC) para medir o nível de consistência para uma matriz recíproca usando a equação mostrada abaixo:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad 3.4)$$

A garantia de uma perfeita consistência deve-se obedecer à igualdade $\lambda_{max} = n$, e assim $IC = 0$. Inconsistências maiores serão encontradas para valores de λ_{max} e IC maiores do que zero.

A Razão de Consistência (RC) é um indicador que norteia conforme os níveis toleráveis de inconsistência para uma matriz de comparação individual sendo julgada pela divisão do Índice de Consistência (IC) pelo Índice Randômico (IR). O Índice Randômico (IR) é calculado pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge, nos Estados Unidos, para matrizes quadradas de ordem n conforme exibido no Quadro 3.2 (XU et al., 2020).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad 3.5)$$

Quadro 3.2- Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

n	2	3	4	5	6	7
IR	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Fonte: adaptada de (XU et al., 2020).

Os níveis aceitáveis de inconsistências para matrizes 3 x 3, 4 x 4 e superiores são assim definidos por (SAATY, 1980): $RC = 0,05$ para matrizes 3 x 3, $RC = 0,08$ para matrizes 4 x 4 e $RC = 0,10$ para $n > 4$.

A validade do método AHP depende de obter um nível satisfatório de consistência, mas inconsistências surgem geralmente de erros, imprecisões e tendências no julgamento humano. Existe na literatura um consenso sobre a importância da definição, entendimento, controle e melhoria na consistência do AHP, com o desejo da construção de confiabilidade, confiança em todo o processo de tomada de decisão (S. ABBAS; KOCAOGLU, 2016).

3.2. PROMETHEE

PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) é um método *Outranking* e uma subdivisão dos métodos ELECTRE que consiste em agregar preferências com base no confronto de pares de todas as combinações prováveis de alternativas (BRANS; MARESCHAL, 2005).

A família dos métodos PROMETHEE inclui o PROMETHEE I, usado para ordenação parcial, e PROMETHEE II, usado para a completa ordenação das alternativas, foi apresentada por Jean-Pierre Brans e Bertrand Mareschal no ano de 1982 em uma conferência no Canadá. Passado alguns anos, Jean-Pierre Brans e Bertrand Mareschal desenvolveram o PROMETHEE III, usado para ordenação baseada em intervalos, e PROMETHEE IV, usado para ordenação completa ou parcial em conjuntos contínuos de possíveis alternativas. Nos anos de 1992 e 1994 ainda foram sugeridas por Jean-Pierre Brans e Bertrand Mareschal duas novas versões: PROMETHEE V, otimização com restrições de segmentação, e PROMETHEE VI, representação do cérebro humano, e um módulo visual interativo

denominado GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Assistance*) para a exibição gráfica.

Tem sua utilização em muitas áreas do conhecimento como no setor automotivo (IGNATIUS et al., 2012), seleção de serviço de *internet* (KARIM; DING; CHI, 2011), estratégias de exploração para robôs de resgate (TAILLANDIER; STINCKWICH, 2011), avaliação de fornecedores (WANG; Y. CHEN; CHEN, 2008), dentre outros.

Os métodos PROMETHEE necessitam de informações bastantes claras como a informação entre critérios e a informação dentro de cada critério para classificar as alternativas de um problema de tomada de decisão.

As informações entre os critérios referem-se à importância relativa da influência de cada critério durante o processo de tomada de decisão. O

Quadro 3.3 apresenta o conjunto $\{w_j, j = 1, 2, \dots, k\}$ que reproduz os pesos associados a cada critério e $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_j(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$ reproduz um conjunto de avaliação dos critérios. Esses pesos são negativos e independentes das escalas dos critérios de avaliação.

Quadro 3.3- Importância relativa de pesos

$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$...	$g_j(\cdot)$...	$g_k(\cdot)$
$w_1(\cdot)$	$w_2(\cdot)$...	$w_j(\cdot)$...	$w_k(\cdot)$

Fonte: (BRANS; MARESCHAL, 2005).

Por conseguinte, os maiores pesos têm como resultado uma maior influência na tomada de decisão. Estes pesos podem ser normalizados, de maneira que:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad 3.6)$$

As informações dentro de cada critério dos métodos PROMETHEE são reunidas por meio de comparações pareadas de todas as alternativas sobre um critério específico. É considerado o desvio entre as avaliações de duas alternativas. Para pequenos desvios, o tomador de decisão irá dispor uma pequena preferência para a melhor alternativa e não ter preferência se considerar que este desvio é negligenciável. A preferência é maior quanto for maior o desvio. Esta preferência pode ser representada pelos números reais entre 0 e 1 que são calculados pela seguinte função de preferência:

$$P(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad \forall a, j \in A \quad 3.7)$$

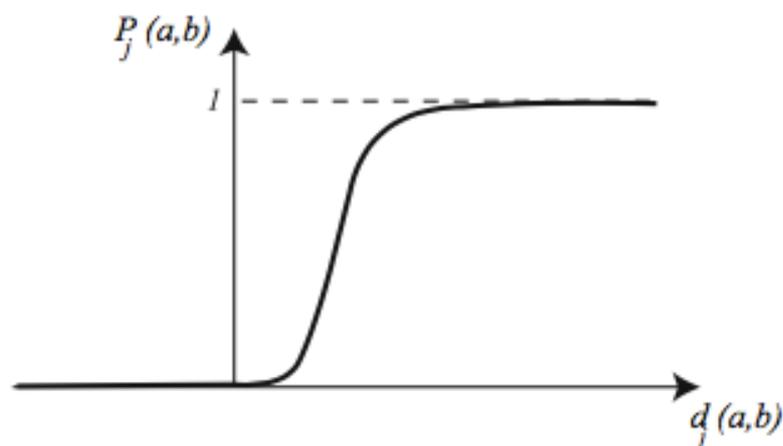
$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad 3.8)$$

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \quad 3.9)$$

No caso de um critério a ser maximizado, essa função está dando a preferência de a sobre b para os desvios observados entre suas avaliações no critério $g_j(\cdot)$. Deve ter a forma da Figura 3.2. As preferências são iguais a 0 quando os desvios são negativos.

$$P_j(a, b) > 0 \Rightarrow P_j(b, a) = 0 \quad 3.10)$$

Figura 3.2 - Função de preferência



Em um critério a ser minimizado, a função de preferência deve ser revertida ou alternativamente determinada por:

$$P_j(a, b) = F_j[-d_j(a, b)] \quad 3.11)$$

A função $P(a, b)$ é a representação da preferência da alternativa a sobre a alternativa b sendo observados os desvios entre as avaliações sob o critério $g_j(\cdot)$. Os tipos de funções de preferências do método PROMETHEE pode ser visualizadas na Figura 3.3. O tomador de decisão deve escolher a função de preferência que melhor se adapte ao problema e definir 0, 1 ou 2 devem ser definidos, sendo seu significado:

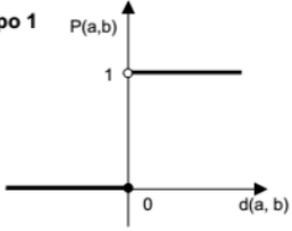
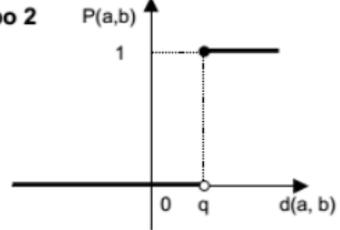
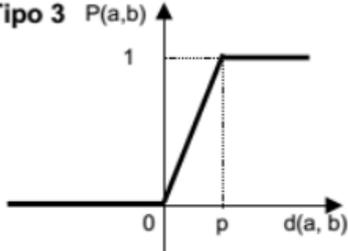
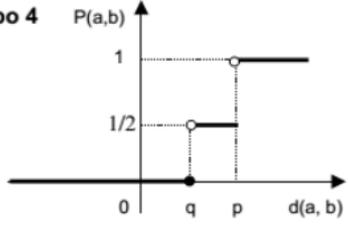
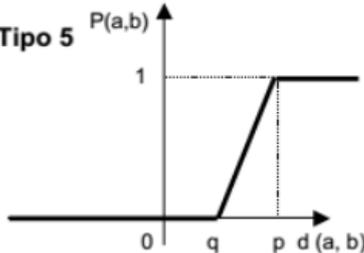
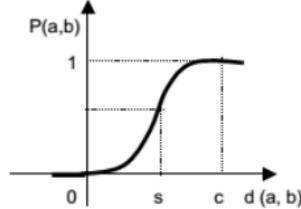
q é um limiar de indiferença;

p é um limiar de preferência estrita ($P_j(a, b) = 1$);

s é um valor intermediário entre p e q .

O limiar de indiferença q é o maior desvio considerado insignificante pelo tomador de decisão, enquanto que o limiar de preferência p é o menor desvio considerado como suficiente para gerar uma preferência integral. A identificação de um critério generalizado é, então, limitada à seleção dos parâmetros adequados (BRANS; MARESCHAL, 2005).

Figura 3.3 – Tipos de critérios generalizados ($P(d)$:funções de preferência)

Ilustração	Definição
<p>Tipo 1</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) \leq 0 \\ 1 & \text{se } d(a, b) > 0 \end{cases}$
<p>Tipo 2</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) < q \\ 1 & \text{se } d(a, b) \geq q \end{cases}$
<p>Tipo 3</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) < 0 \\ 1/p \cdot d(a, b) & \text{se } 0 \leq d(a, b) \leq p \\ 1 & \text{se } d(a, b) > p \end{cases}$
<p>Tipo 4</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) \leq q \\ 1/2 & \text{se } q < d(a, b) \leq p \\ 1 & \text{se } d(a, b) > p \end{cases}$
<p>Tipo 5</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) < q \\ \frac{1}{p - q} [d(a, b) - q] & \text{se } q \leq d(a, b) \leq p \\ 1 & \text{se } d(a, b) > p \end{cases}$
<p>Tipo 6</p> 	$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d(a, b) < 0 \\ 1 - e^{-\frac{[d(a, b)]^2}{2s^2}} & \text{se } d(a, b) \geq 0 \\ 1 & \text{se } d(a, b) \rightarrow \infty \end{cases}$

Fonte: Adaptada de (BELTON; STEWART, 2002).

O procedimento básico da metodologia PROMETHEE é a comparação par a par de alternativas sendo necessário para sua aplicação o índice de preferência $\pi(a, b)$ que é o somatório ponderado das preferências de cada critério, representado pelas equações (3.12) e (3.13).

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad 3.12)$$

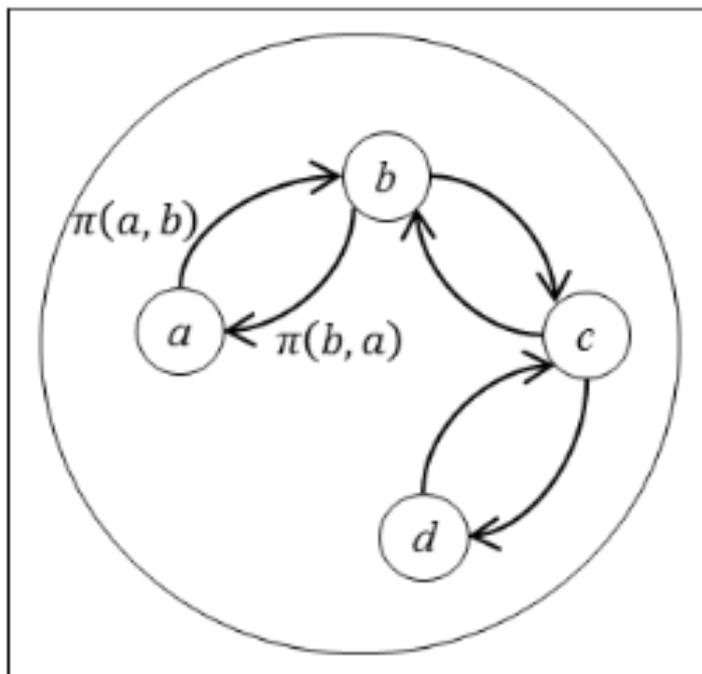
$$\pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \quad 3.13)$$

Onde $\pi(a, b)$ mede o grau em que a alternativa a é preferida à alternativa b e $\pi(b, a)$ a preferência de b em relação a a . Normalmente, $\pi(a, b)$ e $\pi(b, a)$ são positivos e possuem as seguintes propriedades válidas para todos $(a, b) \in A$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi(a, a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(b, a) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a, b) + \pi(b, a) \leq 1 \end{array} \right. \quad 3.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi(a, b) \sim 0 \text{ indica preferência fraca de } a \text{ sobre } b \\ \pi(a, b) \sim 1 \text{ indica preferência forte de } a \text{ sobre } b \end{array} \right. \quad 3.15)$$

Para cada par de alternativas pertencentes a A , depois de realizadas as comparações entre $\pi(a, b)$ e $\pi(b, a)$, um gráfico *outranking* incluindo dois arcos entre cada par de nós é representado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Gráfico *Outranking* valorizados

Fonte: Adaptado de (GRECO; EHRGOTT; FIGUEIRA, 2016).

Em um fluxo de ordenação ou hierarquização que se utiliza da importância de cada alternativa em relação as demais, o índice de preferência global possibilita avaliação de cada alternativa a relativa a $(n - 1)$ alternativas em A . Logo, dois fluxos de ordenação ou importância são definidos.

Fluxo *Outranking* positivo:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in a} \pi(a, x) \quad 3.16)$$

Fluxo *Outranking* negativo:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in a} \pi(x, a) \quad 3.17)$$

O fluxo *Outranking* positivo representa o grau de preferência em que a alternativa a supera todas as outras, enquanto o fluxo *Outranking* negativo representa o grau de preferência em que todas as alternativas superam a alternativa a (BRANS; MARESCHAL, 2005).

O fluxo líquido é obtido pela diferença entre o fluxo positivo o fluxo negativo.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad 3.18)$$

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos matemáticos dos dois métodos utilizados para solução do problema de ranqueamento. Observou-se que o uso em conjunto dos métodos AHP e PROMETHEE traz uma importante consonância operacional em que o AHP contribui para a estruturação do problema enquanto o PROMETHEE na elaboração do ranqueamento para prioridade de substituição dos bancos de baterias conforme os critérios estabelecidos nos indicadores técnicos e operacionais.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

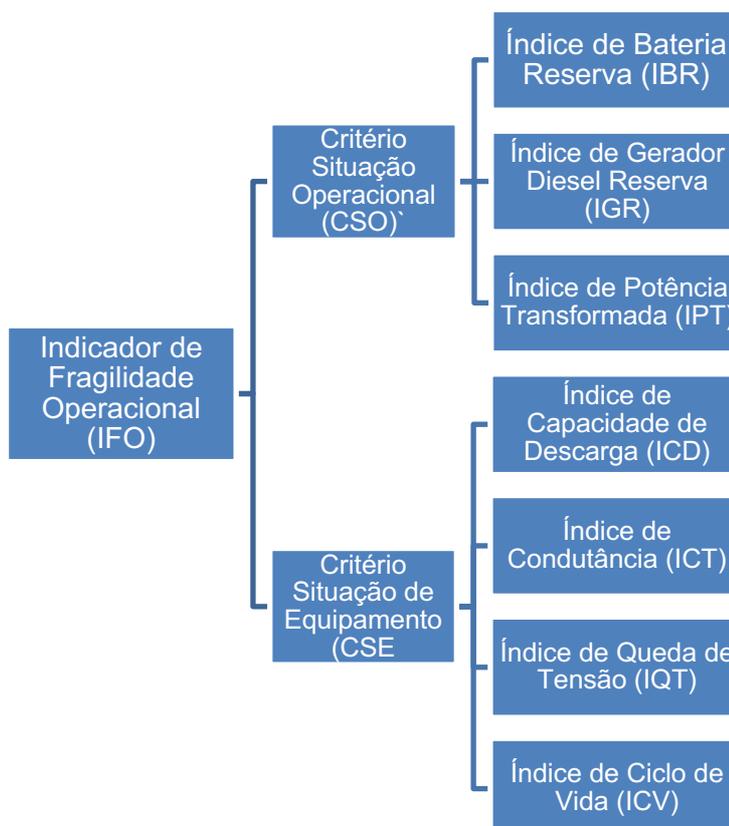
A metodologia proposta visa auxiliar na tomada de decisão acerca da manutenção e substituição de bancos de baterias. A avaliação do IFO tem o objetivo de priorizar ações de manutenção e substituição com vista a garantir um adequado desempenho e robustez do sistema elétrico, com a redução de perdas financeiras ocasionadas pela indisponibilidade do banco de baterias.

Os critérios que foram escolhidos para a tomada de decisão são divididos em dois grupos: Critério Situação de Equipamento (CSE) e Critério Situação Operacional (CSO). O CSE apresenta as características elétricas do banco de baterias enquanto o CSO apresenta a condição do equipamento com relação a localização e equipamentos reservas.

4.1. INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL (IFO)

O Indicador de Fragilidade Operacional (IFO) dos bancos de baterias divide-se em: Critério Situação de Equipamento (CSE) e Critério Situação Operacional (CSO). O CSE relaciona dados como o tempo de operação do banco de baterias, a capacidade de descarga, condutância e queda de tensão terminal. À medida que o CSO relaciona informações da subestação como potência, disponibilidade de banco de baterias reserva e disponibilidade de gerador diesel reserva. O organograma da Figura 4.1 detalha a organização dos critérios empregados na elaboração deste trabalho.

Figura 4.1 - Organização dos critérios



Fonte: O autor.

4.2. CRITÉRIO SITUAÇÃO OPERACIONAL (CSO)

a) Índice de Bateria Reserva (IBR)

O objetivo do IBR é priorizar as subestações que não possuem um conjunto reserva de banco de baterias tanto para os sistemas de proteção, controle e supervisão quanto para o sistema de telecomunicação, desta forma com uma maior confiabilidade ao sistema elétrico.

$$IBR = \begin{cases} 1 & \text{Possui bateria reserva} \\ 0 & \text{Não possui bateria reserva} \end{cases} \quad 4.1)$$

b) Índice de Gerador Diesel Reserva (IGR)

O procedimento de rede no seu submódulo 2.3 (ONS, 2010) estabelece que em os serviços auxiliares em corrente alternada das subestações com tensão nominal maior ou igual a 230 kV devem prover de duas fontes de alimentação, sendo uma alimentada por um transformador de média tensão entre 13,8 kV e 23 kV de pequena potência e outra localizada no enrolamento terciário do transformador de potência da subestação. Este serviço auxiliar é utilizado para alimentar cargas como a ventilação forçada do transformador de potência, iluminação e o retificador que mantém carregado o banco de baterias. Um grupo gerador com partida automática e com capacidade para alimentar tais cargas deve entrar em operação no caso de falta de tensão nas duas fontes de alimentação CA preferenciais.

O objetivo do Índice de Gerador Diesel Reserva (IGR) é priorizar a subestação que não possui um grupo gerador para o provimento de tensão alternada garantindo uma maior confiabilidade ao sistema elétrico.

$$IGR = \begin{cases} 1 & \text{Possui grupo gerador reserva} \\ 0 & \text{Não possui grupo gerador reserva} \end{cases} \quad 4.2)$$

c) Índice de Potência Transformada (IPT)

A potência transformada em uma subestação é um fator determinante na importância para o sistema elétrico. De acordo com a potência transformada, uma subestação pode suprir a energia de uma cidade, uma região do estado e uma região do país.

Desta forma, para a geração do IPT tem prioridade a subestação com maior potência transformada. Assim, é garantida a prioridade de manutenção para subestação mais importante do sistema.

$$IPT = \text{Potência transformada da subestação (MVA)} \quad 4.3)$$

4.3. CRITÉRIO SITUAÇÃO DE EQUIPAMENTO (CSE)

a) Índice de Capacidade de Descarga (ICD)

O ensaio tem por objetivo submeter o banco de baterias a uma descarga por um determinado período a fim de aferir a capacidade em ampère-hora com o acompanhamento de leituras de tensão e temperatura dos elementos do banco de baterias.

As subestação com tensão nominal igual ou superior a 230 kV devem prover de banco de baterias com autonomia mínima de 5 h (horas) em regime contínuo para que seja possível a realização de manobras de recomposição do sistema em caso de falta de tensão alternada (ONS, 2011). O indicador utilizado considera 5h como tempo de descarga para subestação de nível de tensão igual ou superior a 69 kV.

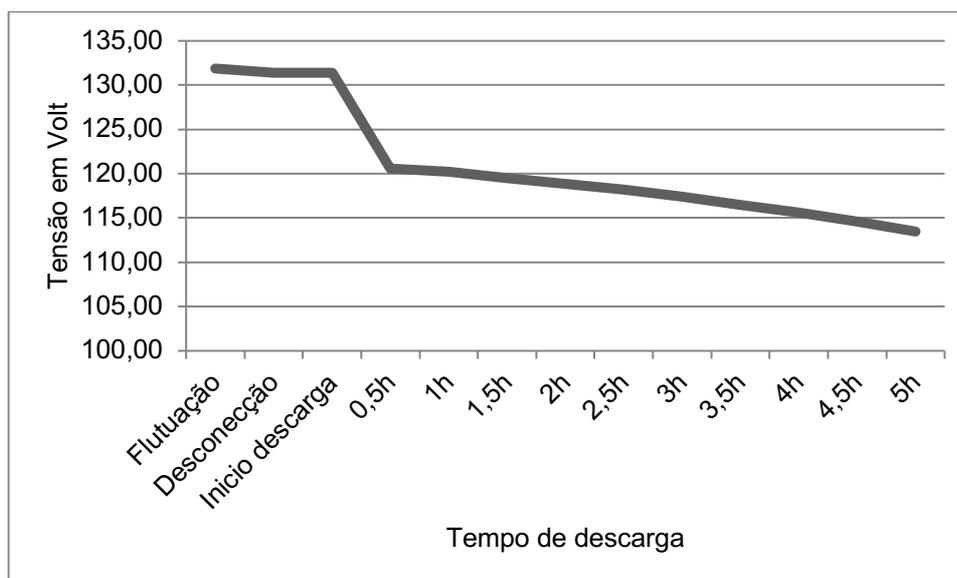
O procedimento de descarga é realizado com a utilização de uma carga com resistências ligadas em série com o banco de baterias ajustada com correntes de descarga de 10 A, 5 A e 3 A ou a um valor de 1/10 da capacidade especificada pelo fabricante (ABNT, 1998).

O gráfico apresentado na Figura 4.2 ilustra o comportamento da tensão nos terminais de um banco de baterias submetido a uma descarga por um período de 5 horas com corrente constante de 50 A que corresponde a 1/10 da capacidade nominal.

O estágio chamado de flutuação é responsável por manter o banco de baterias carregado e com a mesma tensão do retificador de corrente contínua. No estágio seguinte denominado “desconexão”, é desfeita a ligação entre os elementos banco de baterias e retificador. Um conjunto de resistências é conectado ao banco de baterias para iniciar o processo de descarga.

Através do gráfico da Figura 4.2 é possível observar os valores aproximados da tensão do banco de baterias durante a descarga. A tensão manteve-se constante com um valor 130 V até o início da descarga decaindo até 115 V passadas 5 horas.

Figura 4.2 - Tensão de descarga de banco de baterias



Fonte: O autor.

O Índice de Capacidade de Descarga (ICD) do banco de baterias é determinado com a solução da equação (4.4) com referência em (4.5) e (4.6).

$$ICD = \left(\frac{t_a}{t_s \times K_t} \right) \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:

ICD é a capacidade em % do banco de bateria para uma temperatura da célula de 25° C;

t_a é o tempo em minutos para atingir o valor mínimo de tensão terminal do banco de baterias;

t_s é o tempo em minutos especificado pelo fabricante para atingir o valor mínimo de tensão terminal do banco de baterias;

K_t é um fator de correção para a temperatura banco de baterias antes do início do teste de descarga.

$ICD > 80\%$; banco de baterias em boas condições

$ICD < 80\%$; banco de baterias necessita de substituição

(4.5)

4.6)

Quadro 4.1 - Fator de correção de temperatura (K_T)

Temperatura inicial (° C)	Fator de correção de temperatura K_T	Temperatura inicial (° C)	Fator de correção de temperatura K_T
5	0,684	25	1,000
10	0,790	26	1,006
15	0,873	27	1,015
16	0,888	28	1,025
17	0,902	30	1,045
18	0,916	31	1,054
19	0,929	32	1,063
22	0,966	33	1,072
23	0,977	34	1,081
24	0,986	35	1,090
		40	1,134

Fonte: (IEEE STD 450, 2010).

A tensão em cada elemento do banco de baterias durante o período de descarga não deve ser inferior a 1,75 V. A tensão mínima no banco de baterias deve estar acima do resultado da multiplicação entre a quantidade de células por 1,75 V. Um banco de baterias empregado no comando e proteção de subestação possui 60 elementos com uma tensão terminal mínima de 105 V.

O teste de descarga é encerrado:

- Ao final das 5 horas de descarga;
- A tensão terminal em uma célula estiver abaixo de 1,75 V;
- A tensão terminal do banco de baterias estiver abaixo de 105 V.

A prática recomendada é substituir a bateria se a capacidade calculada em (4.4) apresentar valor abaixo de 80%. Uma capacidade de 80% mostra que a taxa de deterioração da bateria está aumentando mesmo se houver capacidade suficiente para atender aos requisitos de carga.

A avaliação do indicador ICD é realizada da seguinte forma: o tempo t_s é fornecido pelo fabricante do banco de baterias para variados tempos e corrente de descarga e o tempo t_a é arbitrado pelo especialista. O valor de t_s é fixo em 5 horas. A tensão terminal mínima suportável do banco de baterias é de 105 V. O ensaio de capacidade de descarga é realizado com o monitoramento da tensão terminal. Se a tensão terminal decair abaixo da mínima, este tempo transcorrido será o novo valor de t_a . No exemplo do gráfico da Figura 4.2 a tensão manteve-se acima de 105 V por mais de 5 horas. Assim, o valor de t_a e t_s será de 5 horas.

b) Índice de Condutância (ICT)

A medição de condutância é um dos métodos classificados como técnica ôhmica para se determinar o estado de saúde de uma célula/bateria. É utilizada para detectar defeitos em células, curtos-circuitos e tensões de circuito aberto que podem ocasionar a redução na capacidade da bateria. A condutância elétrica é a facilidade em conduzir corrente elétrica, ou seja, é a medida da capacidade de uma bateria em produzir corrente. Quanto menor o valor da condutância, menor o desempenho de descarga ou menor a capacidade esperada para a célula. E quanto maior a condutância, maior o desempenho esperado para a bateria. A condutância é definida como a parte real da admitância cuja unidade de medida é o mho ou Siemens (S).

O teste de condutância em baterias é realizado com aplicação de um sinal conhecido de tensão alternada de baixa frequência em uma célula ou bateria e monitorada a resposta da corrente alternada. A condutância em tensão alternada é a relação da componente de corrente alternada que está em fase com a tensão alternada para a amplitude da tensão alternada que o produziu (HLAVAC et al., 2002; O. FEDER; J. HLAVAC; KOSTER, 1993).

Os aparelhos testadores de condutância comercialmente disponíveis usam um sinal de excitação de única frequência com diferentes formas de onda e frequências do sinal de excitação. As formas de onda podem ser de corrente alternada em frequência fixa ou pulso de corrente em forma quadrada. E o sinal de excitação pode variar entre 10 Hz para o aparelho Celltron a 1000 Hz para o aparelho Hewlett-Packard 4328A (HUET, 1998). O equipamento utilizado nesta

dissertação na determinação do índice de condutância é o medidor de condutância de baterias Celltron Essential modelo CTBX160PG de fabricação Midtronics apresentado na Figura 4.3. Através do aproveitamento da tensão do próprio elemento medido com a utilização de um resistor interno de alta precisão, o equipamento realiza a medição da tensão e corrente constante com uma frequência na faixa de 20 Hz a 100 Hz. Os valores obtidos são aplicados a algoritmos resultando em dados com 98% de precisão.

Figura 4.3 - Medidor de condutância Midtronics

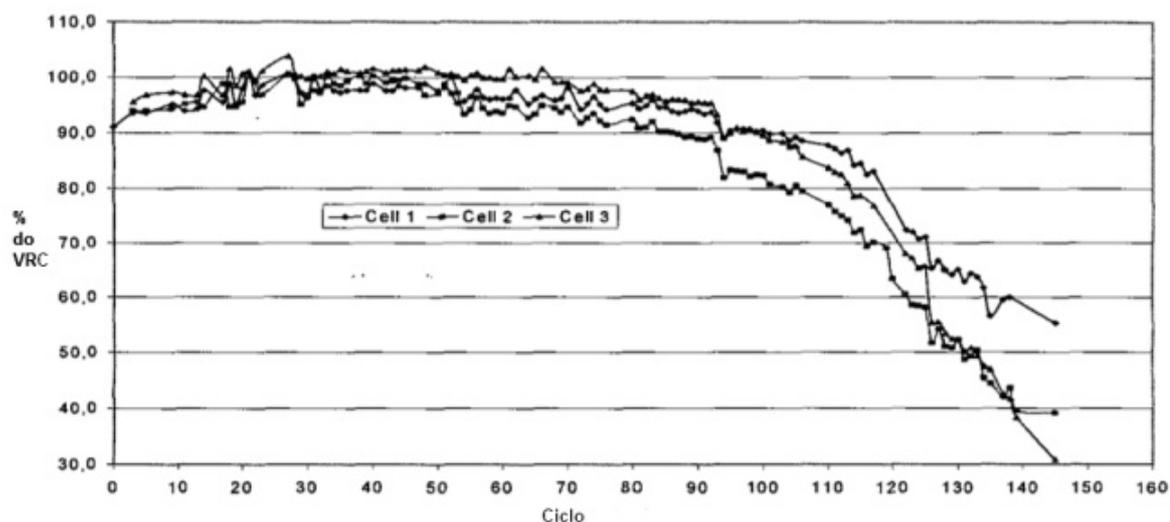


Fonte: O autor

Em (BECK et al., 2004), três baterias de chumbo ácido conectadas em série foram submetidas a processos de carga e descarga até que duas células atingissem uma capacidade abaixo de 50% da nominal. A quantidade de ciclos de carga e descarga foi de 145. Com este ensaio é possível concluir que a curva de condutância e a curva de capacidade possuem o mesmo comportamento. A queda da capacidade iniciou a partir do momento em que a condutância cai a um valor abaixo de 80% do Valor de Referência para Condutância (VRC).

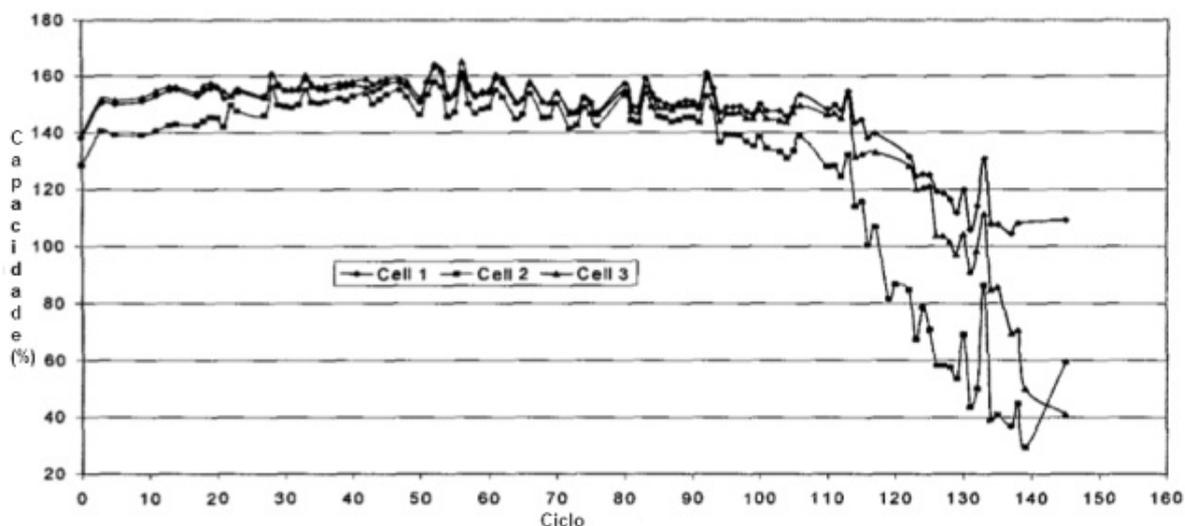
A Figura 4.4 apresenta o gráfico da variação da condutância (% do VRC) em função dos ciclos de carga e descarga. Enquanto a Figura 4.5 relaciona a capacidade nominal com os ciclos de carga e descarga.

Figura 4.4 - Condutância (% do VRC) versus ciclos



Fonte: adaptada de (BECK et al., 2004).

Figura 4.5 - Capacidade nominal versus ciclos



Fonte: adaptada de (BECK et al., 2004).

A capacidade das células permaneceu constante para VRC acima de 80%. Enquanto para valores abaixo de 80%, a capacidade dos elementos começou a decrescer. Para valores de condutância abaixo de 64%, a capacidade das células ficou inferior a 80%. A norma brasileira NBR 14199 determina que uma bateria deve ser substituída quando é alcançada uma perda de 20% da capacidade nominal.

O VRC de (BECK et al., 2004) é aplicado neste trabalho como o valor para o Índice de Condutância (ICT) que é a razão entre a menor condutância de todos os elementos pela média do somatório da condutância de todos os elementos do banco de bateria em análise.

$$VRC = \frac{\min S_i}{\text{Média } \sum_{i=1}^{i=60} S_i} \times 100\% \quad (4.7)$$

Onde:

$\min S_i$ – Valor da mínima condutância encontrada em banco de baterias específico;

S_i – Condutância do elemento i

De posse do ICT os valores encontrados devem ser avaliados da seguinte maneira:

$$ICT > 80\% ; \text{ elemento está em boas condições;} \quad (4.8)$$

$$64\% < ICT < 80\% ; \text{ elemento em observação;} \quad (4.9)$$

$$ICT < 64\% ; \text{ elemento retirado de operação.} \quad (4.10)$$

c) Índice de Queda de Tensão (IQT)

O valor da queda de tensão está relacionado com o tempo de descarga. Quanto menor o tempo de descarga, mais rápido é atingido o limite de tensão terminal. O contrário também é válido, maior tempo de descarga mais lentamente é atingida a tensão limite. Normalmente é considerada descarregada uma bateria estacionária quando a tensão da célula é inferior a 1,75 V. O indicador de queda de tensão expresso em (4.11) é a razão entre o somatório da tensão terminal de cada elemento pela quantidade de elementos do conjunto banco de baterias.

$$IQT = \frac{\sum_{i=1}^{60} V_i}{60} (V) \quad (4.11)$$

Onde:

60 é o número de células em um banco de baterias;

V_i é a tensão terminal da célula i .

d) Índice de Ciclo de Vida (ICV)

O indicador do ciclo de vida está relacionado com a o princípio fundamental da teoria da confiabilidade que é representado nas literaturas através da Curva da Banheira (Bathtub Curve). A curva da banheira descreve a taxa de falhas $\lambda(t)$ (Hazard Function) de vários itens ou produtos de engenharia que está mudando ao longo do tempo de vida útil. A curva lembra o formato de uma banheira como mostrado na Figura 4.6. Três regiões ou períodos distintos são identificados na figura: “Infância”, “Vida Útil” e “Desgaste”, que representam as três fases que passam um equipamento durante seu ciclo completo de vida. A primeira fase representa a diminuição da taxa de falhas e é considerada como período inicial onde aparecem os defeitos de projeto, fabricação, mão de obra barata, instalação incorreta que podem ou não ser totalmente eliminados. A segunda fase é referida como a vida útil onde as taxas de falhas são aleatórias e imprevisíveis que ocorrem por defeitos indetectáveis, maior estresse do equipamento, falha humana. A taxa de falha aumenta na terceira fase da curva da banheira a medida com que aumentam os desgastes do equipamento devido à má manutenção, corrosão, desgastes provocados por atrito e envelhecimento (DHILLON; FASHANDI; LIU, 2002).

Figura 4.6 - Curva indicadora do ciclo de vida



Fonte: (DHILLON, 2005).

Os bancos de capacitores são largamente utilizados no sistema de transmissão para a redução das perdas elétricas e elevação da tensão. A vida útil estimada é de 20 anos sendo interferida com uma redução através da operação em sistema onde possuam elevadas sobretensões e taxas de harmônicos (ANEEL, 2000).

As baterias de chumbo ácido possuem uma vida útil de até 20 anos para as baterias ventiladas e entre 4 anos e 7 anos para as baterias reguladas por válvula. Esta diferença entre a vida útil é devida a manutenção realizada no eletrólito durante a vida de uma bateria ventilada. Enquanto uma bateria regulada por válvula é selada e teoricamente livre de manutenção. O fabricante de baterias garante a vida útil para instalação em ambiente com temperatura próxima de 25° C. Um aumento em 9,4 °C na temperatura nominal pode reduzir a vida útil da bateria em 50% ou mais, provocada pelo aumento exponencial da corrosão das placas positivas.

O índice de ciclo de vida tem entrada o ano de fabricação. A bateria com maior tempo de operação possui prioridade sobre as demais.

$$ICV = Ano\ de\ Fabricação \quad (4.12)$$

4.4. FUNÇÃO OBJETIVO DO INDICADOR DE FRAGILIDADE OPERACIONAL (IFO)

A função IFO tem como objetivo minimizar o índice de gerador diesel reserva (IGR), índice de bateria reserva (IBR), índice de queda de tensão (IQT), índice de condutância (ICT), índice de capacidade de descarga (ICD) e o índice de ciclo de vida (ICV) e maximizar o índice de potência transformada (IPT) de acordo com a equação (4.13). O objetivo foi em priorizar o banco de baterias com a pior condição técnica e operacional sendo prioritário para substituição no processo de tomada de decisão.

$$IFO = \min\{IBR(BAT_i), IGR(BAT_i), ICD(BAT_i), ICT(BAT_i), IQT(BAT_i), ICV(BAT_i)\} + \max\{IPT(BAT_i)\} \quad 4.13$$

em que

BAT_i são os bancos de baterias que compõem o conjunto de alternativas;

$n = BAT_1, BAT_2, \dots, BAT_n$ conjunto finito de alternativas;

$a_i = IBR, IGR, ICD, ICT, IQT, ICV, IPT$ conjunto de critérios de avaliação.

4.5. DEFINIÇÃO DOS PESOS COM A METODOLOGIA AHP

Através de uma comparação par a par dos critérios, os pesos foram modelados matematicamente utilizando a metodologia AHP apresentada com detalhes em (PFITSCHER et al., 2013), dando origem à Tabela 4.1. A qual apresentou 7,4% de razão de consistência para o julgamento, confirmando uma ótima distribuição dos pesos entre os critérios. Estes pesos foram baseados em uma pesquisa realizada com as opiniões de 10 técnicos de manutenção de subestação e um engenheiro de manutenção de baterias vinculados ao quadro de colaboradores de empresa transmissora de energia.

Tabela 4.1 - Pesos dos critérios

Critério Nível 0	Situação Operacional			Situação de Equipamento			
Peso Local Nível 0	0,33			0,67			
Critério Nível 1	IBR	IGR	IPT	ICV	ICD	ICT	IQT
Peso Local Nível 1	0,21	0,13	0,66	0,13	0,55	0,28	0,05
Peso Global	0,07	0,04	0,22	0,08	0,37	0,19	0,03
Peso Global (%)	7%	4%	22%	8%	37%	19%	3%

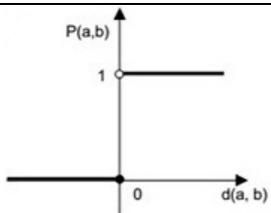
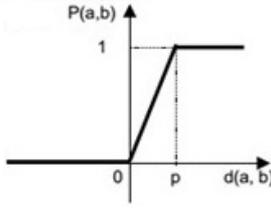
Fonte: O autor.

4.6. MODELAGEM DO PROBLEMA COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE

Os critérios do problema são modelados com o software Visual Promethee Academic Edition desenvolvido pela empresa *VPSolutions* (BRANS; MARESCHAL, 2005) que consiste da escolha da função e limites de preferência (P) de acordo com o Quadro 4.2 para parametrizar os pesos relativos aos critérios determinados na Tabela 4.1. A função usual foi definida para os critérios IPT, IGR, IBR, e ICV pois não há necessidade de emprego dos limites de preferência. Enquanto para os demais critérios é necessária a configuração dos valores de P , sendo escolhida a função V-Shape. Estas funções irão normalizar os valores de entrada de cada critério, que no caso do presente trabalho são os índices, permitindo que independente do valor de entrada d para o índice, o valor de saída P seja normalizado, entre 0 e 1.

Os valores para P foram assim determinados: $P = 1,75$ para IQT, $P = 80$ para ICD e $P = 64$ para ICT sendo estes os valores mínimos em cada critério.

Quadro 4.2 - Funções de preferência

Função de preferência	Definição
Usual 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$
V-Shape 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$

Fonte: Adaptado de (BRANS; MARESCHAL, 2005).

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A metodologia para a elaboração do Indicador de Fragilidade Operacional (IFO) foi apresentada neste capítulo juntamente com os critérios que compõem a situação operacional e situação de equipamento.

Posteriormente foi exibida a função objetivo construída com a utilização dos métodos AHP e PROMETHEE. Este modelando os critérios individualmente e aquele modelando os pesos dos critérios.

5. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O estudo de caso é composto de um conjunto de 25 bancos de baterias de 60 elementos instalados em 18 subestações de diferentes potências e tensões de propriedade da transmissora CEEE-GT. A Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) tem a responsabilidade da transmissão na maioria das instalações da Rede Básica de Transmissão do estado do RS. Realiza o suprimento de energia às maiores concessionárias do estado como RGE, RGE SUL e CEEE Distribuidora, bem como cooperativas de eletrificação rural, consumidores livres e produtores independentes. As suas instalações são compostas por 62 subestações interligadas por 6.055 km de linhas de transmissão que totalizam uma potência instalada de 8.237 MVA. A concessão da companhia é visualizada na Figura 5.1 (CEEE-GT, 2020).

O conjunto formado por 25 bancos de baterias que é apresentado na Tabela 5.1 instalados em 18 subestações receberam nomes aleatórios para garantir a confidencialidade das informações. A potência instalada das subestações está entre 25 MVA e 2016 MVA. Entre as 18 subestações selecionadas, dezesseis possuem banco de baterias reserva e sete possuem um gerador diesel reserva. As baterias mais antigas são datadas do ano de 1992 enquanto as mais novas são do ano de 2018 que foram substituídas em um lote com sete novas baterias. Estas estão localizadas em subestações que não possuíam bateria e gerador diesel reserva como é o caso das subestações SE I e SE L.

A Tabela 5.2 apresenta os índices calculados simultaneamente com os pesos e funções de preferência V-Shape e Usual que são empregadas pelo método PROMETHEE. A função V-Shape diferentemente da função Usual, necessita de um valor de preferência (P). Os índices IGR e IBR receberam valores de 0 (zero) para a inexistência e 1 (um) para a existência de equipamento reserva.

Os índices foram calculados individualmente e em seguida parametrizados no software Visual Promethee Academic Edition (BRANS; MARESCHAL, 2005) que implementa o método PROMETHEE originando o IFO junto com a parametrização das respectivas funções de preferência. Os valores não normalizados em cada critério foram inseridos no método PROMETHEE, pois este normaliza de acordo com as funções de preferências apresentadas e definidas anteriormente na metodologia.

Figura 5.1 - Mapa de concessão da CEEE-GT



Fonte: (CEEE-GT, 2020).

Tabela 5.1 - Dados dos bancos de baterias e subestações

Banco de Baterias e Subestação	Potência da Subestação (MVA)	Ano de Fabricação	Banco de Baterias Reserva?	Gerador Diesel Reserva?
BAT1 SE A	200	2013	Sim	Não
BAT2 SE A	200	2013	Sim	Não
BAT3 SE B	100	2010	Sim	Não
BAT4 SE B	100	2010	Sim	Não
BAT5 SE C	98	1992	Sim	Não
BAT6 SE C	98	1992	Sim	Não
BAT7 SE D	249	2014	Sim	Não
BAT8 SE D	249	2014	Sim	Não
BAT9 SE E	175	1992	Sim	Não
BAT10 SE E	175	1992	Sim	Não
BAT11 SE F	249	2014	Sim	Sim
BAT12 SE F	249	2014	Sim	Sim
BAT13 SE G	166	2009	Sim	Não
BAT14 SE G	166	2009	Sim	Não
BAT15 SE H	249	2018	Sim	Sim
BAT16 SE I	25	2018	Não	Não
BAT17 SE J	97	2018	Sim	Não
BAT18 SE K	2016	2018	Sim	Sim
BAT19 SE L	77	2018	Não	Não
BAT20 SE M	300	2011	Sim	Não
BAT21 SE N	250	2018	Sim	Sim
BAT22 SE O	210	2018	Sim	Não
BAT23 SE P	142	2012	Sim	Não
BAT24 SE Q	50	2005	Sim	Sim
BAT25 SE R	166	2012	Sim	Sim

Fonte: O autor.

Tabela 5.2 - Critérios do estudo de caso

Critério	IPT	IGR	IBR	IQT	ICD	ICT	ICV
Unidade	MVA	0/1	0/1	VOLT	%	%	Ano de Fabricação
Peso	0,2183	0,0397	0,0696	0,0287	0,3679	0,1867	0,089
Função de Preferência	Usual	Usual	Usual	V-Shape	V-Shape	V-Shape	Usual
Preferência (P)	-	-	-	1,75	80	64	-
BAT1 SE A	200	0	1	1,93	100	79	2013
BAT2 SE A	200	0	1	1,94	100	98	2013
BAT3 SE B	100	0	1	2,01	100	40	2010
BAT4 SE B	100	0	1	2,02	66	27	2010
BAT5 SE C	98	0	1	1,86	80	61	1992
BAT6 SE C	98	0	1	1,85	90	70	1992
BAT7 SE D	249	0	1	1,94	100	96	2014
BAT8 SE D	249	0	1	1,95	100	95	2014
BAT9 SE E	175	0	1	1,85	100	94	1992
BAT10 SE E	175	0	1	1,81	93	89	1992
BAT11 SE F	249	1	1	1,94	100	94	2014
BAT12 SE F	249	1	1	1,95	90	86	2014
BAT13 SE G	166	0	1	1,92	12	90	2009
BAT14 SE G	166	0	1	1,92	100	83	2009
BAT15 SE H	249	1	1	1,97	100	89	2018
BAT16 SE I	25	0	0	1,91	100	86	2018
BAT17 SE J	97	0	1	1,78	90	88	2018
BAT18 SE K	2016	1	1	1,79	90	92	2018
BAT19 SE L	77	0	0	1,83	90	94	2018
BAT20 SE M	300	0	1	1,91	100	83	2011
BAT21 SE N	250	1	1	1,81	100	56	2018
BAT22 SE O	210	0	1	1,9	100	90	2018
BAT23 SE P	142	0	1	1,9	100	57	2012
BAT24 SE Q	50	1	1	1,95	100	49	2005

Fonte: O autor.

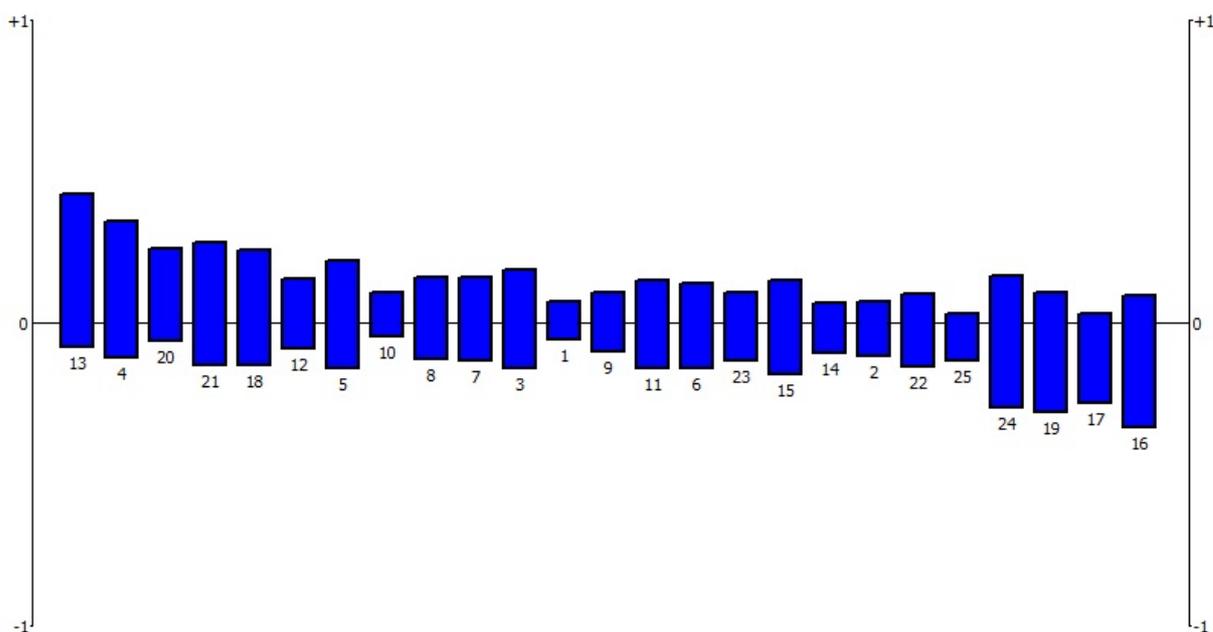
O método PROMETHEE opera com a concepção de fluxo Phi (Φ) na composição de uma classificação que resulta da comparação par a par entre alternativas de cada critério. Assim, o fluxo Phi resultante deste método torna-se o IFO dos bancos de baterias igualmente apresentado na Tabela 5.3 também visualizado no formato de histograma da Figura 5.2 em que o número identifica o banco de baterias. O eixo das ordenadas do histograma representa o IFO dos bancos de baterias. Quanto mais positivo o valor do IFO maior a fragilidade e quanto mais negativo menor a fragilidade em comparação com os demais bancos de baterias.

Tabela 5.3 - Classificação de banco de baterias

Classificação	Banco de Bateria	ϕ
1	BAT13 SE G	0,3533
2	BAT4 SE B	0,2937
3	BAT20 SE M	0,1294
4	BAT5 SE C	0,118
5	BAT21 SE N	0,0966
6	BAT3 SE B	0,0812
7	BAT10 SE E	0,0551
8	BAT6 SE C	0,033
9	BAT18 SE K	0,0276
10	BAT12 SE F	0,0231
11	BAT23 SE P	0,0116
12	BAT9 SE E	0,0016
13	BAT1 SE A	-0,0031
14	BAT14 SE G	-0,0243
15	BAT8 SE D	-0,029
16	BAT7 SE D	-0,0326
17	BAT24 SE Q	-0,0328
18	BAT11 SE F	-0,0558
19	BAT2 SE A	-0,0787
20	BAT15 SE H	-0,0822
21	BAT25 SE R	-0,0896
22	BAT22 SE O	-0,0958
23	BAT19 SE L	-0,2174
24	BAT17 SE J	-0,2198
25	BAT16 SE I	-0,2631

Fonte: O autor.

Figura 5.2 - Histograma IFO



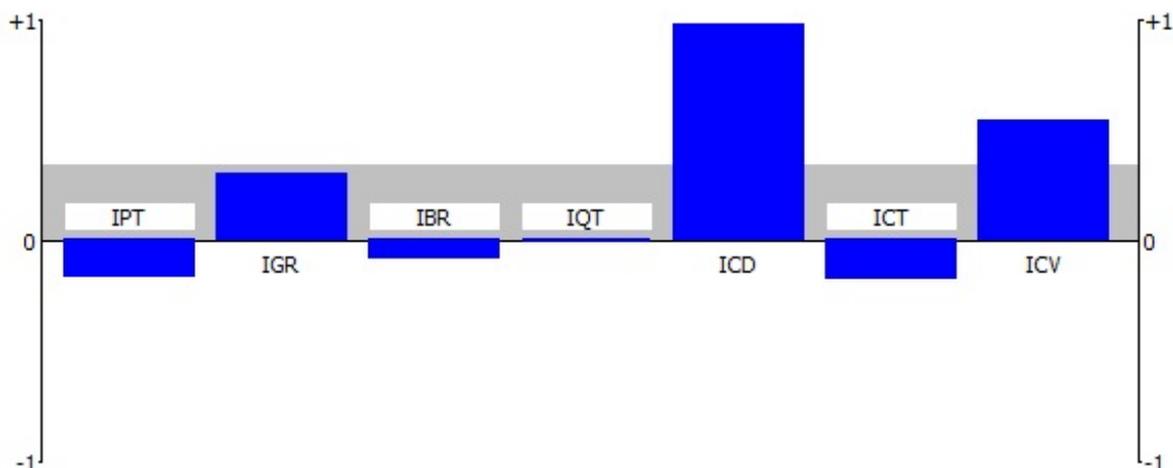
Fonte: O autor.

O maior valor positivo de Φ encontrado neste estudo é 0,3533 e pertence ao banco de baterias BAT13 da SE G que apresenta a maior fragilidade em substituição conforme destacado em cinza na classificação 1 da Tabela 5.3 e de número 13 no histograma da Figura 5.2.

A contribuição individual de cada critério com o fluxo Phi do IFO está exibida na Figura 5.3 quando comparada par a par com os demais bancos de baterias. Os critérios que ofereceram uma contribuição positiva para Phi do BAT13 foram ICD com maior peso sobre os demais, ICV e IGR. Outros critérios como o ICT, IPT e o IBR ofereceram uma contribuição negativa de Phi. O resultado líquido de Phi é a soma dos valores positivos e negativos de todos os critérios e é assinalado em uma área cinza que quanto maior e mais positiva maior é a fragilidade e prioridade de substituição do banco de baterias em análise.

O BAT13 apresenta uma capacidade de descarga de 12%, com 2009 o ano de fabricação e a inexistência de gerador diesel como forma de fonte auxiliar em uma subestação de regular importância para o sistema elétrico.

Figura 5.3 - Contribuição individual dos critérios do BAT13 no fluxo Phi do IFO

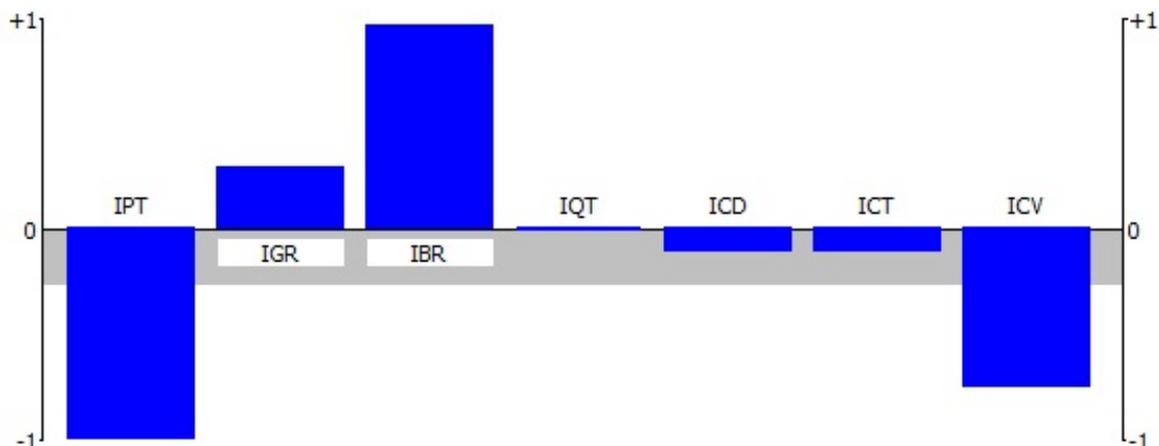


Fonte: O autor.

O Φ mais negativo da Tabela 5.3 pertence ao banco de baterias BAT16 da SE I que está destacado em cinza na posição 25 do ranking. Este é o banco de baterias com menor fragilidade e prioridade de substituição dentre os demais e apresenta $\Phi = -0,2631$.

A contribuição individual de cada critério com o fluxo Phi está exibida na Figura 5.4. O Phi do IFO está destacado em cinza que quanto maior e mais negativa indica uma menor fragilidade e prioridade de substituição em comparação com os demais bancos de baterias. Os critérios que mais contribuíram para colocar o banco de bateria em última colocação na classificação foram IPT e ICV. A subestação onde está localizado o BAT16 não possui banco de bateria e gerador reservas. Isso provoca uma forte contribuição de IBR e uma pequena contribuição de IGR. Mesmo assim, o BAT16 assumiu a última colocação na classificação de vulnerabilidade por ser 2018 o ano de fabricação e estar em uma subestação de pequena potência.

Figura 5.4 - Contribuição individual dos critérios do BAT16 no fluxo Phi do IFO

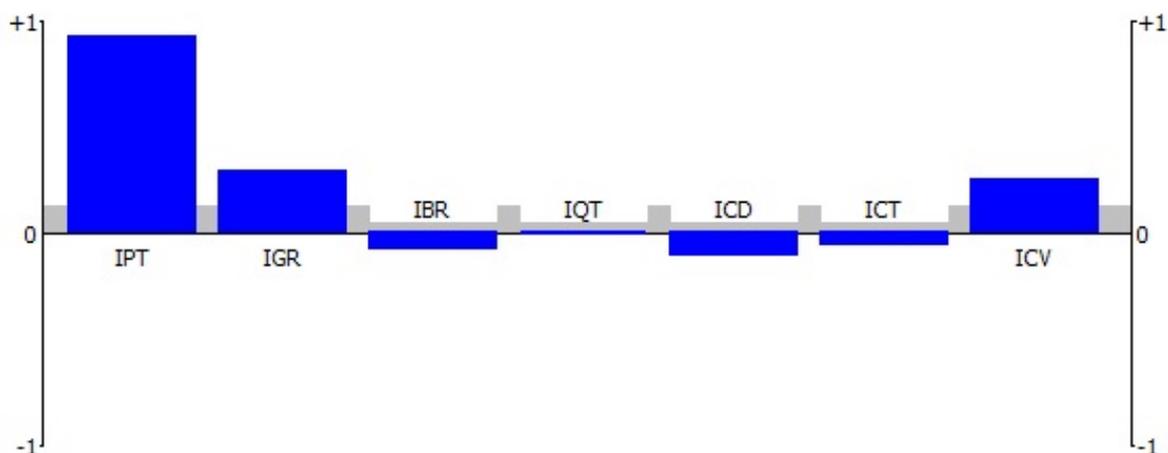


Fonte: O autor.

Na posição número 3 da Tabela 5.3 em prioridade de substituição está o BAT20 da subestação M de 300 MVA de potência transformada. A subestação M possui igualmente um banco de baterias reserva e uma potência transformada de aproximadamente o dobro da subestação G que apresenta o BAT13 com maior fragilidade. O BAT20 tem um baixo ICT sendo necessária a remoção do elemento de menor condutância. Mas possui uma posição anterior ao BAT13 por estar com uma elevada capacidade de descarga observada através do valor de ICD.

O critério IPT tem uma forte contribuição positiva no Phi seguido por IGR e ICV. Os critérios IBR, ICD e ICT contribuem com um valor negativo de Phi. O resultado das contribuições dos valores positivos e negativos de Phi é um valor três vezes menor do que o BAT13 destacado em cinza na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Contribuição individual dos critérios do BAT20 no fluxo Phi do IFO

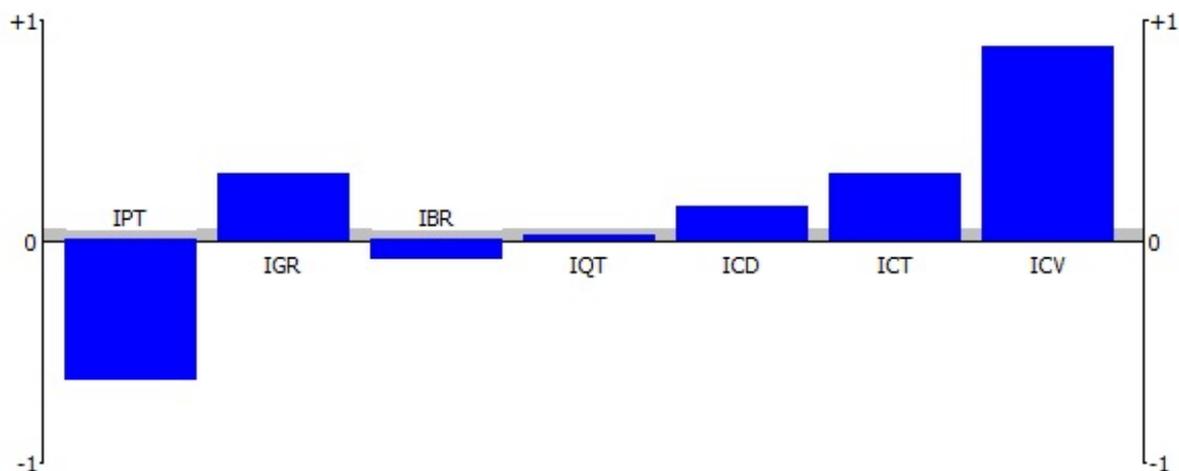


Fonte: O autor.

A subestação C possui dois bancos de baterias com o mesmo tempo de operação. Um encontra-se na posição 4 e outro na posição 8 da classificação da Tabela 5.3.

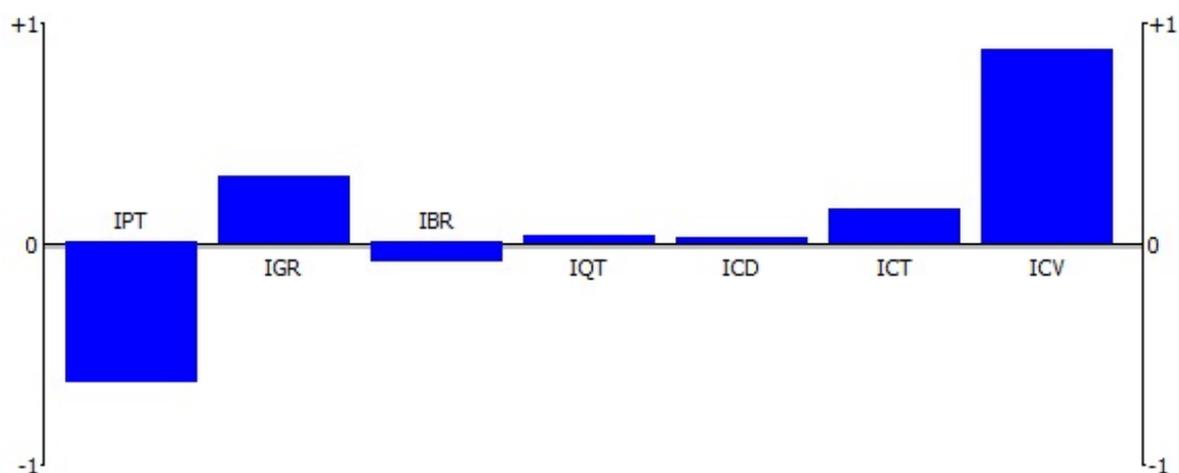
Tanto o BAT5 quanto o BAT6 apresentaram os mesmos valores para IPT, IGR, IBR, IQT e ICV. A diferença está na contribuição ICT e ICV no BAT5 que resulta em um Phi líquido maior do que BAT6. Os ensaios de capacidade de descarga e medida de capacitância foram determinantes na tomada de decisão em classificar os dois bancos de baterias. O BAT5 e BAT6 apresentam para o ICD, 80% e 90%, respectivamente. Enquanto no ICT apresentam 61% e 70%, respectivamente. A contribuição de cada critério no BAT5 pode ser observada na Figura 5.6 e na Figura 5.7 a contribuição para o BAT6. O BAT5 possui um Phi 3,66 vezes maior do que BAT6 resultando em uma maior fragilidade e prioridade de substituição.

Figura 5.6 - Contribuição individual dos critérios do BAT5 no fluxo Phi do IFO



Fonte: O autor.

Figura 5.7 - Contribuição individual dos critérios do BAT6 no fluxo Phi do IFO



Fonte: O autor.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o modelo de análise para o IFO que constitui de um método de avaliação dos bancos de baterias de subestações.

O método contempla dois critérios, SO e ST, cuja associação é obtida o IFO. Os critérios SO e ST representam, respectivamente, as características funcionais e físicas do banco de baterias.

O IFO obtido através destes dois critérios é reproduzido pelos valores do histograma que estão entre (-1) e (+1) e possui relação a uma pontuação que mostra o nível de risco de falha do banco de baterias segundo os critérios analisados. Os valores mais superiores do IFO representam os bancos de baterias com maiores riscos de falha, e em consequência, com maiores prioridades de manutenção.

As subestações e os bancos de baterias que integram o conjunto de amostras para o estudo sugerido neste trabalho foram exibidos neste capítulo juntamente com os dados referente à situação de equipamento e situação operacional de cada banco de baterias e os cálculos dos índices que compõem o IFO. Por último, uma apresentação da companhia de energia elétrica.

6. CONCLUSÃO

Esta dissertação tem como objetivo estabelecer através de uma análise multicriterial, a priorização de manutenção de bancos de baterias em subestações de concessionárias de energia.

O banco de bateria é o equipamento com um dos menores valores financeiros de aquisição do MCPSE, mas de alta importância na subestação. A utilização da metodologia torna fácil e segura a escolha do banco de baterias para substituição.

A comunidade de pesquisa tem dedicado seu tempo a encontrar metodologias para auxiliar na decisão de manutenção. Técnicas de monitoramento como contagem de Coulomb, tensão de circuito aberto, potência disponível, carga e descarga com corrente e tensão constante, etc. São métodos elaborados para a identificação da atual situação de equipamento e operacional do equipamento e assim estimar o seu fim de vida.

As publicações pesquisadas não citam critérios operacionais como bateria e gerador diesel reservas. Estes são critérios importantes na hora da substituição do banco de baterias, pois permitem a postergação ou substituição de um banco de baterias. A postergação dá-se com o equipamento localizado em subestação de menor importância no setor elétrico e aceleração com equipamento de maior importância.

A utilização de um método eficiente no auxílio do processo de decisão faz-se necessária haja vista a quantidade de fatores qualitativos e quantitativos que estão incluídos nesta decisão. Uma pesquisa bibliográfica é realizada referente aos métodos ADMC e chegando ao método Francês PROMETHEE que é especialista na elaboração de *ranking*. Entretanto, verificou-se algumas deficiências deste método como na definição dos pesos dos critérios. Então para complementar esta deficiência fora inserido o método AHP na metodologia proposta para definir os pesos dos critérios.

Como resultado deste trabalho, os critérios denominados Critério Situação Operacional (CSO) e Critério Situação de Equipamento (CSE) permite-se elaborar o

Indicador de Fragilidade Operacional (IFO) desta forma aumentando o nível de acerto na escolha do banco de baterias a receber manutenção.

Os critérios banco de baterias, gerador diesel reserva e potência de subestação que compõem o indicador situação operacional garantem uma maior confiabilidade e importância ao sistema elétrico.

A vida útil de uma bateria apresenta um fator importante na metodologia, pois, segundo os resultados apresentados pelo IFO as baterias mais velhas não são necessariamente as que necessitam de maior atenção. A localização é importante, pois baterias de mesmo ano e subestação têm prioridades diferentes de manutenção.

6.1. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Como sugestões de desenvolvimento futuro deste trabalho, propõe-se as seguintes abordagens:

- Criar de uma classificação de defeitos e soluções para bancos de baterias;
- Considerar os monetários como a RAP (Receita Anual Permitida) na substituição dos bancos de baterias;
- Considerar o número de consumidores pertencentes a cada subestação na priorização dos bancos de baterias;
- Incorporar a análise das falhas mais rotineiras dos bancos de baterias;
- Incorporar análise de medidas de grandezas em tempo real.

6.2. TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO

- PEREIRA, E. P.; ABAIDE, A. R. **Indicador de Fragilidade Operacional para Priorização e Substituição de Baterias de Chumbo Ácido Ventilada em Subestação**. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VIII SBSE), 2020, Santo André.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Nbr 14199 - Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado - Ensaio. p. 1–11, 1998.
- ANEEL. Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação. v. 1, p. 363, 2000.
- ANEEL. Resolução Normativa Nº 643/2014. p. 5, 2014.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 729 de 28 de junho de 2016. p. 16, 2016.
- ARAUJO LEÃO, J. F. et al. Lead-acid battery modeling and state of charge monitoring. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, n. 1, p. 239–243, 2010.
- BECK, R. et al. Evaluation of the relationship between conductance and capacity measurements of VRLA batteries in Brazil. **INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference**, p. 593–596, 19 out. 2004.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS An Integrated Approach**. Boston, MA: Springer US, 2002. v. 233
- BERNARDON, D. P. et al. Allocation of remotely controlled switches for reliability assessment in distribution networks. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**, v. 2015-Novem, n. L, 2015.
- BRANS, J.-P. et al. Promethee Methods. In: **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Londres: Springer, 2005. p. 163–186.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, chapter Promethee methods. **International Series in Operations Research & Management Science**, v. 233, p. 1355, 2005.
- CEEE-GT. **CEEE-GT em números**. Disponível em: <<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1754>>.
- CHEN, S. et al. A method for SOC estimation for lead-acid battery based on multi-model adaptive Extended Kalman Filtering estimation. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, p. 18–24, 2016.
- DANG, X. et al. Open-Circuit Voltage-Based State of Charge Estimation of Lithium-ion Battery Using Dual Neural Network Fusion Battery Model. **Electrochimica Acta**, v. 188, p. 356–366, 2016.
- DHILLON, B. S. **Reliability, Quality, and Safety for Engineers**. 1. ed. Ottawa: CRC Press LLC, 2005.
- DHILLON, B. S.; FASHANDI, A. R. M.; LIU, K. L. Robot systems reliability and safety: A review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 3, p. 170–212, 2002.
- ELSAYED, A. T.; LASHWAY, C. R.; MOHAMMED, O. A. Advanced Battery Management and Diagnostic System for Smart Grid Infrastructure. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 2, p. 897–905, 2016.
- FÁTIMA, M. et al. Stationary lead-acid batteries maintenance management system. **INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)**, 2010.
- GRECO, S.; EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J. R. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. New York, NY: Springer New York, 2016. v. 1 e 2
- HLAVAC, M. J. et al. Testing 24 volt aircraft batteries using Midtronics conductance technology. p. 25–32, 2002.

HUET, F. A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries. **Journal of Power Sources**, v. 70, n. 1, p. 59–69, 1998.

IEEE STD 450. **Recommended Practice for Maintenance , Testing , and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications**. 2010. ed. New York: IEEE, 2010.

IGNATIUS, J. et al. Financial performance of Iran's Automotive sector based on PROMETHEE II. **2012 IEEE 6th International Conference on Management of Innovation and Technology, ICMIT 2012**, 2012.

INTERFACE, A. IEEE Recommended Practice for Installation Design and Installation of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications. v. 2002, n. August, p. 1–122, 2003.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L. **Multi-criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design**. 1. ed. Waltham: Elsevier, 2013.

KAMBLE, S. G.; VADIRAJACHARYA, K.; PATIL, U. V. Decision making in distribution system using improved AHP-PROMETHEE method. **Proceedings of the International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2017**, v. 2018-Janua, n. Iccmc, p. 279–283, 2018.

KARIM, R.; DING, C.; CHI, C.-H. **An enhanced PROMETHEE model for QoS-based web service selection**. Proceedings - 2011 IEEE International Conference on Services Computing, SCC 2011. **Anais...2011**

KIM, J.; CHO, B. H. **State-of-charge estimation and state-of-health prediction of a Li-Ion degraded battery based on an EKF combined with a per-unit system** IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011.

KITTUR, J. Using the PROMETHEE and TOPSIS multi-criteria decision making methods to evaluate optimal generation. **Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Power and Advanced Control Engineering, ICPACE 2015**, p. 80–85, 2015.

KUBLER, S. et al. A state-of the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. **Expert Systems with Applications**, v. 65, p. 398–422, dez. 2016.

LI, T.; LI, Y.; ZHAO, H. The method for fault risk assessment of distribution equipment. **China International Conference on Electricity Distribution, CICED**, v. 2014-Decem, n. Ciced, p. 517–521, 2014.

LIN, H.; LIANG, T.; CHEN, S. Estimation of Battery State of Health Using Probabilistic Neural Network. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 2, p. 679–685, maio 2013.

LIU, X. et al. A new dynamic SOH estimation of lead-acid battery for substation application. **International Journal of Energy Research**, v. 41, n. 4, p. 579–592, 25 mar. 2017.

NAKAJO, K. et al. On-line measurement system for internal resistance in lead acid battery. **2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE 2016**, p. 103–108, 2016.

NAKJUY, K.; KHOMFOI, S. Battery Monitoring System for DC Distribution in a Substation Using Travelling Wave Theory. **IEEECON 2018 - 6th International Electrical Engineering Congress**, p. 1–4, 2018.

O. FEDER, D.; J. HLAVAC, M.; KOSTER, W. Evaluating the state-of-health of flooded and valve-regulated lead/acid batteries. A comparison of conductance testing with traditional methods. **Journal of Power Sources**, v. 46, n. 2–3, p. 391–

415, 1993.

ONS. Submódulo 2.3 - Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos. **Procedimentos de Rede**, p. 1–18, 2011.

PFITSCHER, L. L. et al. Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time. **Electric Power Systems Research**, v. 97, p. 84–92, abr. 2013.

S. ABBAS, M.; KOCAOGLU, D. F. **Consistency thresholds for Hierarchical Decision Model**. 2016

SAATY, T. **The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. Pittsburgh: McGraw-Hill, 1980.

SAYEED, H. et al. Lead acid battery monitoring and charging system for backup generators. **1st International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques, ICREST 2019**, v. 2019- Janua, p. 263–268, 2019.

SCHMITZ, W. I. et al. Operational vulnerability indicator for prioritization and replacement of power transformers in substation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 102, p. 60–70, nov. 2018.

SHAHRIARI, M.; FARROKHI, M. State of health estimation of VRLA batteries using fuzzy logic. **Proceedings - 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2010**, p. 629–634, 2010.

SOARES, B. N.; DA ROSA ABAIDE, A.; BERNARDON, D. Methodology for prioritizing investments in distribution networks electricity focusing on operational efficiency and regulatory aspects. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**, 2014.

SOBRIE, O. **Learning preferences with multiple-criteria models**. [s.l.] Université de Mons, 2016.

SUN, L. et al. Research on multi-attribute decision-making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 10, n. 15, p. 3855–3864, 2016.

SZUMANOWSKI, A.; CHANG, Y. Battery management system based on battery nonlinear dynamics modeling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 57, p. 1425–1432, 2008.

TAILLANDIER, P.; STINCKWICH, S. Using the PROMETHEE multi-criteria decision making method to define new exploration strategies for rescue robots. **9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSR 2011**, p. 321–326, 2011.

TRINANDANA, G. A. et al. Real Time State of Charge Estimation for Lead Acid Battery Using Artificial Neural Network. n. 1, p. 363–368, 2020.

VENANCIO, L. A. et al. Development of Charge Level Monitoring of Lead-Acid Battery Bank for PV System using Fuzzy Logic in LabView. **2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2019**, 2019.

VIANNA, E. A. L. et al. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition. **Electric Power Systems Research**, v. 142, p. 36–46, jan. 2017.

W. E., J. Stationary Battery Guide: Design, Application, and Maintenance. v. 3, n. 3, p. 37–40, 2002.

WANG, T.-C.; Y. CHEN, L.; CHEN, Y.-H. **Applying Fuzzy PROMETHEE Method for Evaluating IS Outsourcing Suppliers**. 2008

WEBB, M. J. **Estimating Uncertainty Attributable to Inconsistent Pairwise Comparisons in the Analytic Hierarchy Process (AHP)**. [s.l.] The George Washington University, 2018.

XU, J. et al. A new evaluation method of the fault recovery scheme for medium-low voltage DC distribution network. **Proceedings - 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, ACPEE 2020**, p. 1730–1735, 2020.

ZHANG, W. et al. A Novel Remote VRLA Battery Capacity Check Scheme for Transformer Substation. **2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings**, n. 201805060000002, p. 2027–2033, 2019.

ZHOU, J. et al. Battery state of health estimation using the generalized regression neural network. **8th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)**, p. 1396–1400, 2015.

ANEXO A - BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO VENTILADA

As baterias de chumbo ácido ventilada são um dos mais antigos dispositivos de armazenamentos de energia. Ainda é utilizado em diversas aplicações mesmo passado mais de 140 anos de seu desenvolvimento. Possui baixo custo de aquisição, mas em compensação necessita de constante manutenção. O termo ventilada é utilizado para se diferenciar do tipo chumbo ácido de válvula regulada que teoricamente não necessita de manutenção.

Uma única célula consiste em placas positivas e negativas inseridas em recipientes construídos normalmente translúcidos ou transparentes para possibilitar a visualização do nível de eletrólito de ácido sulfúrico e os componentes internos. Uma típica célula de chumbo ácido ventilada é mostrada na Figura A.1.

Em cada célula existe um supressor de chamas, onde é realizada a ventilação. Um banco de baterias de chumbo ácido ventilado consiste em células individuais conectadas em série para fornecer uma tensão de saída desejada. Um banco de baterias de chumbo ácido ventilado é mostrado na Figura A.2.

Figura A.1 - Célula bateria de chumbo ácido ventilada



Fonte: O autor.

Figura A.2- Banco de baterias de chumbo ácido composto de 60 elementos



Fonte: O autor.

- Eletrólito

É uma mistura de ácido sulfúrico e água. O ácido sulfúrico, H_2SO_4 , é um composto ativo de hidrogênio, enxofre e oxigênio que se ioniza quase que por completamente quando adicionado à água. Não permanece intacto como moléculas de ácido sulfúrico e se dividem em íons de hidrogênio e sulfato. Um íon de hidrogênio carrega uma carga elétrica positiva e um íon de sulfato carrega duas cargas elétricas negativas.

A gravidade específica (GE) é a medida da densidade de um líquido. A água pura tem gravidade específica de 1.000 kg/m^3 e tomada como referência para expressar a gravidade específica de outros líquidos. O eletrólito da bateria de chumbo ácido ventilada deve ter uma gravidade específica que varia entre 1.210 kg/m^3 a 1.240 kg/m^3 (IEEE STD 450, 2010).

O ácido sulfúrico puro tem uma gravidade específica de 1.840 kg/m^3 ou mais na temperatura ambiente. Água é adicionada no ácido sulfúrico para reduzir a gravidade específica da célula aos seus valores nominais.

- Tensão

A tensão em uma célula de chumbo ácido totalmente carregada tem uma tensão de circuito aberto (TCA) entre $2,05 \text{ V}$ a $2,15 \text{ V}$ com a variação da gravidade específica e da temperatura. A tensão de circuito aberto aumenta com o aumento da gravidade específica e diminui à medida que a temperatura diminui. Tem-se a relação com a gravidade específica da seguinte forma:

$$TCA = \textit{Gravidade Específica} + 0,845 \quad (\text{A.1})$$

A fim de permitir que a corrente flua através da célula, a tensão de flutuação de carregamento deve ser maior do que a tensão de circuito aberto. O valor da tensão de flutuação de carregamento está geralmente na faixa de 0,10 V a 0,20 V acima da tensão de circuito aberto em uma temperatura de 25° C e depende da gravidade específica e da temperatura (W. E., 2002).

Estes valores são para as tensões de células individuais. A tensão de carregamento de um banco de baterias é determinada através da multiplicação da tensão de flutuação de uma célula pela quantidade de células conectadas em sequência. Por exemplo, para uma tensão de flutuação de 2,24 V por célula, um banco de baterias com 60 células terá uma tensão de flutuação desejada de 134,4 V.

- Capacidade

A taxa com a qual é feita a descarga da bateria de chumbo ácido afeta diretamente o ampère-hora (Ah) que a bateria pode fornecer à carga. O incremento da taxa de descarga provoca a diminuição dos ampères-horas. É descrita como a quantidade de ampère-hora que a bateria pode fornecer por certo período antes que o valor da tensão caia abaixo de uma tensão mínima. A capacidade de uma bateria típica é mostrada no Quadro A.1. Uma carga de 250 ampères pode ser suprida por uma bateria com uma capacidade total de 2000 ampères-hora durante o período de 8 horas. Em contraste, uma carga de 950 ampères é suprida durante um período de uma hora.

Quadro A.1-Capacidade de uma bateria típica de chumbo ácido

Tempo de descarga (horas para atingir a tensão mínima)	Capacidade (ampère-hora)	Taxa efetiva de descarga (ampère)
8	2000	250
5	1800	360
3	1500	500
1	950	950

Fonte: O autor.

A capacidade da bateria depende da tensão mínima durante a descarga. O valor de 1,75 V é tomado como valor de tensão mínima de referência pelos fabricantes de baterias para determinar a capacidade de uma bateria a uma temperatura ambiente de 25°C. Em uma aplicação que necessite uma tensão mínima mais elevada, a capacidade da célula fica reduzida à medida que a tensão mínima aumenta. Os fabricantes de baterias fornecem tabelas e curvas que descrevem a capacidade da célula em função da taxa de descarga e da tensão mínima (W. E., 2002).

- Temperatura

A bateria de chumbo ácido é um dispositivo eletroquímico que possui características que variam com a temperatura. Uma temperatura de 25°C é tomada como referência pelos fabricantes de baterias para apresentar as informações de capacidade da bateria. Desta forma, uma padronização de temperatura é utilizada a fim de facilitar a interpretação do usuário na comparação com os dados fornecidos pelos fabricantes.

O desempenho da bateria é comprometido com a variação da temperatura. A operação em temperatura abaixo de 25°C aumenta a viscosidade do eletrólito. Isso provoca a diminuição de eficiência da reação química restringindo a circulação nas placas e como consequência provoca a diminuição da capacidade da bateria.

Quadro A.2 - Efeito da temperatura na capacidade da bateria

Temperatura do eletrólito (°C)	Capacidade disponível (%)	Temperatura do eletrólito (°C)	Capacidade disponível (%)
-3,9	66	26,7	102
-1,1	70	29,4	104
1,7	74	32,2	106
4,4	77	35	108
7,2	80	37,8	110
10	84	40,6	112
12,8	87	43,3	114
15,6	90	46,1	115
18,3	93	48,9	116
21,1	96	51,7	118

Fonte: (INTERFACE, 2003).

Uma operação em temperatura mais elevada do que a normal afeta a tensão de flutuação da bateria das seguintes maneiras: aumenta a taxa de descarga interna e aumenta a corrente de carga para uma determinada tensão de carga ocasionando uma potencial sobrecarga.

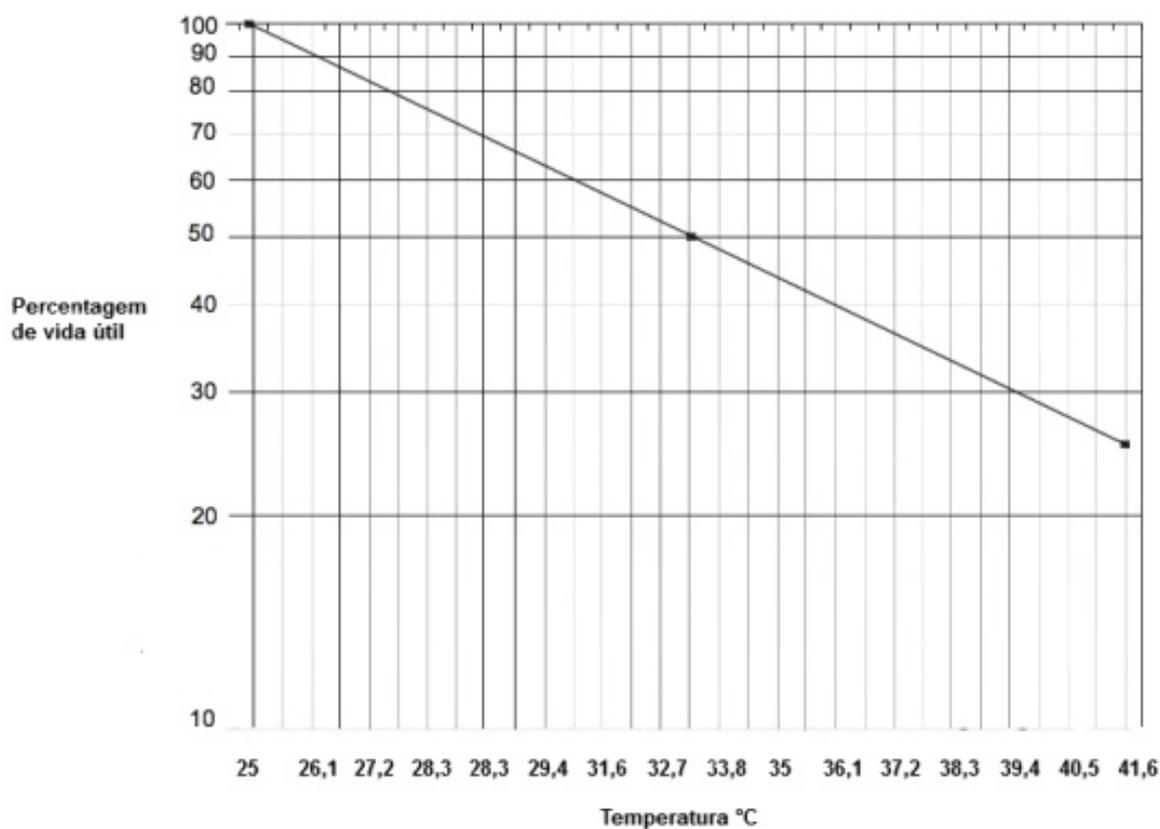
Uma bateria de chumbo ácido é um dispositivo cujas características variam com a temperatura. O calor acelera e o frio retarda a atividade química.

A elevação da temperatura do eletrólito acima de 25° C durante longo tempo reduz exponencialmente a vida útil da bateria devida à corrosão acelerada das placas positivas. Assim, em operação normal o banco de baterias necessita estar em uma sala com um controle de temperatura próxima de 25° C e livre de incidência de luz solar.

Uma regra geral para as baterias de chumbo ácido ventiladas é que para cada elevação de 9,4°C acima dos 25°C a vida útil é reduzida em 50% (W. E., 2002). A

Figura A.3 mostra a redução esperada na vida útil em função da temperatura.

Figura A.3 -Efeito da temperatura na vida útil de bateria de chumbo acido



Fonte: (INTERFACE, 2003).