

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Samuel Pereira da Rocha

**ABORDAGEM FUZZY PARA INTEGRAÇÃO E
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE MOBILIDADE
ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Belo Horizonte

2022

Samuel Pereira da Rocha

**ABORDAGEM FUZZY PARA INTEGRAÇÃO E
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE MOBILIDADE
ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Petr Iakovlevitch Ekel
Coorientador: Dr. Sidelmo Magalhães Silva

Belo Horizonte

2022

R672a

Rocha, Samuel Pereira da.

Abordagem fuzzy para integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica em redes de distribuição [recurso eletrônico] / Samuel Pereira da Rocha. - 2022.

1 recurso online (193 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Petr Iakovlevitch Ekel.

Coorientador: Sidelmo Magalhães Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 161-193.

Bibliografia: f. 137-160.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Conjuntos difusos – Teses. 3. Energia – Teses. 4. Baterias – Teses. I. Ekel, Petr Iakovlevitch. II. Silva, Sidelmo Magalhães. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ABORDAGEM FUZZY PARA INTEGRAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE MOBILIDADE ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO"

SAMUEL PEREIRA DA ROCHA

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 16 de dezembro de 2022. Por:

Prof. Ph.D. Petr Iakovlevitch Ekel
PPGEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Douglas Alexandre Gomes Vieira
ENACOM (Enacom Handcrafted Technologies)

Dra. Lívia Maria Leite da Silva
Engenharia (Thunders Tecnologia)

Prof. Dr. Alessandro Fernandes Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica (UFMG)

Prof. Dr. Igor Amariz Pires
Departamento de Engenharia Eletrônica (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Petr Iakovlevitch Ekel, Usuário Externo**, em 19/12/2022, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alessandro Fernandes Moreira, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2022, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidelmo Magalhaes Silva, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2022, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2022, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Braz de Jesus Cardoso Filho, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2022, às 17:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Livia Maria Leite da Silva, Usuária Externa**, em 21/12/2022, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Alexandre Gomes Vieira, Usuário Externo**, em 29/12/2022, às 20:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1953648** e o código CRC **D4DFB1DA**.

Este trabalho é dedicado a todos que apoiaram direta ou indiretamente esta pesquisa e que tiveram sua contribuição transformada em alguma parte desta tese de doutorado.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele nada disso seria possível.

A minha família, especialmente à minha mãe Maria Odete e ao meu pai José Cândido que criaram condições favoráveis para que um dia eu conseguisse cumprir esta importante etapa da minha vida.

A minha esposa Fernanda Gomes, pelo apoio incondicional transmitido através de votos de força e vibração em relação a esta jornada.

Aos professores do PPGEE e especialmente aos meus orientadores Petr Ekel e Sidelmo Silva por terem me passado além do conhecimento técnico, o conhecimento humano através de imensurável humildade e paciência. Agradeço também por conseguirem despertar em mim o caráter investigativo, sem o qual este trabalho jamais seria concluído.

Aos membros da banca examinadora, que tiveram imensa contribuição para o enriquecimento técnico do trabalho: Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho, Prof. Dr. Douglas Alexandre Gomes Vieira, Prof. Dra. Lívia Maria Leite da Silva e Prof. Dr. Alessandro Fernandes Moreira.

Aos colegas da UFMG, pelas discussões produtivas e pela grande ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas da CEMIG, pela motivação inicial para a execução deste trabalho e pela concessão de informações valiosas para este estudo.

“O real não está na saída nem na chegada: ele se dispõe para a gente é no meio da travessia.”

João Guimarães Rosa

Resumo

O processo de transição da matriz energética dos sistemas de transporte público para fontes mais limpas é um assunto que vem ganhando bastante relevância nos últimos anos. Principalmente devido a preocupação ambiental, essa transição vem ocorrendo em muitos países com a introdução progressiva de ônibus elétricos nos sistemas de mobilidade de grandes centros urbanos na Europa, Estados Unidos e China. No entanto, esse processo de substituição de sistemas de ônibus à diesel por elétricos abre grandes questionamentos com relação, tanto à sua viabilidade econômica, quanto à melhor forma de se realizar essa transição tecnológica. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma abordagem de solução em dois estágios por meio de uma metodologia de tomada de decisão multiobjetivo e uma estratégia *fuzzy* de gerenciamento energético para realizar a implantação e operação ótima de um sistema de mobilidade elétrica em uma rede de distribuição de energia. A integração é obtida por meio de critérios de avaliação econômica para cálculo do custo mínimo do sistema, considerando investimentos, despesas e depreciação dos ativos. A operação é avaliada levando em conta a autonomia do veículo, os impactos na rede de distribuição e sua eficiência energética. Os resultados são demonstrados em dois estudos de caso reais de ônibus elétricos por meio de recargas rápidas regulares, considerando vários cenários e diferentes políticas de mobilidade elétrica. É realizado o dimensionamento do sistema de armazenagem e a definição do número e o local das estações de recarga, levando em conta as características e as variações de demanda exigidas pelo veículo, o número de paradas e as condições topográficas do trajeto.

Palavras-chave: Conjuntos *fuzzy*. Tomada de decisão multiobjetivo. Gerenciamento energético. Carregamento ultrarrápido. Baterias. Ultracapacitores.

Abstract

The process of transition from energy sources to public transport systems for cleaner fuels is a subject that has been gaining considerable relevance in recent years. Mainly due to environmental concerns, this phenomenon is occurring worldwide through the progressive introduction of electric buses in the mobility systems of large urban centers in Europe, the United States, and China. However, this process of replacing diesel bus systems with electric ones opens up significant questions regarding their economic viability and the best way to make this technological transition possible. In this context, this work presents a two-stage solution approach using a multi-objective decision-making methodology and a *fuzzy* energy management strategy to carry out the integration and operation of an electric mobility system in a power distribution grid. Integration is achieved by economic evaluation criteria, calculating the minimum cost of the system, and considering investments, expenses, and depreciation of assets. The operation is evaluated by taking into account the range of the vehicle, the impacts caused on the distribution grid, and its energy efficiency. The results are validated in two real electric bus systems using ultra-fast charging, considering various scenarios and different electric mobility policies. The storage system is sized and the number and location of the charging stations are defined, taking into account the characteristics and demand variations required by the vehicle, the number of stops, and the topographic conditions of the route.

Keywords: Fuzzy sets. Multiobjective decision making. Energy management system. Ultra-fast charging. Batteries. Ultracapacitors.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Principais marcos históricos da mobilidade elétrica.	24
Figura 2 – Evolução da venda de veículos elétricos no mundo.	25
Figura 3 – Contribuição dos ônibus elétricos na redução de CO_2 na atmosfera. . .	27
Figura 4 – Tipos de incerteza e métodos de consideração.	41
Figura 5 – Fluxograma do processo de tomada de decisão multiobjetivo.	48
Figura 6 – Valor presente de um valor único v	54
Figura 7 – Valor presente de uma série uniforme de n pagamentos.	55
Figura 8 – Valor presente de uma série crescente de n pagamentos.	55
Figura 9 – Sistema especialista <i>fuzzy</i> linguístico.	65
Figura 10 – Esquema de controle <i>fuzzy</i> para o veículo elétrico.	67
Figura 11 – Função de pertinência da entrada 1.	69
Figura 12 – Função de pertinência da entrada 2.	69
Figura 13 – Função de pertinência da entrada 3.	70
Figura 14 – Função de pertinência da entrada 4.	70
Figura 15 – Função de pertinência da saída.	71
Figura 16 – P_{ref} vs. velocidade vs. SOE_{UCap}	73
Figura 17 – P_{ref} vs. inclinação vs. SOE_{UCap}	74
Figura 18 – P_{ref} vs. SOE_{UCap} vs. $Tensao_{UCap}$	75
Figura 19 – P_{ref} vs. inclinação vs. velocidade.	76
Figura 20 – Esquema de mobilidade elétrica e sua interação com a rede.	77
Figura 21 – Forças de resistência ao movimento de um veículo.	78
Figura 22 – Circuito equivalente de um ultracapacitor.	79
Figura 23 – Circuito equivalente de uma bateria.	81
Figura 24 – Principais componentes do carregador pantográfico.	84
Figura 25 – Representação da estrutura de recarga SAE-J3150.	85
Figura 26 – Diagrama representativo da conexão da estação à rede elétrica.	86
Figura 27 – Conversor c.a./c.c. para conexão com a rede.	87
Figura 28 – Trajeto do ônibus elétrico no campus da UFMG.	101
Figura 29 – Elevação do terreno.	103
Figura 30 – Velocidade do veículo.	103
Figura 31 – Ônibus Iveco Daily Electric.	104

Figura 32 – Potência requerida pelo veículo.	105
Figura 33 – Alocação das estações de recarga e obtenção de solução racional.	110
Figura 34 – Demanda total do alimentador após conexão das estações	111
Figura 35 – Detalhe da demanda total do alimentador às 15:00	112
Figura 36 – Perfil de tensão do alimentador com estações de recarga	113
Figura 37 – Comando de potência do ultracapacitor.	115
Figura 38 – Comando de potência da bateria.	116
Figura 39 – SOE do ultracapacitor.	116
Figura 40 – SOC da bateria.	117
Figura 41 – Ônibus à diesel que atualmente atende o BH-Tec	119
Figura 42 – Rota do ônibus de circulação interna e alimentadores de média tensão.	120
Figura 43 – Elevação do terreno.	122
Figura 44 – Tecnologia de bateria NCM	123
Figura 45 – Tecnologia de bateria LFMP	123
Figura 46 – Ônibus ABB TOSA.	124
Figura 47 – Alocação das estações de recarga e obtenção de solução racional.	126
Figura 48 – Tensão do alimentador com estações de recarga	128
Figura 49 – Velocidade do veículo.	129
Figura 50 – Potência requerida pelo veículo.	130
Figura 51 – Comando de potência do 1 ^o estágio de bateria (LFMP).	130
Figura 52 – Comando de potência do 2 ^o estágio de bateria (NCM).	131
Figura 53 – SOC da bateria 1.	131
Figura 54 – SOC da bateria 2.	132
Figura 55 – Visão geral da simulação no Matlab Simulink.	162
Figura 56 – Dinâmica do veículo elétrico.	163
Figura 57 – Visão da modelagem do ônibus elétrico.	164
Figura 58 – Modelagem do conversor de potência c.c./c.c. bidirecional	165
Figura 59 – Conversor c.c./c.c. bidirecional básico.	166
Figura 60 – Operação <i>boost</i> do conversor bidirecional.	167
Figura 61 – Operação <i>buck</i> do conversor bidirecional.	168
Figura 62 – Modulação por largura de pulso (PWM).	169
Figura 63 – Visão da modelagem do sistema de armazenagem	170
Figura 64 – Visão da modelagem do sistema especialista <i>fuzzy</i>	171
Figura 65 – Estrutura de programação do OpenDSS.	172
Figura 66 – Modelo do OpenDSS para os elementos de conversão de potência.	178
Figura 67 – Princípio de cálculo do OpenDSS.	179

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Planejamento da migração para mobilidade elétrica.	26
Tabela 2 – Revisão bibliográfica.	36
Tabela 3 – Relação de custos fixos, variáveis e sua volatilidade.	62
Tabela 4 – Comparativo entre estruturas de recarga.	82
Tabela 5 – Comparativo entre tempos de carregamento <i>plug-in</i>	83
Tabela 6 – Níveis de tensão adequados, precários e críticos.	88
Tabela 7 – Matriz <i>payoff</i>	93
Tabela 8 – Matriz <i>payoff</i> com estimativas características	95
Tabela 9 – Matriz de riscos.	96
Tabela 10 – Matriz <i>payoff</i> modificada para o p -ésimo critério.	97
Tabela 11 – Matriz <i>payoff</i> agregada com estimativas características	98
Tabela 12 – Dados elétricos da rede de distribuição.	102
Tabela 13 – Custos para extensão de rede de distribuição.	102
Tabela 14 – Parâmetros dinâmicos do ônibus elétrico.	104
Tabela 15 – Cenários e políticas de mobilidade elétrica.	106
Tabela 16 – Parâmetros financeiros para ônibus elétrico e diesel.	107
Tabela 17 – Resultados para diferentes cenários.	108
Tabela 18 – Especificação do sistema de armazenagem de energia.	114
Tabela 19 – Desempenho do sistema de armazenagem de energia.	114
Tabela 20 – Dados elétricos da rede de distribuição.	121
Tabela 21 – Parâmetros dinâmicos do ônibus elétrico.	124
Tabela 22 – Funções objetivo do problema	125
Tabela 23 – Especificação do sistema de armazenagem de energia.	127
Tabela 24 – Desempenho do sistema de armazenagem de energia.	127
Tabela 25 – Características operacionais do conversor bidirecional básico.	166
Tabela 26 – Parâmetros para modelagem da subestação.	173
Tabela 27 – Parâmetros para modelagem dos condutores elétricos.	174
Tabela 28 – Parâmetros para modelagem dos transformadores.	175
Tabela 29 – Parâmetros para modelagem das cargas.	175
Tabela 30 – Parâmetros para modelagem das usinas fotovoltaicas.	176
Tabela 31 – Parâmetros para modelagem dos sistemas de armazenagem.	177

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC	Análise Computacional
AF	Análise Financeira
AFE	<i>Active Front End</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CAPEX	<i>CAPital EXpenditures</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CMPD	Custo Médio Ponderado de Capital
COM	<i>Component Object Model</i>
CP	<i>Control Pilot</i>
CTP	Custo Total de Propriedade
DLL	<i>Dynamic Link Library</i>
ELECTRE	<i>ELimination Et Choice Translating REality</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
FEMS	<i>Fuzzy Energy Management System</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HFS	<i>Hesitant Fuzzy Set</i>
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LFMP	Lítio Ferro Manganês Phosphato
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MF	<i>Membership Function</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MOORA	<i>Multi Objective Optimization on the basis of a Ratio Analysis</i>

MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCM	Níquel Cobalto Manganês
NRECA	<i>National Rural Electric Cooperative Association</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
OPEX	<i>Operational Expenditures</i>
PRODIST	PRO cedimentos de DIST ribuição
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QSS	<i>Quota Sampling Strategy</i>
QSTS	<i>Quasi-Static Timeseries Simulation</i>
RED	R ecursos E nergéticos D istribuídos
SAEB	S istema de A rmazenagem de E nergia a B ateria
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SIF	S istema de I nterferência F uzzy
SOC	<i>State of Charge</i> - Estado de Carga
SOE	<i>State of Energy</i> - Estado de Energia
TCRP	<i>Transit Cooperative Research Program</i>
TS	<i>Takagi - Sugeno</i>
TD	T omador de D ecisão
TDMA	T omada de D ecisão M ultiatributo
TDMC	T omada de D ecisão M ulticritério
TDMO	T omada de D ecisão M ultiobjetivo
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TIR	T axa I nterna de R etorno
TUPF	<i>True Unity Power Factor</i>
UFV	U sina F otovoltaica
VPC	V alor P resente C omposto
VPL	V alor P resente L íquido
VPS	V alor P resente S imples
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i>

Lista de Símbolos

a	Variável linguística <i>fuzzy</i> alto
A	Subconjunto <i>fuzzy</i> A pertencente ao universo U
A_f	Área da superfície frontal do veículo
$A_i(x)$	i -ésimo conjunto <i>fuzzy</i>
b	Variável linguística <i>fuzzy</i> baixo
C_{bus}	Custo de aquisição de ônibus elétrico
C_{adapt}	Custo de adaptações no veículo
C_{sto}	Custo de aquisição de sistema de armazenagem
C_{infra}	Custo de aquisição da infraestrutura de recarga
C_{res}	Valor residual dos ativos
C_0	Entrada de caixa inicial
C_t	Entrada de caixa líquida no período t
c_{bat}	Custo específico (R\$/kWh) da bateria
c_{hib}	Custo específico (R\$/kWh) de fonte híbrida
$c_{cha, fixed}$	Custos fixos de uma estação de carregamento
$c_{cha, var}$	Custos variáveis de uma estação de carregamento
C_{elec}	Custo de energia consumida
c_p	Percentual investido capital próprio
c_f	Percentual financiado capital terceiros
C_d	Coefficiente de arraste aerodinâmico
C	Capacitância do ultracapacitor
D_i	Distância da estação até o ponto de conexão na rede
$D_{contrat}$	Custo de demanda contratada
d	Taxa anual de desconto
D	Razão cíclica

dv/dt	Aceleração do veículo
E_{ch}	Energia consumida pela estação de recarga
e	Nó elétrico com estação de recarga
$f_i(k)$	i-ésima função objetivo
$F_p(X)$	Função objetivo modelo $\langle X F \rangle$
f_{ro}	Coefficiente de atrito do solo estudado
F_{aero}	Força aerodinâmica de arraste
F_{grav}	Força gravitacional
g	Aceleração da gravidade
h	Nó elétrico sem estação de recarga
i_{Th}	Corrente de Thevenin
I_α	Informação do tomador de decisão
i_{uc}	Corrente de descarga do ultracapacitor
I_{inj}	Corrente de injeção
j	Taxa de crescimento anual
k	Momento de tempo vetorial
K	Alternativas de solução
L	Região de soluções factíveis de R^n
$L_{add}(n, b)$	Perda de potência adicionada
L_{ini}	Perda inicial de energia
$\min \mu A_i(x)$	Nível mínimo da i-ésima função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> A
$\max \mu A_i(x)$	Nível máximo da i-ésima função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> A
m	Variável linguística <i>fuzzy</i> médio
ma	Variável linguística <i>fuzzy</i> muito alto
mb	Variável linguística <i>fuzzy</i> muito baixo
m_t	Massa total do veículo
MV_i	Valor de mercado dos ativos
n	Número de anos
N_{cell}	Número de células da bateria
N_{cap}	Quantidade de módulos do banco de ultracapacitores
$P_{refucap}$	Potência de referência do ultracapacitor

$P_{refbatt}$	Potência de referência da bateria
P_{arm}	Capacidade do sistema de armazenagem
P_{req}	Potência requerida pelo veículo
P_{bat}	Potência total de saída da bateria
r	Nível de risco
r_i	Taxa de retorno exigida para o investimento i
R_s	Resistência equivalente em série do ultracapacitor
R_L	Resistência equivalente em paralelo
R_o	Resistência interna da bateria
R_{Th}	Resistência equivalente de Thevenin
R_{Th}	Capacitância equivalente de Thevenin
S	Número definido de cenários
t_1	Tempo de pulso ativo
t_2	Tempo de pulso inativo
T_s	Tempo de pulso ativo e inativo
T	Período de tempo em anos nas análises financeiras
\vec{U}	Universo de solução vetorial <i>fuzzy</i>
\vec{u}	Sub-vetores de \vec{U}
v	Valor financeiro
V	Velocidade do veículo
V_{uc}	Tensão do ultracapacitor
V_0	Tensão de circuito aberto do ultracapacitor
v_{cmin}	Tensão mínima de saída do ultracapacitor
v_{cmax}	Tensão máxima de saída do ultracapacitor
$V_{uc}(t)$	Tensão de cada módulo do ultracapacitor no tempo t
V_{ctot}	Tensão total do banco de ultracapacitores
V_{oc}	Tensão de circuito aberto da bateria
V_{battot}	Tensão total da bateria
V_g	Tensão de saturação do transistor
x	Conjunto de alternativas de solução
x_k	Alternativa de solução k

X^W	Critério de Wald
X^L	Critério de Laplace
X^S	Critério de Savage
X^H	Critério de Hurwicz
Y_{prim}	Matriz de admitância constante
Y_S	Implicação de uma ação no cenário correspondente S
β	Ângulo de inclinação da via
η	Rendimento do veículo elétrico
η_{dc}	Eficiência de carregamento do ultracapacitor
λ_p	Fatores de importância das funções objetivo
$\mu : U(0, 1)$	Função de pertinência <i>fuzzy</i> no universo U
$\mu_{A_i}(x)$	i-ésima função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> A
$\mu(X)$	Grau de pertinência <i>fuzzy</i>
ρ_{air}	Densidade do ar
$\Omega \in L$	Conjunto de soluções ótimas de Pareto
ω	Frequência fundamental

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Contexto histórico	22
1.2	Relevância do tema	24
1.3	Desafios observados	29
1.4	Objetivos e delimitação do escopo	30
1.5	Contribuições da pesquisa	31
1.6	Organização da tese	32
2	Revisão bibliográfica	33
2.1	Sistemas de mobilidade elétrica e suas incertezas	33
2.2	Tomada de decisão em condições de incerteza	39
2.2.1	Tipos de dados com incerteza	40
2.2.1.1	Dados cardinais	41
2.2.1.2	Dados ordinais	41
2.2.2	Tipos de incertezas	42
2.2.2.1	Estocasticidade	42
2.2.2.2	Ambiguidade	43
2.2.2.3	Informação parcial	43
2.2.3	Técnicas usadas para modelar a incerteza	43
2.2.3.1	Teoria de Probabilidade	43
2.2.3.2	Teoria dos conjuntos <i>fuzzy</i>	44
2.2.3.3	Teoria evidencial	46
2.3	Conclusões	46
3	Integração do sistema de mobilidade elétrica	50
3.1	Tomada de decisão multiobjetivo	50
3.1.1	Funções objetivo	51
3.1.2	Critérios econômicos	54
3.1.2.1	Valor presente líquido	54
3.1.2.2	Custo total de propriedade	55
3.1.2.3	Custo médio ponderado de capital	56
3.1.2.4	Taxa interna de retorno	57
3.1.2.5	Estimativa de <i>payback</i>	57
3.1.3	Avaliação de custos	58
3.1.3.1	Custo de aquisição do ônibus elétrico	58
3.1.3.2	Custo do sistema de armazenagem	59
3.1.3.3	Custo da infraestrutura da estação de recarga	59
3.1.3.4	Custo de extensão da rede de distribuição	60

3.1.3.5	Custo de manutenção	60
3.1.3.6	Custo de energia	61
3.1.3.7	Custos totais	61
3.2	Conclusões	63
4	Operação e gerenciamento energético	64
4.1	Sistema especialista <i>fuzzy</i>	64
4.2	Modelagem do sistema de gerenciamento energético	66
4.3	Modelagem do sistema de mobilidade elétrica	77
4.3.1	Ônibus elétrico	78
4.3.1.1	Dinâmica do veículo	78
4.3.1.2	Ultracapacitor	79
4.3.1.3	Bateria	80
4.3.2	Estação de recarga	82
4.3.2.1	Estrutura de recarga	82
4.3.2.2	Carregador pantográfico	84
4.3.2.3	Conversor c.a./c.c.	85
4.4	Modelagem da rede de distribuição	87
4.4.1	Qualidade de energia	87
4.4.1.1	Variação de tensão na rede de distribuição	88
4.4.1.2	Perdas na rede de distribuição	89
4.5	Conclusões	89
5	Consideração da incerteza dos dados iniciais	91
5.1	Considerações Iniciais	91
5.2	Construção dos Cenários	92
5.3	Definição das Alternativas de Solução	92
5.4	Construção da Matriz <i>Payoff</i>	93
5.5	Matrizes <i>Payoff</i> e Seleção das Soluções Racionais	93
5.6	Análise das Regiões de Incerteza em Problemas Multiobjetivo	96
5.7	Conclusões	99
6	Estudo de caso I: Sistema de mobilidade elétrica da UFMG	100
6.1	Apresentação do sistema	100
6.2	Definição dos cenários	105
6.3	Parametrização do estudo	107
6.4	Resultados obtidos	108
6.5	Impactos na rede de distribuição	110
6.6	Discussão dos resultados	113
7	Estudo de caso II: Expansão do sistema e atendimento ao BH-Tec	118
7.1	Objetivo	118
7.2	Apresentação do Sistema	119

7.3	Aplicação das matrizes <i>payoff</i> para obtenção de soluções robustas	125
7.4	Resultados obtidos	126
7.5	Impactos na rede de distribuição	127
7.6	Discussão dos resultados	129
8	Conclusões	134
8.1	Considerações finais	134
8.2	Publicação realizada em periódico	136
8.3	Propostas de continuidade	136
	Referências	137
A	Modelagem dinâmica do sistema no Matlab Simulink	161
A.1	Sistema de mobilidade elétrica	161
A.2	Sistema dinâmico do ônibus elétrico	163
A.3	Sistema de armazenagem	165
A.4	Sistema especialista <i>fuzzy</i>	171
B	Modelagem dos elementos da rede no OpenDSS	172
B.1	Subestação	173
B.2	Condutores elétricos	173
B.3	Transformadores	174
B.4	Geradores fotovoltaicos	176
B.5	Sistemas de armazenagem	176
B.6	Fluxo de potência	177
C	Memória de cálculo da aplicação das matrizes <i>payoff</i>	180
C.1	Definição das matrizes <i>payoff</i>	181
C.2	Matrizes de risco	183
C.3	Cálculo das estimativas características	185
C.4	Critérios de escolha	188
C.5	Matriz de critérios agregada	190

Capítulo 1

Introdução

“All that was great in the past was ridiculed, condemned, combated, suppressed; only to emerge all the more powerfully, all the more triumphantly from the struggle.”

Nikola Tesla

Mobilidade elétrica é um tema que remonta à primeira metade do século XIX e que durante quase dois séculos foi esquecido pela sociedade. Nas últimas décadas, o assunto retorna ao interesse científico e diversos problemas precisam ser resolvidos para garantir o seu sucesso. Neste capítulo, é apresentado o contexto destes problemas, a relevância do tema e os objetivos do presente trabalho.

1.1 Contexto histórico

Quando o inventor norte-americano Thomas Davenport desenvolveu, no ano de 1834, o primeiro modelo de locomotiva movida à tração elétrica, o invento foi tratado com grande entusiasmo e por algumas décadas a mobilidade elétrica foi tema de exposições de engenharia e eletricidade do meio científico e acadêmico da época [Chan, 2007].

Em 1859, a bateria de chumbo ácido foi inventada pelo físico francês Gaston Planté, o que viabilizou o uso de sistemas de armazenagem de energia embarcados nos veículos, aumentando consideravelmente a sua autonomia. Em 1881, foi exposto na Exposition

Internationale d'Électricité, em Paris, o primeiro triciclo tracionado por um motor elétrico com bateria embarcada, e em 1884, Thomas Parker desenvolveu o primeiro carro elétrico disponível para aquisição por um cidadão comum [Høyer, 2008, Sulzberger, 2004].

O grande atrativo desses veículos para o público da época eram as vantagens relacionadas a ausência de vibrações, odores e ruídos associados com os veículos à vapor e a combustão interna. Na década de 1890 houve um crescimento expressivo do número de veículos elétricos no mundo, chegando a representar 38% de todos os veículos da época no fim do século XIX, sendo que a tração à vapor representava 40% e a motorização à gasolina somente 22% da totalidade de veículos. No início do século XX, foi atingido o número de 33.842 veículos elétricos no mundo, que na média possuíam autonomia de 60 km e atingiam a velocidade máxima de 20 a 30 km/h [Guarnieri, 2012, Høyer, 2008]. A figura 1 apresenta uma linha do tempo que mostra os marcos da evolução do sistemas de veículos elétricos (VE) em comparação com a hegemonia histórica dos veículos de combustão interna (VCI).

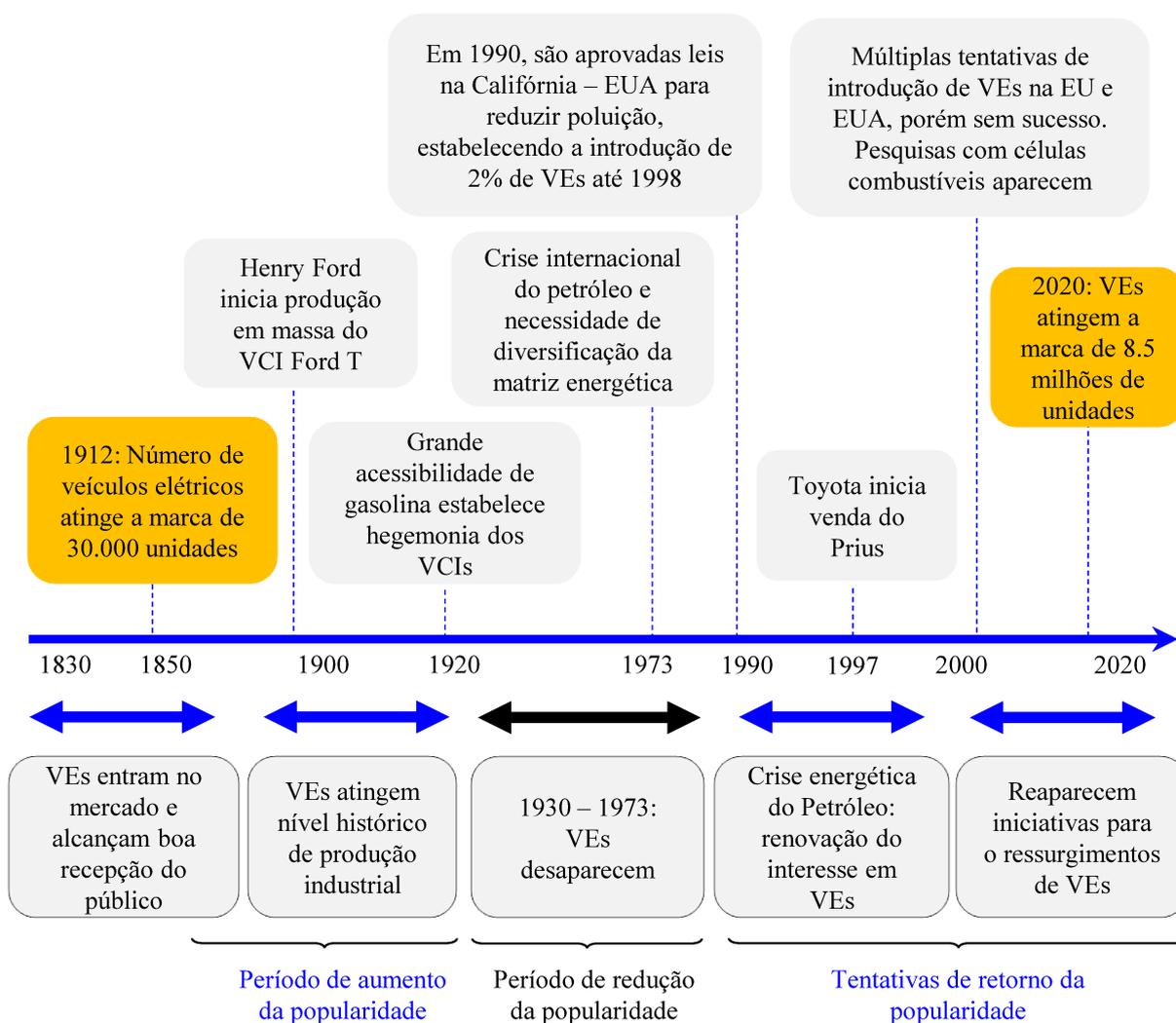
Na década de 1910 a ascensão dos veículos elétricos começou a encontrar alguns desafios. Devido a melhoria das condições das estradas intermunicipais, houve uma pressão da sociedade pelo aumento da autonomia dos veículos elétricos, que era bastante limitada pela tecnologia das baterias [Høyer, 2008]. Além disso, a concorrência com os veículos a combustão interna começava a crescer e estes, por sua vez, possuíam autonomia bastante elevada, bem como infraestrutura de abastecimento mais abrangente [Guarnieri, 2012].

Em 1912, Henry Ford tornou o veículo a combustão interna acessível para a população em geral. O *Model T*, primeiro veículo desenvolvido em uma linha de produção industrial, custava aproximadamente US\$ 650, enquanto um veículo elétrico com características similares custava cerca de US\$ 1750 [Guarnieri, 2012]. Essa diferença de preço somada à maior disponibilidade de infraestrutura de abastecimento de combustível foram fatores decisivos na escolha da população pelos veículos à gasolina. [Guarnieri, 2012, Høyer, 2008, Brown, 2010]

Em paralelo a isso, também em 1912, a partida elétrica inventada por Charles Kettering foi introduzido pela primeira vez em veículos Cadillac à combustão [Chan, 2007]. Esse fato trouxe maior segurança para os VCIs e a adesão a este tipo de veículo aumentou significativamente. O avanço das tecnologias do motor de combustão interna e a universalização da disponibilidade de postos de gasolina praticamente extinguiu a oferta de veículos elétricos nas décadas seguintes.

Apenas nas décadas de 1960 e 1970, a hegemonia dos veículos à combustão interna veio a sofrer algum tipo de ameaça devido à crise energética do petróleo e ao aumento expressivo do preço dos combustíveis. Novamente os veículos elétricos foram cogitados pela sociedade. Entretanto, os desafios relacionados à autonomia e tecnologias de baterias foram empecilhos limitantes no avanço da mobilidade elétrica [Høyer, 2008].

Figura 1 – Principais marcos históricos da mobilidade elétrica.



Fonte: Adaptado de [Ajanovic \[2015\]](#)

No início dos anos 2000, a temática mobilidade elétrica novamente vem à tona, mas dessa vez, a busca pela diversificação da matriz energética pode ter interesses além do econômico. Dessa vez, existe também uma preocupação relacionada aos impactos ambientais causados pela quantidade massiva de veículos a combustão interna nos grandes centros urbanos e aos níveis de emissões de poluentes na atmosfera.

1.2 Relevância do tema

Em virtude dos acordos climáticos assinados por diversos países e dos subsídios governamentais para as montadoras de veículos desenvolverem soluções ambientalmente mais limpas, a década de 2010 marcou o início de uma nova era para a mobilidade elétrica [[Covington, 2017](#)].

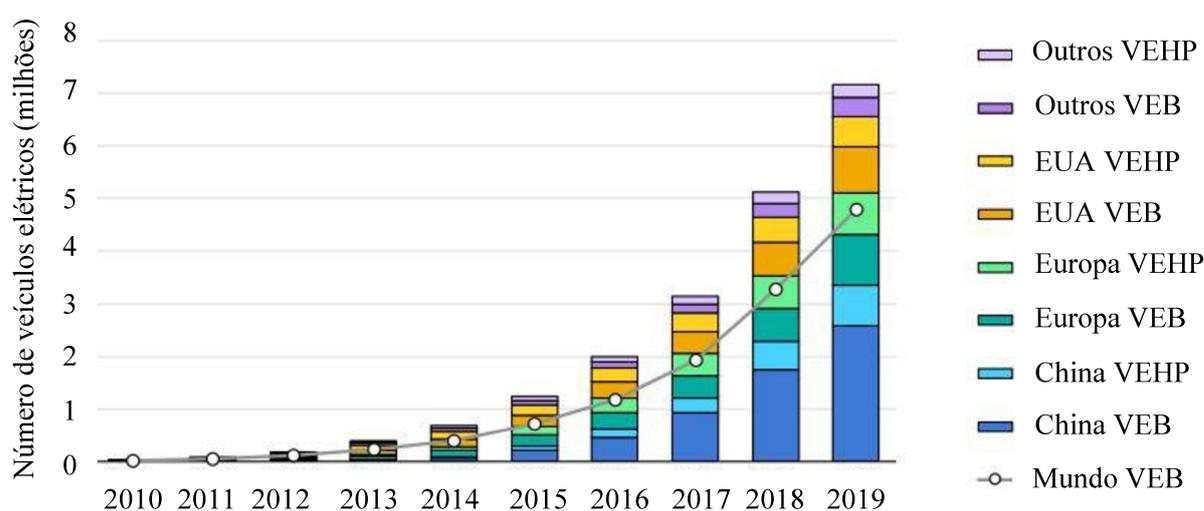
Empresas como Hyundai e Volkswagen estabeleceram planos ousados para o lançamento de carros elétricos até 2025 e cogitam que os veículos elétricos possam se tornar o produto principal das montadoras a partir desta década. Já o grupo Stellantis¹, Mercedes e Ford definiram planos agressivos para venda de veículos elétricos no curto prazo e o grupo BMW avançou seu plano de implantação global de EV que estava prevista em 2027 para 2025. A Honda antecipou seus objetivos de imersão no mercado de elétricos e também antecipou a meta de introdução de veículos no mercado europeu de 2025 para 2023 [IEA, 2020]. Notícias recentes da mídia mostram também que a General Motors (GM) planeja oferecer exclusivamente veículos elétricos em escala global até o ano de 2035 [CNBC, 2021].

No Brasil o aparecimento de veículos elétricos ainda é tímido e com custo bastante elevado. Porém, acredita-se que esse alinhamento global pronunciado pelas montadoras será refletido em algum momento no país, principalmente se houver maiores incentivos fiscais e barateamento da tecnologia [Slowik et al., 2018].

Um detalhamento dos planos das montadoras ao redor do mundo para migração para veículos elétricos é mostrada na tabela 1.

A resposta do público às iniciativas das montadoras de veículos já vem sendo verificada claramente pelo crescimento expressivo das vendas de veículos elétricos ao redor do mundo nos últimos anos, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2 – Evolução da venda de veículos elétricos no mundo.



Fonte: Adaptado de IEA [2020]

Os investimentos realizados pelas diversas montadoras ao redor do mundo têm contribuído para o avanço da tecnologia de baterias nas últimas décadas. O retrospecto

¹ Grupo reúne grandes marcas como Alfa Romeo, Chrysler, Citroën, Dodge, Fiat, Jeep, Maserati e Peugeot.

Tabela 1 – Planejamento da migração para mobilidade elétrica.

Ano	Montadora	Planos
2022	Mercedes	Planeja lançar 10 novos VEs até o final de 2022.
	Ford	Vender 160 mil unidades da versão elétrica da caminhonete F-150 até o fim de 2022.
	Grupo Stellantis	Planeja apresentar 10 novos modelos de EV em 2022.
2023	Honda	Planeja a entrada em produção de um <i>cross-over</i> elétrico em 2023.
	Mazda	Planeja apresentar pelo menos dois veículos elétricos híbridos <i>plug-in</i> até o final do ano de 2023.
	Nissan	Planeja lançar oito VEs até o final do ano de 2023.
2024	Land Rover	Planeja apresentar seu primeiro veículo totalmente elétrico em 2024.
	Audi	Planeja ter 30 novos modelos elétricos até 2025.
2025	BMW	Espera que as vendas de veículos híbridos e elétricos representem 15 a 25% de suas vendas globais até 2025.
	Hyundai	Planeja ter 23 diferentes modelos de VEs em todo o mundo até 2025.
	Jaguar	Planeja ser totalmente elétrico em 2025.
	Toyota	Planeja lançar 60 novos veículos híbridos, elétricos até o final de 2025.
	Volkswagen	Planeja vender 1,5 milhões de VEs em suas marcas até o final de 2025.
	Volvo	Planeja vender 1 milhão de veículos híbridos ou elétricos até o final de 2025.
2026	Kia	Planeja que terá 11 VEs em produção até o final de 2026.
2030	Mitsubishi	Planeja que 50% de suas vendas globais venham de veículos híbridos ou elétricos até 2030.
2035	GM	Pretende eliminar todos os veículos à gasolina ou diesel de sua linha de produtos leves até 2035.

Fonte: Adaptado de [Driver \[2021\]](#)

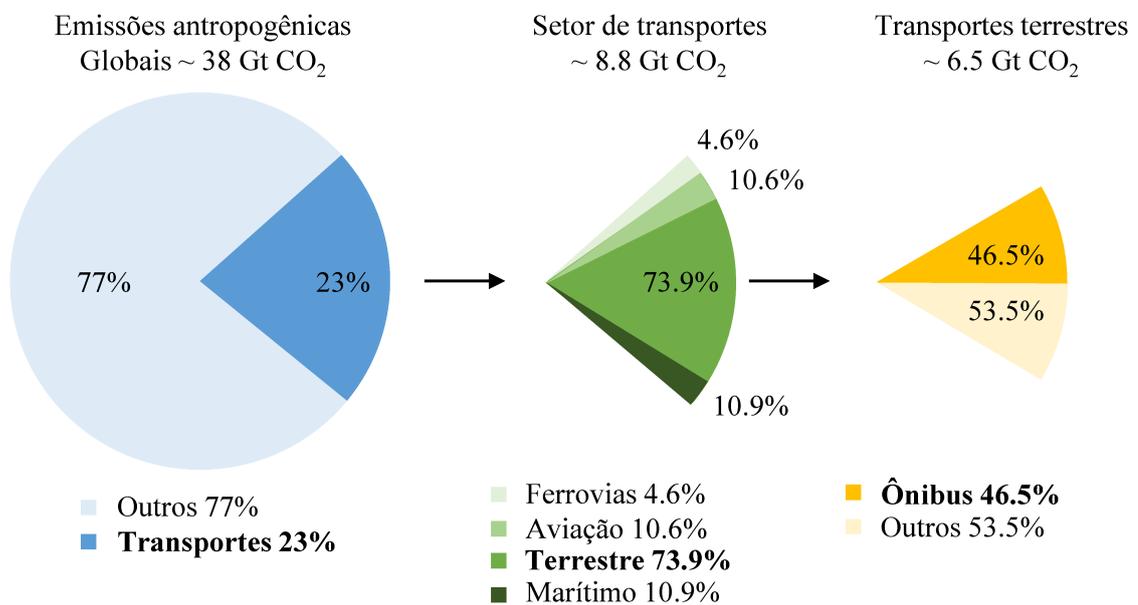
anual de redução dos preços da bateria de íon-lítio para veículos elétricos durante o período de 2010-2017 foi de cerca de 18% e é esperado que essa redução continue nos próximos anos. Caso isso ocorra, o custo da bateria deverá atingir o valor de US\$ 96/kWh em 2025 e US\$ 70/kWh em 2030 [[Bloomberg New Energy Finance, 2018](#)].

Acompanhando a redução do preço das baterias, tem sido observado que os custos iniciais de aquisição dos veículos elétricos também estão reduzindo e a infraestrutura de recarga vem se tornando bem abrangente, principalmente nos Estados Unidos e Europa

[Philipp Sinhuber, Werner Rohlf, 2010, Pant and Harrison, 2013, Delucchi et al., 2014, Arbib and Seba, 2017]. Logo, a adoção dos veículos elétricos pela sociedade será uma tendência natural nos próximos anos. [IEA, 2020]

Devido à previsibilidade dos padrões de trajeto e distâncias de deslocamento, além do fato de que a alta utilização do veículo atenua expressivamente os custos de investimento da bateria, os ônibus elétricos se destacam neste cenário [Sinhuber et al., 2012, Göhlich et al., 2014]. Do ponto de vista ambiental, o crescimento expressivo de novos ônibus elétricos ao redor do mundo é encarado de forma bastante positiva, pois os ônibus à diesel são responsáveis por 46.5% das emissões de CO_2 na atmosfera no setor de transportes [ICCT, 2012], conforme mostra a figura 3.

Figura 3 – Contribuição dos ônibus elétricos na redução de CO_2 na atmosfera.



Fonte: Adaptado de ICCT [2012]

A migração de sistemas de transporte urbanos para tração elétrica vem acontecendo de forma progressiva ao redor do mundo. Estima-se que a China atualmente lidere o *ranking* dos países com maior frota de ônibus elétricos, com cerca de 170.000 ônibus elétricos registrados até o ano de 2018 [Hanlin et al., 2018]. O governo chinês estabeleceu uma política de introdução de matrizes energéticas mais limpas, com o objetivo de produzir 1,67 milhão de veículos elétricos e criar 1,2 milhão de empregos anualmente para o período de 2020-2030. Somente a cidade de Shenzhen possui atualmente 4.887 ônibus elétricos em operação e a meta é que até o final de 2027, todos os ônibus da cidade estejam totalmente eletrificados, totalizando 16.493 ônibus elétricos [Hanlin et al., 2018].

Na Europa, somente em 2019 foram registrados 1.900 novos ônibus elétricos, representando um crescimento de quase 98% em relação à 2018, ultrapassando os registros de ônibus à gás natural. A maioria desses novos veículos estão na Holanda, Reino Unido,

França e Alemanha. A frota europeia de ônibus, que totaliza 4.500 unidades, é superior a da América do Norte, que atingiu a marca de 2.255 veículos, destas, cerca de 500 novas unidades apenas em 2019 [IEA, 2020].

Na Índia foram registrados 800 novos ônibus elétricos no ano de 2019, sendo que no ano anterior haviam apenas 40 unidades no país, distribuídos nas cidades de Calcutá, Mumbai, Pune e Bangalor. Neste ano, o México introduziu 63 novos ônibus elétricos marcando o início da implantação de mobilidade elétrica no setor de transporte público no país. Na América do Sul o crescimento tem sido bastante expressivo, sendo que em 2019, os números foram 3,5 vezes superiores aos de 2018, totalizando 450 ônibus elétricos no continente. Grande destaque ao Chile, que sozinho registrou 400 ônibus elétricos em 2019. O restante dos ônibus elétricos no continente sul-americano encontram-se no Brasil, Argentina, Equador e Colômbia [IEA, 2020].

No Brasil, diversas medidas têm sido realizadas para fomentar a mobilidade elétrica por meio de órgãos e parcerias público-privadas. Estas medidas, assim como em outros países, contribuem para fomentar a indústria e ajudam a desenvolver as tecnologias necessárias, bem como instigar universidades e grupos de pesquisa a desenvolverem projetos sobre o tema colaborando para a promoção da mobilidade elétrica no país. Nesse sentido, pode-se destacar no ano de 2018, a chamada de projetos de P&D estratégicos: “Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente”, nº 022/2018 [ANEEL, 2018], que visa o desenvolvimento de modelos de negócio que consigam colaborar significativamente no processo de amadurecimento do tema mobilidade elétrica no Brasil, possibilitando o desenvolvimento de produtos e soluções de caráter nacional e viáveis economicamente.

O interesse de diversos países, incluindo o Brasil, pela adesão aos ônibus elétricos tem sido amplamente discutido e relatado na literatura [Li et al., 2018, Zhou et al., 2016, BNDES, 2021]. Quando comparados com ônibus à diesel, a eficiência do processo de transformação energética pode ser até quatro vezes superior nos ônibus com tração elétrica, segundo testes realizados pela agência de transporte dos Estados Unidos - *Federal Transit Administration* [Peterson et al., 2007]. Além disso, os ônibus elétricos apresentam uma redução de 75% nas emissões de gases do aquecimento global comparados com os ônibus à diesel, mesmo quando analisa-se toda a cadeia produtiva dos dois veículos [Hanlin et al., 2018].

Em 2019, foi atingido o número de 513.000 ônibus elétricos em todo o mundo, representando um crescimento de 17% com relação a 2018 [IEA, 2020]. As projeções mais recentes da *Bloomberg New Energy Finance* mostram que a implantação de ônibus elétricos em ambientes urbanos continuará crescendo nos próximos anos. Espera-se que entre todos os setores de transporte, os ônibus municipais possuem o maior potencial para se tornarem elétricos e devem chegar à marca de 67% da frota global de ônibus até 2040 [BloombergNEF, 2020].

1.3 Desafios observados

Os principais desafios da integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica de transporte público estão relacionados ao sistema de armazenagem e a infraestrutura de recarga.

Primeiramente, o custo inicial de investimento para ônibus elétricos é cerca de duas vezes maior do que os ônibus a diesel convencionais, devido ao alto custo das baterias, que geralmente representam 30% a 50% do custo total dos veículos [Fries et al., 2017]. Em segundo lugar, é necessário um investimento adicional para a infraestrutura de recarga, que dependendo da localização, pode ser um desafio com relação à disponibilidade de rede de distribuição devido aos grandes montantes de potência demandados pelo sistema [Rothgang et al., 2015].

Com relação aos sistemas de armazenagem, a tecnologia mais comumente utilizadas em sistemas de transporte público são as baterias de íons de lítio níquel cobalto manganês (NCM), que possuem alta densidade energética e menor custo, quando comparadas com outras baterias [IEA, 2020].

Pelo fato dos ônibus elétricos necessitarem de uma alta capacidade instalada de baterias e terem ciclos de direção muito intermitentes, a utilização de sistemas de armazenagem híbrida tem sido bastante discutida na literatura [Cao and Emadi, 2009, Michalczuk, 2012, Ostadi and Kazerani, 2015]. Isso se deve principalmente ao fato de que apesar das baterias NCM serem capazes de armazenar altos níveis de energia, sua potência específica são normalmente baixas, principalmente quando comparados com outros dispositivos de armazenagem, como ultracapacitores ou bateria de lítio ferro manganês fosfato (LFMP) [Khaligh and Li, 2010, Yin et al., 2017].

Além disso, a carga e a descarga frequentes das baterias NCM podem acelerar seu envelhecimento, demandando a sua substituição antes do término da vida útil do veículo. Para lidar com esse problema, a literatura propõem hibridização do sistema de armazenagem, por meio da utilização de dispositivos com características de alta potência específica [Biernat and Rumniak, 2013].

A hibridização de fontes é uma solução que tem se mostrado viável para se beneficiar tanto da alta energia do dispositivo de armazenagem principal quanto da alta potência específica do elemento híbrido [Lei et al., 2022]. Para ônibus de transporte público, o cenário pode ser ainda mais vantajoso, pois existe a possibilidade de carregamento frequente do elemento híbrido ao longo de seus respectivos ciclos de condução [Li et al., 2012].

O crescimento da migração de ônibus para tração elétrica somente não ocorre de forma mais rápida ao redor do mundo, pois ainda esses desafios relacionados ao sistema de armazenagem e infraestrutura de recarga precisam ser resolvidos [IEA, 2020].

No presente trabalho, uma abordagem de integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica utilizando fontes de armazenagem híbridas por meio de recargas ultra-rápidas será realizada, baseando-se em [Justino et al., 2014, 2016]. Além disso, observando-se uma lacuna nos trabalhos da literatura que abordam esse tema sem a devida consideração das incertezas dos dados de entrada, serão realizadas modelagens estocásticas do problema relacionados as previsões de cenários futuros para o avanço da mobilidade elétrica.

Dessa forma, pode-se observar que a busca por uma solução mais adequada sob determinados requisitos estratégicos e operacionais para a implantação e operação dos sistemas de mobilidade elétrica nas redes de distribuição é um tema de extrema relevância e pesquisas direcionadas à solução destes problemas mostram-se necessárias.

1.4 Objetivos e delimitação do escopo

O objetivo geral do trabalho é o desenvolvimento de uma abordagem para redução do custo global de implantação e operação de sistemas de mobilidade elétrica, considerando as incertezas e os impactos na rede de distribuição. Este objetivo amplo, abrange os seguintes objetivos específicos:

1. Adaptação de modelos de tomada de decisão multiobjetivo em condições de incerteza representada, dentro da abordagem possibilística, por meio da construção de uma metodologia baseada em modelos multiobjetivo e sistema especialista *fuzzy* para a consideração adequada e efetiva das incertezas externas para a resolução do problema.
2. Aplicação da abordagem em um estudo de caso para a definição de uma solução racional relacionada a especificação do sistema de armazenagem e também do número e localização das estações de recarga, bem como a definição dos instantes de operação do sistema ao longo do tempo.

É parte do escopo do trabalho a aplicação da abordagem desenvolvida para a resolução do problema de integração de sistemas de mobilidade elétrica em condições de incerteza e sua operação ao longo do tempo. Do ponto de vista de aplicação tecnológica, pretende-se utilizar os resultados de maneira ampla e profunda para a integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica e sua relação com a rede de distribuição de energia. Em particular, deseja-se aplicar a metodologia desenvolvida para a elaboração de ferramentas para a tomada de decisão de empresas e órgãos de transporte público nesta transição tecnológica, bem como auxiliar na análise de problemas de qualidade de energia em redes de distribuição com a presença de mobilidade elétrica.

Embora a integração e operação do sistema possam ser observadas conjuntamente em alguns poucos estudos anteriores, a realização desse estudo considerando as incertezas neste processo de transição tecnológica e os impactos na rede de distribuição em modo de recarga ultra-rápido nunca foi realizada antes. Dessa forma, o presente trabalho visa preencher esta lacuna.

1.5 Contribuições da pesquisa

A contribuição desta pesquisa está relacionada a adaptação e aperfeiçoamento de uma abordagem metodológica e sua implementação computacional para a análise adequada e efetiva de problemas de tomada de decisões multicritério em ambiente de incertezas. Neste trabalho são exploradas as aplicações relacionadas à integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica na rede de distribuição. Como contribuições específicas podem-se indicar:

1. Adaptação e aperfeiçoamento de uma abordagem de auxílio à tomada de decisão, por meio do seu uso em dois estágios para a resolução do problema de integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica;
2. Definição de relações de preferências *fuzzy* e modelos de ordenação para avaliação de alternativas;
3. Aplicação dos modelos $\langle X, F \rangle$ para tomada de decisão multiobjetivo em ambiente *fuzzy* para escolha de alternativas de soluções em um problema real, analisando dois diferentes estudos de caso para validar a metodologia proposta;
4. Modelagem dinâmica do veículo elétrico e modelagem do sistema elétrico de potência de forma a possibilitar os cálculos de autonomia, consumo energético e interações com a rede de distribuição;
5. Definição de cenários de mobilidade elétrica, por meio de diferentes níveis de preferência e construção de vetores de pesos de importância, possibilitando o tratamento de incertezas externas, além da consideração de critérios de caráter quantitativo e qualitativo;

A ferramenta desenvolvida no presente trabalho permite a consideração adequada e computacionalmente eficiente das incertezas presentes nas futuras condições de funcionamento dos sistemas de distribuição, considerando a presença de mobilidade elétrica e recursos energéticos distribuídos.

1.6 Organização da tese

A tese está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 1 apresenta o histórico e a introdução ao estudo, caracterizando o contexto do problema e definindo os objetivos da tese.
- O capítulo 2 apresenta os resultados da revisão bibliográfica, identificando o estado atual das pesquisas relacionadas à implantação e operação de sistemas de mobilidade elétrica e explorando as principais lacunas referentes à necessidade de tratamento de incertezas.
- Os capítulos 3 e 4 apresentam o desenvolvimento da abordagem proposta nesta pesquisa. O capítulo 3 investiga o aspecto de implantação do sistema de mobilidade elétrica, abordando a metodologia desenvolvida de tomada de decisão em ambiente *fuzzy*. O capítulo 4 apresenta os procedimentos para a operação e gerenciamento energético do veículo, discutindo o desenvolvimento do sistema especialista *fuzzy* proposto.
- O capítulo 5 explora a generalização para a solução de problemas multicritério da abordagem clássica para a tomada de decisões em ambiente de incerteza, tendo como fundamento básico a construção das matrizes payoff e o uso dos critérios de escolha adaptados.
- O capítulo 6 deste trabalho apresenta os resultados do estudo de caso da implantação de um sistema de mobilidade elétrica no campus da Universidade Federal de Minas Gerais, definindo-se as especificações ideais do sistema de armazenagem do veículo e da infraestrutura das estações de recarga.
- O capítulo 7 apresenta um segundo estudo de caso do problema de otimização e tomada de decisões multiobjetivo em condições de incerteza do processo de substituição de ônibus urbanos movidos a diesel que atendem o Parque Tecnológico de Belo Horizonte - BH-Tec por equivalentes movidos à eletricidade.
- O capítulo 8 apresenta um resumo das principais conclusões da presente tese e apresenta as principais contribuições da pesquisa.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

“Give me the fruitful error any time, full of seeds, bursting with its own corrections. You can keep your sterile truth for yourself.”

Vilfredo Pareto

Este capítulo visa explorar as linhas de pesquisa abordadas até o momento, dando foco para as incertezas nos sistemas de mobilidade elétrica e os meios de considerá-las no processo de resolução do problema.

2.1 Sistemas de mobilidade elétrica e suas incertezas

Na literatura são destacados diversos benefícios da mobilidade elétrica e os inúmeros fatores que tornam esse tipo de tecnologia atraente para a sociedade [Qiu et al., 2020, Usai et al., 2021, Tran et al., 2020, Qin et al., 2020]. Pode-se destacar a ausência de emissão de poluentes, incluindo contaminantes locais e atmosféricos, além do maior conforto relacionado a redução de vibração, maior silêncio e suavidade de condução, o que apresenta uma melhor experiência para passageiros e motoristas.

Além disso, quando comparados com as alternativas movidas à combustão interna, os ônibus elétricos possuem uma grande vantagem, pois são mais simples e possuem menor quantidade de peças móveis, o que contribui para a redução de custos operacionais e de manutenção [Sioshansi and Denholm, 2009]. Devido à ampla gama de benefícios, é

natural o interesse de diversos órgãos e agências de trânsito em adquirir ônibus elétricos e os integrar nas suas frotas de transporte público. No entanto, isso ainda não ocorre de forma massiva, pois existem grandes desafios tecnológicos, incluindo limitações de autonomia, altas potências de carregamento e altos custos de reforços de rede, elevados tempos de carregamento necessários, altas tarifas de energia para alguns locais, estruturas não flexíveis para contratação de demanda e custos de capital ainda bastante elevados.

Embora alguns desses desafios estejam sendo enfrentados e resolvidos pela indústria por meio da maturação da tecnologia, incluindo maior confiabilidade do sistema de propulsão, maior capacidade de energia da bateria e redução dos custos de capital dos ônibus elétricos, ainda existem diversas incertezas que precisam ser consideradas para permitir uma adequada integração e operação dos sistemas de mobilidade elétrica de forma ampla ao redor do mundo [Longo et al., 2015].

No processo de definição e solução de uma grande gama de problemas do projeto, planejamento, operação e controle de sistemas complexos, incluindo sistemas e subsistemas de potência, encontram-se vários tipos de incerteza [Ekel et al., 1998, Antunes and Dias, 2007, Pedrycz et al., 2011].

Particularmente, nos problemas que envolvem integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica, diversas manifestações do fator de incerteza podem ser causadas por:

- (a) Falta de previsões confiáveis das características do mercado futuro, bem como o comportamento dos sistemas de mobilidade elétrica nas redes de distribuição.
- (b) Imprecisão nas informações cadastradas nos bancos de dados de equipamentos e redes elétricas da concessionária, tendo como consequência a dificuldade de se obter uma quantidade suficiente de informações confiáveis para cálculos elétricos mais apurados.
- (c) Impossibilidade de formalizar com precisão uma série de fatores e critérios para novas tecnologias de baterias e ultracapacitores e as tendência de redução de custos à longo prazo.
- (d) Necessidade de se considerar informações de caráter qualitativo da gestão das empresas para as definições estratégicas e priorização de investimentos.

No processo de tomada de decisão de uma agência de transporte público, entre continuar com ônibus à diesel, ou expandir sua frota com ônibus elétricos, é necessário que sejam coletadas todas as informações necessárias para realizar a escolha de forma satisfatória.

As empresas de ônibus podem ter que decidir entre várias opções diferentes de ônibus elétricos e tecnologias de recarga, bem como um vasto número de possibilidades para combinar essas opções em uma solução de sistema, o que possui um alto grau de incerteza [ICCT, 2012].

Todas as opções certamente possuem vantagens e desvantagens específicas quanto à complexidade tecnológica, capital e custo operacional. Dessa forma, cabe ao tomador de decisão estar bem apoiado com ferramentas que o auxiliem na escolha de acordo as preferências e cenários apresentados.

Considerando-se apenas os investimentos iniciais, os ônibus elétricos podem apresentar custos de capital aproximadamente 40% a 50% superiores que os ônibus a diesel [IEA, 2020]. Entretanto estes valores podem cair significativamente quando se realiza uma análise operativa do ciclo de vida do veículo, considerando a redução de custos de operação e manutenção mais baixos dos ônibus elétricos. Essa redução deve-se à relativa simplicidade mecânica e ao menor número de peças móveis e também devido aos ganhos de eficiência do processo de transformação de energia e a possibilidade de se ter incentivos para tarifas de energia elétrica mais acessíveis por parte dos órgão reguladores.

Além disso, em muitos países também é possível verificar a presença de incentivos fiscais e financiamento para veículos de matriz energética limpa, o que compensa os custos de capital incrementais dos ônibus elétricos e da infraestrutura de recarga.

Dado que os custos operacionais do sistema de ônibus elétricos dependem fortemente das tarifas de energia elétrica, é também fundamental integrar uma análise sobre as incertezas presentes nas tarifas e sua variabilidade e possíveis efeitos no processo de investimento. É muito importante também que os impactos na qualidade de energia elétrica da rede de distribuição sejam considerados, tendo em vista que seu negligenciamento pode impossibilitar a integração do sistema em alguns cenários ou exigir elevados investimentos para reforços do sistema elétrico.

Alguns trabalhos na literatura abordam o processo de integração e/ou operação dos sistemas de mobilidade elétrica utilizando variados métodos. Na tabela 2 é apresentado um resumo desses métodos, mostrando se foi realizada a consideração da incerteza e se houve a avaliação do impacto na rede de distribuição nas abordagens realizadas em cada um deles.

Tzeng et al. [2005] aplicaram o AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*, para determinar os pesos relativos dos critérios de avaliação em processo de tomada de decisão para se determinar a melhor alternativa de transporte público em Taiwan, incluindo elétrico, diesel e biogás.

Tabela 2 – Revisão bibliográfica.

Autor, ano	Objetivo		Método	Consid. incert.	Aval. da rede
	Int.	Op.			
Yedla and Shrestha [2003]	x		AHP	Não	Não
Tzeng et al. [2005]	x		TDMC	Não	Não
Hsiao et al. [2005]	x		FAHP-TOPSIS	Sim	Não
Caux et al. [2010]		x	F-EMS	Sim	Não
Patil et al. [2010]	x		TDMC	Não	Não
Vahdani and Hadipour [2011]	x		F-TDMC	Sim	Não
Michalczuk [2012]		x	F-EMS	Sim	Não
Li and Zhang [2012]		x	F-EMS	Sim	Não
Wu and C.-H. Zhang [2012]		x	F-EMS	Sim	Não
Sinhuber et al. [2012]	x	x	EMS	Não	Não
Aydin and Kahraman [2014]	x		F-AHP-VIKOR	Sim	Não
Petschnig [2014]	x		QSS	Não	Não
Nurhadi et al. [2014]	x		AF	Não	Não
Göhlich et al. [2014]	x		AF	Não	Não
Yavuz et al. [2015]	x		HFS	Sim	Não
Rogge et al. [2015]	x		EMS	Não	Sim
Lanjewar et al. [2015]	x		G-theory-AHP	Sim	Não
Rothgang et al. [2015]		x	EMS	Não	Não
Pihlatie et al. [2015]	x		AF	Não	Não
Silva et al. [2016]		x	AC	Não	Sim
Onat et al. [2016a]	x		TDMC Grap	Não	Não
Onat et al. [2016b]	x		F-TOPSIS	Sim	Não
Yin et al. [2017]		x	AFEMS	Sim	Não
Gao et al. [2017]		x	EMS	Não	Não
Yang et al. [2017]	x	x	EMS	Não	Não
Oztaysi et al. [2017]	x		Intervalar FS	Sim	Não
Mukherjee [2017]	x		F-TDMC	Sim	Não
Lajunen [2018]		x	LCC	Não	Não
Güner [2018]	x		<i>Fuzzy</i> AHP	Sim	Não
Rogge et al. [2018]	x	x	GA	Não	Não
Büyüközkan [2018]	x		<i>Fuzzy</i> Choquet	Sim	Não
Ortenzi et al. [2019]	x	x	EMS	Não	Sim
He et al. [2019]		x	MILP	Não	Sim
Moslem et al. [2019]	x		<i>Fuzzy</i> AHP	Sim	Não
Hamurcu and Eren [2020]	x		TOPSIS-MOORA	Não	Não
Laurent et al. [2020]		x	TDMC	Não	Não
Pamucar et al. [2021]	x		MARCOS	Sim	Não
Alcazar et al. [2022]	x		TDMC	Não	Não

Fonte: Autoria própria.

A pesquisa de Caux et al. [2010] analisou o processo implantação de ônibus elétricos em um sistema de mobilidade coletiva urbano. O destaque deste trabalho foi o

uso de um modelo de custo de ciclo de vida, avaliando o envelhecimento da bateria e o seu impacto no custo global do sistema de mobilidade elétrica ao longo do tempo.

Vahdani and Hadipour [2011] realizou uma tomada de decisão multicritério por meio do método TOPSIS, do inglês *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, para selecionar possibilidades de transporte público, tais como elétrico, célula combustível e metanol. Foram avaliados a eficiência, o preço e a autonomia dos ônibus.

Sinhuber et al. [2012] e Rogge et al. [2018] usaram uma modelagem dinâmica de simulação para determinar o consumo de energia em uma determinada rota e especificar o sistema de armazenagem para o veículo. Rogge et al. [2015] discutiram sobre a dependência entre o dimensionamento do sistema de armazenagem do veículo e o sistema de infraestrutura de recarga, com o objetivo de minimizar o custo da implantação de um sistema de mobilidade elétrica.

Wu and C.-H. Zhang [2012] e Rothgang et al. [2015] avaliaram o custo total de implantação de um sistema de mobilidade elétrica, incluindo uma frota de ônibus elétricos com baterias de diferentes tecnologias e capacidades de armazenagem. Nos estudos foi considerado o envelhecimento do sistema de baterias para um número fixo de ciclos por dia por meio de um modelo paramétrico.

Uma avaliação econômica da implantação de ônibus elétricos foi desenvolvida por Göhlich et al. [2014], Nurhadi et al. [2014] e Pihlatie et al. [2015]. Os pesquisadores analisaram os possíveis indicadores de custo de integração com o sistema elétrico, focando nas variáveis financeiras da implantação do sistema.

Guo and Zhao [2015] e Nag and Lee [2019] avaliaram o custo de implantação de um sistema de mobilidade elétrica em diferentes cidades. Nesses trabalhos, embora tenham sido analisados diferentes casos de uso e configurações dos veículos, a minimização do custo do projeto não foi realizada.

No trabalho de Lanjewar et al. [2015], uma metodologia híbrida multicritério foi desenvolvida usando a teoria dos grafos e o método AHP para avaliação de desempenho de ônibus elétrico e ônibus à combustão interna utilizando múltiplos critérios. No artigo, três estudos de casos foram considerados para demonstrar a eficácia e flexibilidade da metodologia proposta.

O trabalho de Mukherjee [2017] selecionou a melhor tecnologia para sistemas de mobilidade de transporte público por meio de tomada de decisão multicritério em ambiente *fuzzy*. Uma metodologia foi desenvolvida para lidar com diferentes situações de incerteza e exemplos numéricos ilustraram os casos variados, porém sem considerar a integração com a rede de distribuição.

Gao et al. [2017] minimizaram a capacidade do sistema de armazenagem para

fornecer energia suficiente para cobrir uma viagem ou várias paradas, realizando a recarga das baterias rapidamente nas estações de recarga, porém sem considerar o valor presente dos investimentos realizados.

Oztaysi et al. [2017] resolveram o problema de seleção de tecnologia para mobilidade elétrica especificamente para uma empresa de serviços públicos nos EUA. O artigo apresentou um método de tomada de decisão multicritério e com base em conjuntos *fuzzy* e análise intervalar, considerando dados linguísticos. A operação do sistema de mobilidade na rede não foi considerada.

Lajunen [2018] avaliaram os custos do ciclo de vida da bateria do ônibus elétrico, além do potencial de minimizar emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

Vários estudos realizaram a integração de sistemas de ônibus elétricos, com foco no planejamento da infraestrutura e estratégias de recarga. Kunith et al. [2017], Björnsson et al. [2018] e Teichert et al. [2019] definiram os melhores locais das estações de recarga para se obter o menor consumo de energia e a menor duração de carregamento dos ônibus elétricos.

Efthymiou et al. [2017], Xylia et al. [2017], Yu et al. [2016], Jefferies and Göhlich [2020] concentraram-se principalmente no desenvolvimento de estratégias para melhorar a disponibilidade dos pontos de recarga, de forma a minimizar o número necessário de estações em um sistema de mobilidade elétrica. Além disso, para minimizar o custo das infraestruturas de carga, Li and Zhang [2012], Sojoudi and Low [2011], Sebastiani et al. [2016], Rogge et al. [2015] estudaram o valor mínimo de energia para cada carregador e o número de estações de recarga.

O estudo de Machura and Li [2019] apresentou uma revisão de diferentes arranjos alternativos para ônibus elétricos híbridos, apresentando os resultados de modelos de simulação e dados operacionais da literatura. O estudo trouxe uma análise comparativa de diferentes configurações de ônibus elétricos, incluindo aspectos econômicos, ambientais, operacionais e de eficiência energética. O estudo revelou a complexidade de tais sistemas e o desafio de comparar objetivamente diferentes métodos de operação.

Hamurcu and Eren [2020] propuseram uma metodologia de tomada de decisão multicritério usando uma combinação dos métodos AHP e TOPSIS para implementação de um sistema de mobilidade elétrica avaliando seis diferentes alternativas e sete critérios específicos, porém sem considerar o processo de escolha dos locais de instalação das estações de recarga e dimensionamento do sistema de armazenagem.

Pode-se observar que existe uma grande variedade de trabalhos que abordam o tema mobilidade elétrica e sua implantação e operação de diferentes formas, entretanto são poucos os trabalhos que apresentam uma metodologia integrada que avaliam ao mesmo tempo tanto a tecnologia do sistema de armazenagem e recarga, quanto os aspectos

operacionais e econômicos e as incertezas que essas modelagens trazem consigo.

O processo de tomada de decisão deve ser embasado por uma avaliação cuidadosa dos requisitos de infraestrutura e suporte para o sistema de mobilidade elétrica, avaliando-se não só os custos para aquisição dos ônibus elétricos, mas toda as variáveis financeiras relacionadas no investimento e suas incertezas.

Em uma relação dos 40 trabalhos considerados mais relevantes sobre o tema discutido nesta revisão bibliográfica, verifica-se que 63% tratam apenas da integração (questões financeiras), 31% tratam apenas da operação (gerenciamento energético) e apenas 6% deles tratam em conjunto de integração e operação dos sistemas de mobilidade elétrica.

Apenas 13% dos trabalhos discutiram os possíveis impactos causados na rede de distribuição e 56% desconsideraram as incertezas relacionadas ao desenvolvimento do projeto e possíveis estratégias de implantação do sistema de mobilidade.

Na literatura não foi encontrado nenhum trabalho onde a integração, operação, impactos na rede de distribuição e incertezas do processo tenham sido avaliadas ao mesmo tempo em uma única abordagem. Essas incertezas para a integração e operação devem ser consideradas para possibilitar uma adequada transição de frotas de transporte público para mobilidade elétrica.

Tendo em vista a escassez de trabalhos que resolvem o problema de forma integral e considerando as incertezas no processo de tomada de decisão, a seguir serão explorados os possíveis tipos de incerteza em dados de entrada de problemas de tomada de decisão multicritério e as técnicas empregadas para lidar com cada um deles.

2.2 Tomada de decisão em condições de incerteza

É possível verificar na literatura diversos tipos de incerteza relacionados ao processo de tomada de decisão. Eles podem ocorrer no momento de identificação dos critérios ou sua interação, na avaliação das alternativas, na definição dos pesos dos critérios dos especialistas ou na escolha dos operadores de agregação. No caso específico das incertezas dos dados de entrada, a origem dos dados, a avaliação das alternativas, a definição dos pesos dos critérios e a parametrização do modelo precisam ser bem considerados nos problemas de tomada de decisão multiobjetivo.

A presença de incerteza nos dados de entrada de um modelo de tomada de decisão é bastante comum, principalmente quando se trata da resolução de problemas reais. Os problemas reais muitas vezes requerem valores de entrada, tais como medições, cálculos de modelos e estimativas de indicadores, que podem ter baixo nível de acurácia [Amor et al., 2015]. Nesses casos, é necessário que haja uma modelagem utilizando técnicas específicas, tais como conjuntos *fuzzy* ou teorias de probabilidade para considerá-las [Amor et al.,

2015, Tervonen and Lahdelma, 2007].

Uma etapa importante de qualquer abordagem utilizada para se resolver um problema real é a escolha da técnica específica para se lidar com as incertezas em questão, que podem impactar diretamente no resultado final do processo de tomada de decisão [Durbach and Stewart, 2012].

Amor et al. [2015] apresentam uma síntese de algumas técnicas para lidar com a incerteza. Ambos os trabalhos propõem diretrizes para ajudar os tomadores de decisão a escolher uma representação apropriada para a incerteza como objetivo de reduzir os riscos em se fazer escolhas arbitrárias em uma abordagem para modelar a incerteza.

Levando isso em consideração, é necessário indicar que Durbach and Stewart [2012] classificam incertezas internas¹ e externas². A presença das incertezas é objetiva, natural e inerente aos sistemas complexos. A consideração de diversos tipos de incerteza na formação dos modelos constitui um meio para aumentar a adequação desses modelos e, conseqüentemente, a credibilidade e efetividade factível das decisões baseadas em sua análise [Ekel et al., 2008].

A incerteza das metas está associada com o caráter multicritério de muitos problemas do projeto, planejamento, operação e controle. Esse tipo de incerteza não pode ser superado com base na utilização de modelos e métodos formais [Pedrycz et al., 2011].

Na literatura pode-se identificar os aspectos da incerteza que têm sido tratados no processo de tomada de decisão, conforme mostrado na figura 4. Os tipos de dados de entrada que carregam incertezas podem ser cardinal, ordinal ou uma combinação de ambos [Pelissari et al., 2021]. Os tipos distintos de incerteza nos dados de entrada podem ser classificados quanto à ambiguidade, estocasticidade e informações parciais [Tervonen et al., 2009, Chen and Yang, 2011]. Os problemas reais são caracterizados por uma combinação desses tipos de incerteza [Liu and Wang, 2007]. E finalmente, as principais técnicas usadas para lidar com a incerteza podem ser a teoria da probabilidade, os conjuntos *fuzzy* e o raciocínio evidencial [Amor et al., 2015].

A seguir, cada um destes aspectos será detalhado de forma a se identificar quais as melhores técnicas a serem adotadas para a consideração da incerteza na abordagem do problema a ser resolvido no presente trabalho.

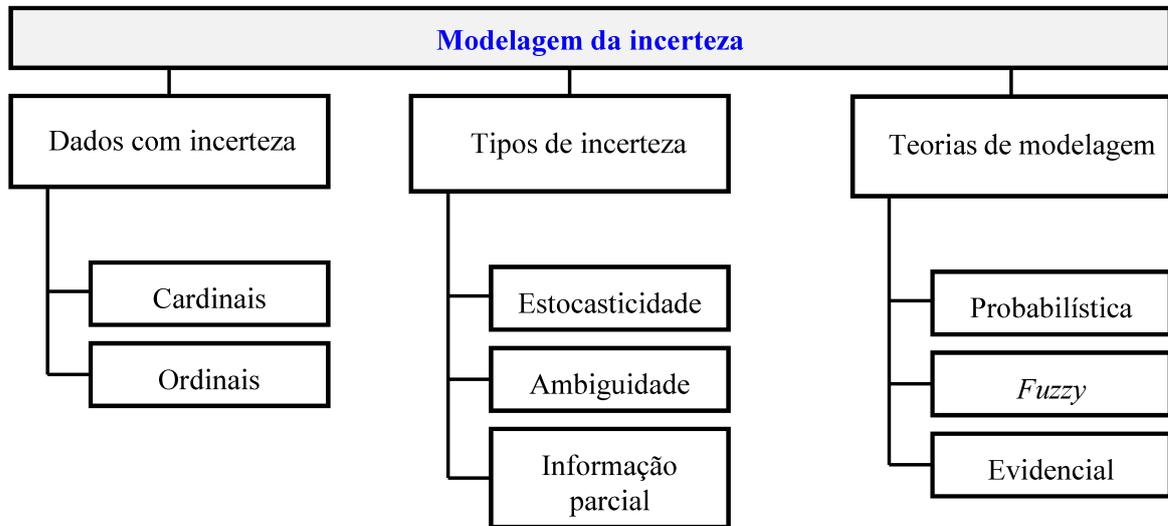
2.2.1 Tipos de dados com incerteza

Diferentes tipos de dados podem apresentar incerteza e esse tipo de incerteza está diretamente relacionado à avaliação que está sendo executada. Os problemas de tomada de decisão multiobjetivo geralmente envolvem a avaliação de parâmetros que podem ser

¹ Relacionadas aos valores e julgamentos das pessoas responsáveis pela decisão.

² Definidas pelas condições ambientais que estão fora do controle da pessoa responsável pela decisão.

Figura 4 – Tipos de incerteza e métodos de consideração.



Fonte: Adaptado de Pelissari et al. [2021]

de natureza quantitativa ou qualitativa [Pelissari et al., 2021]. Um parâmetro quantitativo pode ser mensurado e um parâmetro qualitativo, ao contrário, não pode ser medido e é geralmente expresso por meio de variáveis linguísticas [Parreiras et al., 2010].

2.2.1.1 Dados cardinais

Os parâmetros quantitativos geralmente são avaliados utilizando-se dados cardinais, pois tratam-se de valores numéricos para os quais as operações aritméticas podem ser aplicadas. Eles resultam da medição de entidades quantitativas, como por exemplo a autonomia do veículo, o custo de implantação do projeto ou os níveis de tensão na rede de distribuição.

2.2.1.2 Dados ordinais

Os dados ordinais são aqueles que podem ser categorizados em diferentes níveis de grandezas e que não necessariamente a distância entre esses níveis é conhecida. Em um problema de tomada de decisão no qual os parâmetros precisam ser expressos utilizando variáveis linguísticas e qualitativas como a avaliação de indicadores de qualidade. Os dados ordinais são o modo mais natural para se expressar um problema de tomada de decisão do mundo real.

Apesar dos dados ordinais serem utilizados majoritariamente em análises qualitativas, existem algumas situações em que uma entidade quantitativa pode ser representada por dados cardinais. Por exemplo, quando não é possível medir com precisão o nível de

circulação de pessoas em um determinado ambiente, pode-se utilizar dados ordinais, como “muito alto”, “alto” e “baixo”.

2.2.2 Tipos de incertezas

A diferenciação dos tipos de incerteza é uma etapa fundamental na fase de definição das técnicas a serem utilizadas em um problema de tomada de decisão. Um processo de auxílio à decisão pode envolver diferentes tipos de incertezas de diversas naturezas [Walker et al., 2003].

A modelagem utilizada no problema pode se tornar uma fonte de incerteza, tendo em vista a necessidade de utilização de teorias, hipóteses ou suposições. Se essas hipóteses ou premissas não forem completamente verdadeiras, a própria modelagem do problema acaba se tornando uma grande fonte de incerteza. Por esse motivo, deve-se ter bastante cautela na proposição de hipóteses e premissas na etapa de modelagem do problema [Pedrycz et al., 2011].

A incerteza também pode advir do próprio tomador de decisão, pois quando este tem alguma dificuldade de expressar seu conhecimento, pode haver impactos na qualidade dos dados resultantes de suas observações ou medições.

No presente trabalho será dado foco para as fontes de incerteza externas, que caracterizam os casos em que a fonte de incerteza está nos dados de entrada do processo de tomada de decisão devido à complexidade de sua obtenção e à dificuldade de aferir sua acurácia. Nesse caso, pode-se classificar os principais tipos de incerteza que afetam esses dados em três grupos: estocasticidade, ambiguidade e informação parcial.

2.2.2.1 Estocasticidade

A estocasticidade se refere à propriedade de um processo ser bem descrito por uma distribuição de probabilidade aleatória. Em princípio, se um processo é estocástico, mas sua lei de distribuição e parâmetros são conhecidos, trata-se de uma situação desejada, na qual a incerteza é inexistente. O problema ocorre quando a distribuição de probabilidade é desconhecida e os parâmetros apresentam elevado grau de incerteza [Dempster, 2008].

No caso de entrada de dados cardinais pode-se construir uma distribuição de probabilidade contínua para aferir este nível de estocasticidade, e caso os dados sejam ordinais, uma distribuição de probabilidade discreta é necessária [Lahdelma et al., 1998].

Geralmente esse tipo de incerteza ocorre no momento da parametrização do modelo, mas também pode ocorrer na definição dos pesos de critérios [Banuelas and Antony, 2004]. É um tipo de erro bastante comum principalmente em problemas onde os dados são de difícil obtenção e dependem de simulações computacionais complexas [Tervonen et al., 2009].

2.2.2.2 Ambiguidade

A ambiguidade ocorre quando o dado recebido pela entrada do modelo de tomada de decisão dá margem para mais de uma interpretação na modelagem. Geralmente essa incerteza está mais relacionada a fonte de dados ordinais, principalmente quando são utilizados variáveis linguísticas [Yeh and Chang, 2009]. No caso de dados cardinais, a incerteza pode estar presente de forma ambígua quando os valores são representados em forma de intervalos [Campos et al., 2015]

Muitas vezes a incerteza por ambiguidade é referenciada na literatura pelo termo imprecisão, quando relacionado ao uso de dados cardinais. Uma incerteza de ambiguidade pode estar presente nos parâmetros de entrada do modelo, mas também na definição dos pesos dos critérios e avaliação das alternativas [Campos et al., 2015].

2.2.2.3 Informação parcial

A incerteza por informação parcial ocorre quando há indisponibilidade de algum dado de entrada necessário para o modelo mas que não foi considerado. Do ponto de vista do processo de tomada de decisão, a informação parcial pode ocorrer por alguma limitação da expressão do conhecimento do especialista, que pode influenciar na avaliação das alternativas e certamente no resultado final do processo de tomada de decisão [Lahdelma et al., 1998, Tervonen et al., 2009].

2.2.3 Técnicas usadas para modelar a incerteza

Na literatura é possível identificar diferentes técnicas para se modelar a incerteza em modelos de tomada de decisão multicritério [Amor et al., 2015, Durbach and Stewart, 2012]. A seguir são apresentadas as principais técnicas, enfatizando-se as principais características, condições de uso e diferentes contextos semânticos e axiomáticos de cada uma delas. Nesta pesquisa, as técnicas foram divididas em três grandes grupos: teoria probabilística, teoria *fuzzy* e teoria evidencial.

2.2.3.1 Teoria de Probabilidade

Os conceitos de probabilidade foram introduzidos inicialmente no século XVII pelos matemáticos Pascal e Fermat com o intuito de possibilitar a modelagem de dados aleatórios, sendo complementada posteriormente por Bernoulli em 1713 [Ore, 1960].

Em 1933, o matemático russo Kolmogorov propôs uma estrutura matemática formal bem aceita até os tempos atuais para a teoria da probabilidade [Li and Vitányi, 1993]. No entanto, de um ponto de vista prático, a probabilidade pode possibilitar diferentes interpretações de uma estimativa. Essas várias interpretações podem influenciar na tomada de decisão.

A consideração da incerteza por meio da teoria de probabilidade é possível por meio da incorporação de distribuições probabilísticas para avaliação de alternativas e pesos de critérios [Banuelas and Antony, 2004, Gervásio and Simões Da Silva, 2012]. Quando se utiliza um tipo adequado de distribuição de probabilidade, é possível levar em consideração o tipo de incerteza de estocasticidade. Em particular, a distribuição uniforme de probabilidade torna possível modelar a ambiguidade cardinal e ordinal, e também informações parciais ou completamente ausentes, conforme mostrado por Tervonen and Lahdelma [2007].

Quando se realiza a modelagem da incerteza por meio de métodos baseados em probabilidade é possível conduzir testes de hipóteses do resultados, permitindo a tomada de decisão para um determinado nível de confiança específico. É possível realizar a integração de simulações de Monte Carlo para gerar valores a partir das distribuições e usar esses valores simulados como entradas para os método de tomada de decisão [Creutz, 1987].

A identificação de heurísticas para avaliação de probabilidades por meio de pesquisa comportamental do tomador de decisão (TD) é uma técnica utilizada para prospectar tendências de probabilidade [Garthwaite et al., 2005]. Apesar da técnica ser comumente aceita, a prática de solicitar o fornecimento de probabilidades subjetivas ao TD tende a prejudicar a confiabilidade das estimativas [Kahneman and Tversky, 1972].

Garthwaite et al. [2005] analisaram o estado da arte dos métodos de levantamento de probabilidade. Para levantamento de distribuições de probabilidade, ferramentas de suporte visual, juntamente com o uso de consistência da informação estão entre os métodos mais usados em tomada de decisão multiobjetivo [Stewart, 1992].

Segundo Bouchon-Meunier et al. [1996], o uso de probabilidades para modelar imperfeições de informação e apoiar a decisão é mais adequado quando elas são resultantes de eventos aleatórios. É necessário que se haja conhecimento suficiente sobre possíveis estados ou eventos (estados da natureza, por exemplo) com fronteiras nítidas entre os dados de entrada. Este tipo de abordagem geralmente requer um modelo rigoroso para análises subsequentes [Bouchon-Meunier et al., 1996].

2.2.3.2 Teoria dos conjuntos *fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzido por Zadeh [1965]. É uma abordagem amplamente utilizada para modelagem da incerteza e apresenta grande aceitação com relação aos seus aspectos teóricos e aplicados. Os subconjuntos *fuzzy* são os meios pelos quais é possível representar classes ou conjuntos por intermédio de limites imprecisos. Nessa modelagem, o grau de pertencimento entre dois sub-conjuntos deixa de ser binário como na abordagem clássica, mas sim gradual.

A abordagem *fuzzy* é a técnica mais comumente usada para lidar com a incerteza

nos dados de entrada em problemas de tomada de decisão multiobjetivo. Aplicar os conjuntos *fuzzy* para lidar com a incerteza consiste em associar um sub-conjunto *fuzzy* às avaliações das alternativas, critérios de ponderação ou outros parâmetros do modelo.

Pode-se observar uma boa adequação da teoria *fuzzy* principalmente para aplicações em que seja necessário lidar com a incerteza devido à ambiguidade em dados cardinais ou ordinais. Dessa forma, a teoria *fuzzy* geralmente é associada a métodos tradicionais de tomada de decisão multicritério e multi-atributo como AHP [Rezaei and Ortt, 2013, Ashtiani and Abdollahi Azgomi, 2016], ELECTRE [Hatami-Marbini and Tavana, 2011, Vahdani and Hadipour, 2011], PROMETHEE [xiang Li and yi Li, 2010, Lolli et al., 2016] e MACBETH [Dhouib, 2014].

Pesquisas recentes [Ekel et al., 2006, Pedrycz et al., 2011, Ekel et al., 2016, Ramalho et al., 2019] mostram que a aplicação da teoria de conjuntos *fuzzy* pode servir para a consideração de diferentes tipos de incerteza. Seu uso em problemas de tomada de decisão oferece benefícios tanto de caráter fundamental, relacionadas com a possibilidade de obtenção de soluções mais eficazes³ e também a possibilidade de considerar, simultaneamente, diferentes manifestações do fator de incerteza [Ekel et al., 2011].

Quando são analisados modelos multiobjetivo é necessário solucionar as questões fundamentais de normalização das funções objetivo, seleção de princípios de otimalidade e consideração das prioridades (importâncias) das funções objetivo. Sua resolução e o desenvolvimento de métodos multiobjetivo são realizados seguindo direções consideradas nos trabalhos de Rao [1996], Miettinen [1999], Pedrycz et al. [2011]. Sem sua discussão, é necessário salientar que uma das mais importantes questões na tomada de decisão multiobjetivo é a qualidade das soluções obtidas.

A qualidade de uma solução é considerada alta quando os níveis de satisfação dos critérios são iguais ou próximos uns dos outros (soluções harmoniosas) e quando as importâncias dos critérios são iguais [Ekel, 2001, 2002, Ekel and Galperin, 2003].

Considerando o exposto, é necessário indicar que quando é aplicada a abordagem de Bellman and Zadeh [1970] para a tomada de decisão em ambiente *fuzzy*, a concepção de “solução ótima” do problema multiobjetivo é definida com razoável validade, porque o máximo “grau de implementação de todos os objetivos” serve como um critério de otimalidade, que concorda com o princípio da garantia do resultado e produz uma linha para obter soluções harmoniosas [Ekel, 2002, Pedrycz et al., 2011]. Além disso, a abordagem de Bellman-Zadeh permite a criação de um método computacionalmente eficiente e rigoroso⁴ [Pareto, 1886] para a análise de modelos multiobjetivo [Pedrycz et al., 2011].

³ Menos conservativas.

⁴ Do ponto de vista da obtenção de soluções que pertencem ao conjunto de Pareto.

2.2.3.3 Teoria evidencial

A teoria evidencial foi introduzida em 1967 por Arthur P. Dempster, sendo posteriormente aperfeiçoada por Glenn Shafer em 1976 [Dempster, 2008, Smets, 2005]. Esta teoria atribui graus de credibilidade (representada por funções de credibilidade) com base nas evidências disponíveis no processo de tomada de decisão multicritério.

Em vez de descrever um problema multi-atributo como uma matriz de decisão, a abordagem evidencial utiliza uma matriz de decisão estendida, no qual cada avaliação de uma alternativa é descrita por uma avaliação distribuída usando um grau de credibilidade.

O modelo utiliza o conceito de quantificação da credibilidade por meio de probabilidades subjetivas. Dessa forma, a probabilidade da união de dois eventos mutuamente exclusivos é a soma de suas respectivas probabilidades, o que atribui um caráter probabilístico para consideração da incerteza.

A diferença entre a teoria probabilística e a teoria evidencial é que, no caso da teoria de probabilidade, a incerteza é atribuída a cada evento possível e esses eventos são mutuamente exclusivos. Além disso, o somatório de todas essas incertezas atribuídas a eventos individuais sempre deve ser unitário ao passo que na teoria evidencial, a incerteza é atribuída não apenas a cada evento, mas também a todos os seus subconjuntos. Conseqüentemente, a teoria evidencial possibilita a modelagem de informações parciais variantes no tempo [Ju and Wang, 2012].

A teoria evidencial mostra-se bastante flexível, sendo capaz de modelar fontes de dados com caráter estocástico e com presença de ambiguidade de fontes ordinais ou cardinais [Deng and Yao, 2014, Guo et al., 2007].

Liu et al. [2015] propuseram um método de análise baseada em ordenação que lida com a ambiguidade ordinal na avaliação das alternativas e nos pesos dos critérios, resultante da divergência entre os tomadores de decisão.

2.3 Conclusões

Como os métodos de tomada de decisão, multicritério ou multi-atributo, são caracterizados por permitir que os tomadores de decisão façam avaliações de alternativas com base em suas preferências, onde dados subjetivos⁵ estão potencialmente presentes. Esta característica justifica o fato de que a incerteza devido à ambiguidade é o principal tipo de incerteza que afeta os dados de entrada nos problemas de tomada de decisão [Pelissari et al., 2021]. Nesse sentido, a teoria *fuzzy* aparece como a principal técnica para modelar dados incertos devido à ambiguidade.

⁵ Especialmente dados ordinais.

A teoria de probabilidade tem se mostrado adequada para lidar com a incerteza devido à informação parcial (ou informação totalmente ausente) na definição dos pesos dos critérios, e estocasticidade e ambiguidade cardinal nas avaliações das alternativas. A teoria evidencial é mais adequada para se modelar a estocasticidade e é uma alternativa à teoria probabilística quando a distribuição de probabilidade ou seus parâmetros são desconhecidos.

A teoria evidencial também pode lidar com informações parciais, ou informações completamente ausentes nos pesos dos critérios, sendo a única teoria identificada capaz de lidar com informações incompletas na avaliação de alternativas, bem como permitir uma interpretação estatística direta dos resultados.

Todas as teorias estudadas possuem a capacidade de modelar dados ordinais quando estes são definidos usando termos linguísticos. No entanto, a teoria *fuzzy* se mostra mais adequada nesses casos, pois a perda de informações é menor do que quando eles são meramente transformados em dados ordinais.

À luz da revisão bibliográfica, avaliando-se os métodos presentes na literatura para consideração da incerteza, observa-se aderência do problema a ser resolvido com o uso da teoria *fuzzy* [Bellman and Zadeh, 1970] adaptada para a análise de problemas multiobjetivo [Ekel, 2002, Ekel et al., 2008, 2016].

Considerando que Roy [1968], Zopounidis and Pardalos [2010] justificam a necessidade de obtenção das soluções robustas em análise de modelos multicritério, verifica-se que os resultados de Ramalho et al. [2019], Silva et al. [2020], associados com a generalização da abordagem clássica⁶, podem servir para esse objetivo [Luce and Raiffa, 1957, Raiffa, 1968, Webster, 2003].

Os resultados de Silva et al. [2020], Pedrycz et al. [2011] são associados com a combinação de dois ramos de matemática de incerteza: elementos da teoria de jogos e da teoria de conjuntos *fuzzy*. Esses resultados permitem executar a análise multi-atributo ou multiobjetivo em condições de incerteza, baseada na abordagem possibilística⁷ de acordo com o esquema geral [Pereira et al., 2015] direcionado na utilização a informação quantitativa disponível em grau máximo para reduzir as regiões de incerteza das soluções. Se o poder de processamento da informação quantitativa não permite gerar as soluções únicas, o esquema presume a aplicação da informação de caráter qualitativo, baseado em conhecimento e experiência de profissionais envolvidos em processo de tomada de decisão.

Os resultados de Pereira [2014] mostram que um estudo mais aprofundado a respeito das técnicas de construção de cenários para a modelagem de incerteza é um caminho importante a ser seguido. Em particular, uma abordagem eficiente de construção

⁶ Baseada em conjuntos *fuzzy* para lidar com a incerteza de informação em tomada de decisão monocritério para os problemas multicritério.

⁷ Considerando combinações representativas de dados iniciais, estados de natureza ou cenários

de cenários poderia reduzir o número de cenários a ser analisado sem grande redução na qualidade das soluções obtidas [Pedrycz et al., 2011].

Observa-se que o uso de abordagens *fuzzy* para lidar com a incerteza tem aumentado recentemente em comparação à teoria da probabilidade e outras técnicas tradicionais adequadas para lidar com as incertezas em torno dos dados. Na metodologia proposta, dois *frameworks* baseados em conjuntos *fuzzy* foram desenvolvidos realizando a integração e a operação do sistema, considerando os impactos na rede de distribuição e o comportamento dinâmico do veículo elétrico.

O processo de integração e operação é realizado por meio da rotina mostrada no fluxograma da figura 5.

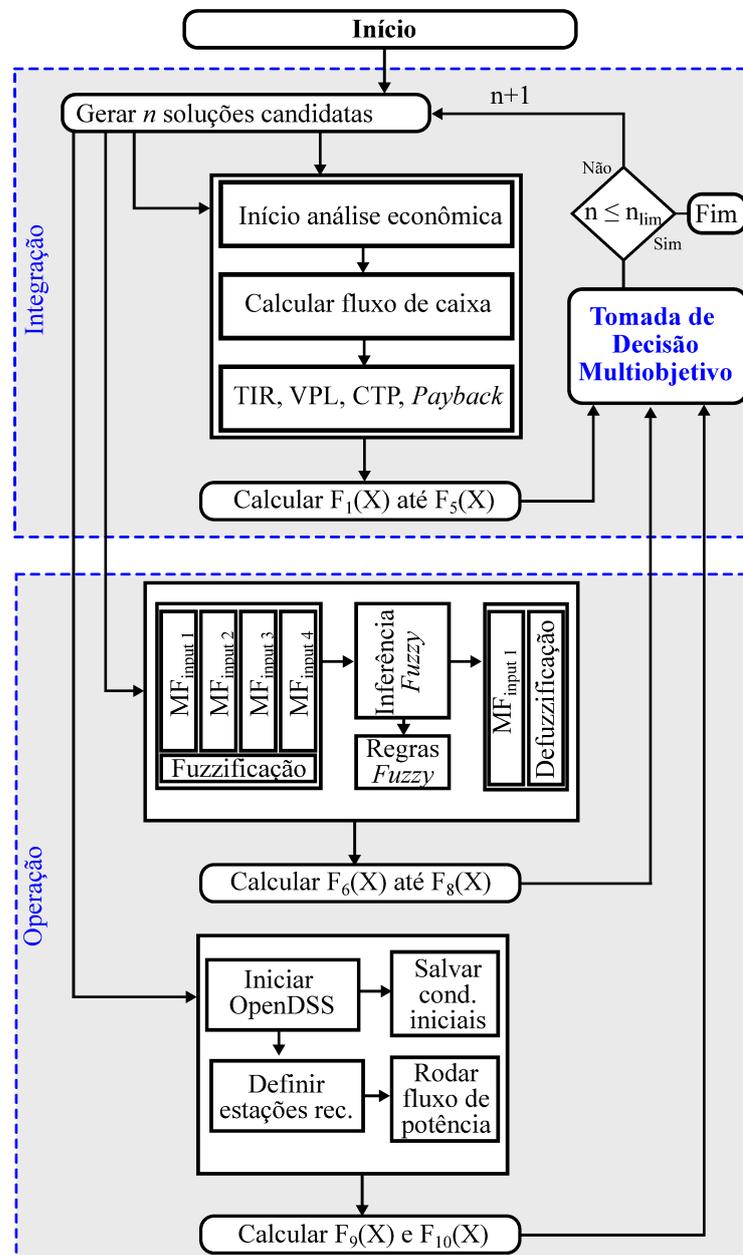


Figura 5 – Fluxograma do processo de tomada de decisão multiobjetivo.

A figura 5 mostra as etapas da abordagem desenvolvida, focada no tratamento de incertezas em duas etapas, que serão detalhadas nos próximos capítulos.

A integração é alcançada por uma abordagem de tomada de decisão multiobjetivo em ambiente *fuzzy* apresentada no Capítulo 3, enquanto um sistema *fuzzy* de gerenciamento energético trata da operação do sistema, descrito no Capítulo 4.

Capítulo 3

Integração do sistema de mobilidade elétrica

“When Henry Ford made cheap, reliable cars people said: ‘Nah, what’s wrong with a horse?’ That was a huge bet he made, and it worked.”

Elon Musk

Nesse capítulo, a abordagem de tomada de decisão multiobjetivo em ambiente *fuzzy* é detalhada, expressando-se as etapas de consideração da incerteza, bem como a introdução dos critérios de avaliação econômica, fundamentais para permitir a viabilidade do processo de integração dos sistemas de mobilidade elétrica na rede de distribuição de energia.

3.1 Tomada de decisão multiobjetivo

Geralmente, a tomada de decisão multiobjetivo é conhecida como um tipo contínuo de tomada de decisão multicritério¹, no qual o tomador de decisões precisa maximizar ou minimizar múltiplos objetivos. Um modelo de tomada de decisão multiobjetivo inclui um vetor de variáveis de decisão, as funções objetivo e suas restrições.

¹ Embora as variáveis possam ser contínuas ou discretas.

Na aplicação da abordagem de Bellman-Zadeh à tomada de decisão em ambiente *fuzzy* [Zadeh, 1965], pode-se analisar classes de modelos $\langle X, F \rangle$, que são úteis soluções de problemas de planejamento estratégico, inovação, novos negócios, pesquisa e desenvolvimento.

3.1.1 Funções objetivo

Ao se analisar os modelos $\langle X, F \rangle$, deve-se considerar um vetor de funções objetivo $F(X) = \{F_1(X), \dots, F_q(X)\}$, e o problema está associado com a consideração simultânea de todas as funções objetivo.

$$F_p(X) \rightarrow \underset{X \in L}{\text{extr}}, \quad p = 1, \dots, q$$

$$\text{onde } \left\{ \begin{array}{l} F_1(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_2(X) \rightarrow \max_{X \in L} \\ F_3(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_4(X) \rightarrow \max_{X \in L} \\ F_5(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_6(X) \rightarrow \max_{X \in L} \\ F_7(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_8(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_9(X) \rightarrow \min_{X \in L} \\ F_{10}(X) \rightarrow \min_{X \in L} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Deseja-se realizar a integração e operação do sistema de mobilidade elétrica, considerando a autonomia do veículo, os impactos na rede de distribuição, a eficiência energética e a viabilidade financeira.

Em (3.1), L é uma região factível em \mathbb{R}^n e cada função objetivo reflete um objetivo específico para o problema. As funções $F_1(X)$ a $F_5(X)$ são obtidas por meio do módulo econômico integrado ao estudo, representando respectivamente o custo inicial do projeto, o valor presente líquido (VPL), o custo total de propriedade (TCO), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno do investimento. O custo inicial, o TCO e o tempo de retorno serão minimizados, enquanto a TIR e o VPL serão maximizados.

A presença de diferentes variáveis financeiras em um problema multiobjetivo pode ter um fator essencial na análise final dos resultados [Osborne, 2010b]. A TIR por exemplo tem grande utilidade quando deseja-se comparar vários projetos ou investimentos em situações em que é difícil determinar a taxa de desconto apropriada, o que faz muito

sentido para o contexto de expansão de mobilidade em condições de incerteza. Já o VPL tende a ser um bom critério de escolha quando os fluxos de caixa podem mudar de positivo para negativo (ou vice-versa) ao longo do tempo ou quando há várias taxas de desconto, o que também pode ser uma realidade na implantação do projeto.

Já o *payback* ou tempo de retorno do investimento, determina quanto tempo levaria para a empresa responsável pela implantação do projeto obter fluxos de caixa suficientes para recuperar o investimento original. Nesse sentido, a TIR seria complementar e mediria dentro deste tempo, qual o montante de retorno esperado. Se a taxa for maior que o custo de capital, o projeto mostra-se adequado [Narayanan, 1985].

De forma paralela, o custo total de propriedade (TCO) é uma boa métrica para se definir o custo final de um ativo, incluindo a aquisição, a manutenção e operação ao longo de sua vida útil. No caso de um projeto que certamente tem ativos de alto custo de manutenção e operação é essencial ter uma métrica que avalie esse impacto ao longo do tempo [Lohmann and BAKSH, 1993].

As funções $F_6(X)$, $F_7(X)$ e $F_8(X)$ são avaliadas por meio das simulações dinâmicas, aplicando Matlab/Simulink [MATLAB, 2018], expressando respectivamente a autonomia do veículo que precisa ser maximizada e o número de ultracapacitores e consumo de energia do veículo que precisam ser minimizados. As funções $F_9(X)$ e $F_{10}(X)$ são obtidas por meio da análise de fluxo de potência no OpenDSS [Dugan and McDermott, 2011] e descrevem respectivamente as perdas e o impacto da tensão na rede, que é desejável que sejam minimizados.

Vale ressaltar que as funções objetivo $F_6(X)$ até $F_{10}(X)$ estão relacionadas à operação do sistema de mobilidade elétrica e serão detalhadas no Capítulo 4. O processo de tomada de decisão multiobjetivo precisa incluir essas funções objetivo nesta etapa com o intuito de garantir que a solução obtida seja a de menor custo global, considerando tanto o processo de integração, quanto a operação do sistema.

Analisando-se as funções objetivos do problema (3.1), é possível observar que algumas delas possuem natureza conflitante, como por exemplo a maximização da autonomia do veículo e a minimização do consumo de energia. Uma questão importante na análise multiobjetivo é a qualidade da solução. O nível de satisfação dos objetivos devem ser iguais ou próximos entre si, dando origem às chamadas soluções harmoniosas, que sempre pertencem ao conjunto de Pareto [Ekel et al., 2000].

Neste trabalho utilizou-se a uma abordagem adaptativa [Pedrycz et al., 2011], que implica em melhorias sucessivas da qualidade da solução na transição de $X_\alpha^0 \in \Omega \subseteq L$ para $X_{\alpha+1}^0 \in \Omega \subseteq L$ considerando a informação I_α do tomador de decisão.

Essa abordagem, introduzida por Ekel et al. [2016], permite substituir cada função objetivo $F_p(X)$ por um conjunto *fuzzy*:

$$A_p = \{X, \mu_{A_p}(X)\}, \quad X \in L, \quad p = 1, \dots, q \quad (3.2)$$

onde $\mu_{A_p}(X)$ é uma função de pertinência de A_p .

Uma solução *fuzzy* D com configuração de conjuntos *fuzzy* (3.2) é obtida como resultado da interseção $D = \bigcap_{p=1}^q A_p$:

$$\mu_D(X) = \min_{p=1..q} \mu_{A_p}(X), \quad X \in L. \quad (3.3)$$

E seu uso permite obter a solução que comprova

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{p=1..q} \mu_{A_p}(X) \quad (3.4)$$

reduzindo o problema (3.2) a uma busca por

$$X^0 = \arg \max_{X \in L} \min_{p=1..q} \mu_{A_p}(X) \quad (3.5)$$

O uso de (3.5) requer a construção de funções de pertinência $\mu_{A_p}(X)$, $p = 1, \dots, q$ refletindo os graus de obtenção de soluções ótimas por $F_p(X)$, $p = 1, \dots, q$. Para funções objetivo minimizadas, aplica-se [Pedrycz et al., 2011]

$$\mu_{A_p}(X) = \left[\frac{\max_{X \in L} F_p(X) - F_p(X)}{\max_{X \in L} F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)} \right]^{\lambda_p} \quad (3.6)$$

que permite a um DM definir fatores de importância λ_p , $p = 1, \dots, q$

A construção de (3.5) exige a solução dos problemas

$$F_p(X) \rightarrow \min_{X \in L} \quad (3.7)$$

e

$$F_p(X) \rightarrow \max_{X \in L}. \quad (3.8)$$

Assim, a solução de (3.2) exige a análise dos problemas $2q + 1$ (3.7), (3.8) e (3.4), respectivamente.

Uma vez que X^0 deve pertencer a $\Omega \subseteq L$, é necessário construir

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_D(X) &= \bigwedge_{p=1}^q \mu_{A_p}(X) \wedge \mu_\pi(X) \\ &= \min\left\{ \min_{p=1..q} \mu_{A_p}(X), \mu_\pi(X) \right\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde $\mu_z(X) = 1$ se $X \in \Omega$ e $X \in \Omega$ se $X \notin \Omega$.

Os procedimentos para resolver o problema (3.4), fornecem $X^0 \in \Omega \subseteq L$ de acordo com (3.9). Assim, pode-se notar uma equivalência de $\bar{\mu}_D(X)$ e $\mu_D(X)$. Por fim, a existência de condições adicionais de caráter qualitativo, definidas por variáveis linguísticas, reduz (3.6) a

$$X^0 = \arg \max_{X \in L} \min_{p=1 \dots q+s} \mu_{A_p}(X) \quad (3.10)$$

onde $\mu_{A_p}(X)$, $X \in L$, $p = q + 1, \dots, s$ são funções de pertinência de valores *fuzzy* das variáveis linguísticas correspondentes.

3.1.2 Critérios econômicos

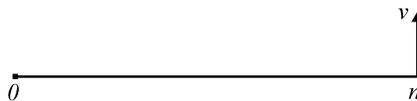
No processo de tomada de decisão multiobjetivo, os critérios econômicos servem para fundamentar a escolha da solução, de forma a garantir a eficiência dos investimentos a serem realizados na escolha de uma determinada alternativa ao longo de um período de tempo. Apresenta-se aqui um modelo matemático para a avaliação econômica das soluções candidatas, considerando o valor presente líquido (VPL), o custo total de propriedade (CTP), o custo médio ponderado de capital (CMPC), a taxa interna de retorno (TIR) e a estimativa de *payback* [Munda et al., 1995].

3.1.2.1 Valor presente líquido

O modelo utiliza o conceito de VPL para uma correta avaliação do fluxo de caixa ao longo do período de n anos. De forma genérica, para trazer um valor v , associado com um gasto ou com um ganho do ano n para um ano base (figura 6), basta multiplicar este valor v por um fator, como mostra a equação abaixo:

$$VP(v, d, n) = \frac{v}{(1 + d)^n} \quad (3.11)$$

Figura 6 – Valor presente de um valor único v .



Fonte: Autoria própria.

onde d é a taxa anual de desconto usada para a conversão do ano n para o ano base $n = 0$. No caso de um valor se repetir ao longo do período como uma série uniforme de n pagamentos (figura 7), o valor presente correspondente a essa série pode ser obtido pela função abaixo [Taylor et al., 2012, Ye and Tiong, 2000]:

$$VPS(v, d, n) = v \left[\frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \right] \quad (3.12)$$

Figura 7 – Valor presente de uma série uniforme de n pagamentos.

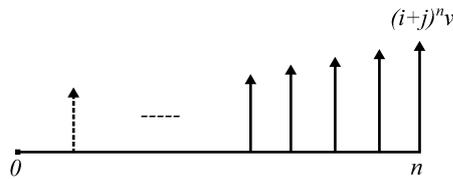


Fonte: Autoria própria.

Finalmente, no caso de uma quantidade crescente (figura 8), que aumenta a cada intervalo de tempo segundo uma taxa j , o valor presente é obtido multiplicando-se o valor do primeiro ano por um fator como mostra a equação abaixo:

$$VPC(v, d, n, j) = v \left[\frac{1 - \left(\frac{1+j}{1+d}\right)^n}{d - j} \right] \quad (3.13)$$

Figura 8 – Valor presente de uma série crescente de n pagamentos.



Fonte: Autoria própria.

O VPL nesse trabalho é utilizado de forma incremental, comparando-se as duas tecnologias diesel e elétrico, de forma a explicitar a viabilidade ou não da transição energética. Isso é possível pela diferença entre o fluxo de caixa dos custos de integração de um ônibus elétrico e de um ônibus à diesel com características semelhantes [Stephen, 1995].

Dessa forma, o VPL mostra-se como uma importante função objetivo do processo de integração do sistema de mobilidade elétrica, sendo fundamental para indicar a viabilidade do projeto. O projeto será viável financeiramente caso a diferença entre o valor presente de todas as entradas e saídas do fluxo de caixa seja maior que zero [Elmaghraby and Herroelen, 1990].

3.1.2.2 Custo total de propriedade

O CTP ou TCO, do inglês *total cost of ownership*, pode ser calculado por meio do somatório dos custos para adquirir, operar e manter o sistema de mobilidade elétrica, incluindo o veículo (C_{bus}), o sistema de armazenagem (C_{sto}) e a infraestrutura de recarga

(C_{infra}) subtraído pelo valor residual dos ativos (C_{res}) ao fim do de um determinado período de tempo n [M. Ellram, 1995], podendo ser calculado pela equação

$$TCO = \sum_{i=1}^n (C_{aq} + C_{O\&M} - C_{res}) \quad (3.14)$$

onde $C_{aq} = C_{sto} + C_{infra} + C_{bus}$

O CTP complementa o VPL na avaliação da viabilidade da transição tecnológica, por permitir avaliar alternativas cujos valores iniciais de aquisição iniciais sejam muito diferentes, o que acontece no problema de implantação de sistemas de mobilidade elétrica [Ferrin and Plank, 2002].

A diferença entre o CTP e o VPL é que o custo total de propriedade não é capaz de medir os valores do fluxo de caixa de forma temporal, ponderando entradas de caixa futuras e presentes da mesma forma.

Bloomberg New Energy Finance [2018] utiliza o CTP para realizar um comparativo entre diversas tecnologias de mobilidade, entre elas diesel, gás natural e elétrico. Foi observado que nos cenários em que a utilização do veículo é realizada de forma significativa, é possível obter valores de CTP menor para ônibus elétricos do que para as demais tecnologias. Isso ocorre devido ao menor custo de manutenção e maior rendimento dos veículos elétricos Bloomberg New Energy Finance [2018].

Em [IEA, 2020] também é avaliada a competitividade dos ônibus elétrico, quando comparados à ônibus à diesel por CTP de ambas as tecnologias, mostrando que para determinados cenários os sistemas de mobilidade elétrica podem ser bastante atrativos.

3.1.2.3 Custo médio ponderado de capital

O CMPC ou WACC, do inglês *weighted average cost of capital* pode ser denotado pela taxa de juros que um investidor utiliza para calcular o valor de um recurso financeiro no tempo [Miles and Ezzell, 1980]. Nesta pesquisa serão considerados cenários nos quais o financiamento da aquisição do ônibus elétrico é possível. Nesses casos, o custo inicial de aquisição do veículo, sistema de armazenagem e infraestrutura de recarga é minimizado e considerado na entrada do fluxo de caixa e o valor remanescente é distribuído ao longo da vida útil do ônibus [Magni, 2015].

Do ponto de vista prático, o CMPC mostra o quanto custa para a empresa de transporte público financiar o ônibus elétrico e sua infraestrutura, usando seu próprio capital ou capitais de terceiros, como por exemplo de bancos. O CMPC é mensurado considerando-se todos os custos de financiamentos no processo de investimento em um determinado projeto, conforme mostrado na equação

$$CMPC = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \cdot MV_i}{\sum_{i=1}^N MV_i} \quad (3.15)$$

Aplicando-se ao processo de integração de mobilidade elétrica na equação (3.15), N seria a quantidade de fontes de capital (entradas do fluxo de caixa); r_i seria a taxa de retorno exigida para o investimento i e MV_i seria o valor de mercado dos ativos do sistema de mobilidade, incluindo o ônibus elétrico, sistema de armazenagem e infraestrutura de recarga.

3.1.2.4 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno é um dos critérios econômicos utilizados que tem a capacidade de estimar o potencial de lucratividade do investimento na tecnologia de mobilidade elétrica. Basicamente a TIR é a taxa de desconto que teria a capacidade de igualar o VPL a zero em uma análise de fluxo de caixa descontado [Cheng, 2009]. Dessa forma, os cálculos da TIR baseiam-se na mesma fórmula do VPL, conforme mostrado na equação

$$VPL \left(\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1 + TIR)^t} - C_0 \right) = 0 \quad (3.16)$$

Em (3.16), C_t representa o fluxo de caixa líquido durante o período de tempo T e C_0 seria o custo inicial do investimento². De modo geral, quanto mais alta for a taxa interna de retorno, mais atraente será o investimento. Do ponto de vista da tomada de decisão multiobjetivo, a TIR é bastante relevante, pois ao se comparar alternativas de sistemas de mobilidade elétrica cujas características são semelhantes, a alternativa com a maior TIR provavelmente seria considerada a melhor do ponto de vista de retorno financeiro [Osborne, 2010a].

3.1.2.5 Estimativa de *payback*

O *payback*, ou retorno do investimento, refere-se ao tempo que leva para se recuperar o custo de um investimento e pode ser calculado por meio da avaliação do fluxo de caixa, medindo-se o tempo necessário (em anos) para que ele se iguale a zero [Kee and Bublitz, 1988].

De certa forma, o *payback* pode ser considerado o tempo em anos que levará para o investimento realizado atingir o ponto de equilíbrio e começar a ser lucrativo. Após a construção do fluxo de caixa, o cálculo do *payback* é bastante simples, sendo necessário apenas a divisão do valor inicial do investimento pelo fluxo de caixa anual.

² Nos estudos de caso desta tese, será considerado um período de 10 anos

Pela simplicidade de cálculo e por não levar em consideração variações no fluxos de caixa ao longo do tempo, no presente trabalho será utilizado o *payback* descontado [Bhandari, 1985] que considera variações no fluxo de caixa e pode ser calculado por meio da equação

$$\sum_{t=i}^{N_d} \frac{C_t}{(1+k)^t} = C_0 \quad (3.17)$$

Em (3.17), C_0 é a entrada de caixa inicial e C_t é a entrada de caixa líquida no período t . A grandeza k é o custo médio ponderado de capital do projeto. Logo, a atratividade de um investimento está diretamente relacionada ao seu período de retorno. Retornos mais curtos significam investimentos mais atraentes [Lefley, 1996].

3.1.3 Avaliação de custos

Para o cálculo dos critérios econômicos do presente estudo, o fluxo de caixa foi construído a partir da agregação de seis componentes principais: custo de aquisição do ônibus elétrico; custo do sistema de armazenagem; custo da infraestrutura da estação de recarga; custo da extensão de rede de distribuição; custo de manutenção e custo de energia elétrica [NREL, 2020].

3.1.3.1 Custo de aquisição do ônibus elétrico

O custo de aquisição do ônibus elétrico é um dos parâmetros mais significativos com relação ao impacto no custo final da implantação do sistema de mobilidade elétrica. Devido à redução do custo das baterias, o custo dos ônibus elétricos tem reduzido nos últimos anos [IEA, 2020]. Aqui, o custo do ônibus é discriminado do custo do sistema de armazenagem justamente para entender o impacto que a redução do custo da tecnologia pode causar na viabilidade da integração do sistema de mobilidade elétrica. O relatório da NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) [NREL, 2020] mostra que há uma relação linear entre a TIR da implantação dos sistemas de mobilidade elétrica com os custos dos ônibus elétricos.

Uma boa referência para custos de aquisição de ônibus elétrico é o relatório TCRP (*Transit Cooperative Research Program*) Synthesis 130 [Hanlin et al., 2018]. Para definição do custo a ser utilizado, deve-se avaliar o porte do veículo desejado, observando a faixa de bateria e tipo de carregador a ser utilizado, conforme abaixo:

$$C_{bus} = C_{aquis} + P_{cha} \times C_{adap} \quad (3.18)$$

Em (3.18), além do custo de aquisição do veículo c_{aquis} , também são levados em conta os custos de adaptações necessárias c_{adapt} para receber algum tipo de hibridização de tecnologias. A potência do sistema de armazenagem do ônibus é denotado por P_{arm} .

3.1.3.2 Custo do sistema de armazenagem

Considerando a presença de uma fonte híbrida de armazenagem, o custo do sistema C_{sto} , pode ser obtido por:

$$C_{sto} = c_{bat} \sum_{k=1}^t P_{bat}(k) + c_{hib} \sum_{k=1}^t P_{hib}(k) \quad (3.19)$$

Em (3.19), c_{bat} e c_{hib} são custos específicos (R\$/kWh) da bateria e da fonte de energia híbrida. $P_{bat}(k)$ e $P_{hib}(k)$ são a potência fornecida pela bateria e fonte de alimentação híbrida no momento k , respectivamente.

3.1.3.3 Custo da infraestrutura da estação de recarga

A integração de sistemas de mobilidade elétrica requerem uma consideração cuidadosa dos custos da infraestrutura de recarga associada. Existem três tipos principais de infraestrutura de recarga: o carregamento *plug-in*, o carregamento pantográfico e o carregamento indutivo sem fio [Hanlin et al., 2018].

- O carregamento *plug-in* refere-se à conexão manual do veículo a uma fonte de alimentação, geralmente realizada na garagem. Por questões de logística, usualmente a recarga ocorre durante o período noturno e a potência instalada varia entre 40-120kW. Um ponto negativo deste método é que ele geralmente é bastante lento e caso haja uma frota grande de ônibus, pode ser necessário várias unidades de recarga para realizar o carregamento simultâneo dos veículos.
- O carregamento pantográfico acontece por meio da conexão automatizada dos ônibus a um pantógrafo acoplado na parte superior veículos. Normalmente é instalado nas estações onde ocorrem as paradas para embarque e desembarque de passageiro, caracterizando uma recarga de oportunidade. A potência de carga varia entre 175–450 kW, e geralmente pode ocorrer entre poucos segundo ou alguns minutos, dependendo do nível de carga desejado. Um ponto de atenção desta tecnologia é o custo intermediário da infraestrutura de recarga e a necessidade de obras civis para sua implementação urbana.
- O carregamento sem fio ou indutivo geralmente é instalado na própria rota onde o ônibus circula. A potência de carregamento é baixa, pois o veículo está constantemente sendo carregado, podendo permanecer em serviço enquanto carrega na rota. A grande

vantagem é a ausência de conexão manual ou partes móveis, mas apresenta um custo de infraestrutura ainda muito elevado. Um ponto de atenção é que a existência de infraestrutura civil na rota restringe as possíveis mudanças futuras de itinerário dos ônibus elétricos.

O custo de desenvolvimento desse sistema consiste no somatório dos custos fixos e variáveis. Os custos fixos representam os custos de instalação básica (postes, suportes, estruturas de fixação) e os custos variáveis representam os custos dos equipamentos elétricos (conversor de potência, transformador e carregadores) que variam com a potência do sistema de recarga P_{cha} , e com o número de estações de recarga no sistema n_{cha} [Smith and Castellano, 2015]. O custo de desenvolvimento da infraestrutura da estação de recarga, C_{infra} , pode ser calculada por

$$C_{infra} = n_{cha}(c_{cha,fixed} + c_{cha,var} P_{cha}) \quad (3.20)$$

Em (3.20), $c_{cha,fixed}$ e $c_{cha,var}$ representam os custos fixos e variáveis de uma estação de carregamento, respectivamente.

3.1.3.4 Custo de extensão da rede de distribuição

Além da rede de distribuição existente à qual o sistema será integrado, muitas vezes será necessária a extensão de condutores de média tensão adicionais para a conexão das estações de recarga até o ponto mais próximo de conexão [Kunith et al., 2017].

O custo de extensão de rede de distribuição C_{ext} até a estação de recarga irá depender da distância entre esses dois pontos e da capacidade instalada da estação, que pode influenciar no custo c_{cond} do condutor de média tensão a ser utilizado, conforme mostrado na equação (3.21).

$$C_{ext} = D_i \times c_{cond} \quad (3.21)$$

A distância D_i até o ponto de conexão é calculado de acordo com a localização das estações e a rede existente mais próxima, por meio da utilização de informações geográficas dos pontos da rede e do trajeto planejado do ônibus elétrico.

3.1.3.5 Custo de manutenção

O custo de manutenção do ônibus elétrico considera as despesas com aquisição e troca de peças e acessórios além dos custos com a infraestrutura de recarga. Esses valores são uma função do deslocamento anual do veículo d_{annual} ao longo do seu trajeto e pode ser dado como:

$$C_{man} = c_{manut} \times d_{annual} \quad (3.22)$$

Em (3.22), c_{manut} é o custo de manutenção do veículo e da estação de recarga em kWh/km . O menor custo de manutenção dos ônibus elétricos, quando comparados com ônibus a diesel, é considerado um dos parâmetros mais influentes do ponto de vista financeiro para a análise da integração de sistemas de mobilidade elétrica [NREL, 2020].

Em algumas condições de uso, os menores custos de manutenção aliados à maior eficiência da tração elétrica, podem compensar os custos iniciais maiores de aquisição do veículo quando comparados com ônibus a diesel com mesmas características [ICCT, 2012].

3.1.3.6 Custo de energia

Na mobilidade elétrica, os custos com energia C_{ene} podem se tornar um componente substancial do sistema [An, 2020]. Portanto, é necessário que se considere este fator no processo de integração, tanto no que se refere à energia consumida E_{ch} (kWh) quanto aos encargos de demanda contratada $D_{contrat}$ (R\$/kW). No estudo é considerado as diferentes tarifas no horário de ponta e fora de ponta, conforme mostrado na seguinte equação.

$$C_{ene} = D_{contrat} + \frac{E_{ch_{HP}}}{\eta} \times C_{elec_{HP}} + \frac{E_{ch_{HFP}}}{\eta} \times C_{elec_{HFP}} \quad (3.23)$$

Em (3.23), o custo de eletricidade $C_{elec_{HP}}$ e $C_{elec_{HFP}}$ (R\$/kW) devem ser analisados para cada caso específico, considerando o horário de ponta e fora de ponta respectivamente. Além disso, existe uma grande diversidade de estruturas tarifárias que podem ser aplicadas, em função das individualidades do projeto, dependendo também da quantidade de ônibus da frota e do momento em que eles estiverem carregando simultaneamente. O rendimento η do veículo estudado também deve ser considerado, tendo em vista que a eficiência dos veículos elétricos é uma das grandes vantagens competitivas, quando comparados com equivalentes à combustão interna.

3.1.3.7 Custos totais

Para se definir o custo total de investimento no sistema de mobilidade elétrica é preciso levar em conta todos os custos apresentados, incluindo ônibus elétrico, sistema de armazenagem e estações de recarga.

Além disso, é importante que o processo de tomada de decisão considere as incertezas do processo de transição tecnológica de ônibus diesel para elétrico, sendo fundamental que o modelo seja capaz de considerar o nível de variação dos custos ao longo do tempo. Essa volatilidade é levada em conta na abordagem desenvolvida por meio dos cenários que serão estudados por meio da modelagem *fuzzy*.

Ao se considerar os critérios econômicos na abordagem desenvolvida, os parâmetros mais importantes deverão ser aqueles que tiverem maior influência no VPL. Este nível de influência é discutido por NREL [2020], que mostra que os custos da bateria ainda são os grandes responsáveis pelo aumento do custo total do sistema de mobilidade elétrica.

No processo de integração do sistema de mobilidade elétrica, existirão custos fixos e variáveis, que serão componentes do processo de dimensionamento e escolha da melhor alternativa. Estes custos, bem como os parâmetros de projeto mais influentes e voláteis são representados na tabela 3.

Tabela 3 – Relação de custos fixos, variáveis e sua volatilidade.

Custos	Parâmetro	Volatilidade
Fixos	Aquisição do ônibus, sem custo da bateria	Média
	Instalações civis da infraestrutura de recarga	Baixa
	Instalações civis da rede de distribuição	Baixa
Variáveis	Bateria e ultracapacitor (função do sistema de armazenagem)	Muito alta
	Infraestrutura da estação de recarga (função da estação de recarga)	Alta
	Energia elétrica (função do consumo do veículo)	Alta
	Manutenção (função da distância percorrida)	Média
	Condutores e equipamentos de proteção para extensão de rede (função da estação de recarga)	Baixa

Fonte: [NREL, 2020]

Na implantação de um sistema de mobilidade elétrica, o percentual proveniente de capitais próprios no investimento de aquisição do veículo elétrico e na construção das estações de recarga podem ser considerados uma única vez no início do período. Entretanto, as despesas com energia e manutenção e aquelas associadas com a depreciação distribuem-se ao longo do tempo. Dessa forma, baseando-se nas equações (3.11)–(3.13), o valor presente dos custos totais VPL_i associado com cada alternativa pode ser calculado por

$$\begin{aligned}
 VPL_i = & C_{ini} + VPS(C_{man}, C_{ene}, C_{ini}, d, n) \\
 & + VPS(c_f C_{ini}, d, n) \\
 & + VPS(p_{dep} C_{ini}, d, n) \\
 & - VP(p_{vr} C_{ini}, d, n)
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

onde $C_{ini} = c_p \times (C_{bus} + C_{sto} + C_{infra} + C_{ext})$

Em (3.24), C_{ini} representa o investimento inicial, relacionados com a aquisição do veículo, do sistema de armazenagem, da infraestrutura de recarga e da extensão de rede, multiplicados pelo percentual investido por meio de capital próprio c_p .

O financiamento dos ativos é representado por meio de um fluxo de caixa simples *VPS* multiplicado pelo percentual financiado c_f . O custo de energia C_{ene} e o custo de manutenção dos ativos C_{man} também são representados de forma recorrente por meio do *VPS*.

A depreciação é avaliada como um custo anual constante, definido como um percentual p_{dep} do investimento C , sendo d a taxa anual de desconto usada para a conversão do ano n para o ano base $n = 0$. E finalmente, o valor residual dos ativos ao final do horizonte considerado³ pode ser estimado a partir de uma porcentagem p_{vr} do valor C . O valor presente do custo residual possui valor negativo, pois é considerado uma entrada de caixa e está relacionado a revenda do ônibus após o seu tempo de vida útil para um mercado secundário.

3.2 Conclusões

A abordagem desenvolvida para integração dos sistemas de mobilidade elétrica é capaz de avaliar a viabilidade técnico-econômica de implantação do sistema de ônibus elétricos, quando comparado com um sistema de ônibus a diesel de características semelhantes. Do ponto de vista de minimização do custo, é possível observar que é necessária uma avaliação criteriosa dos custos fixos e variáveis ao longo do tempo, para que o investimento na transição tecnológica seja vantajoso.

Um análise crítica importante a ser feita a respeito da metodologia desenvolvida é que a natureza do processo de tomada de decisão não é estática, ou seja, uma decisão tomada em um determinado momento de tempo, irá considerar todas as consequências futuras desta decisão. Isso foi possível, através do fluxo de caixa futuro de cada decisão analisada, considerando todas as entradas e saídas financeiras ao longo de cada ano do estudo.

Nesta etapa de integração, as funções objetivos $F_1(X)$ até $F_5(X)$ podem ser construídas por meio da metodologia proposta para a tomada de decisão multiobjetivo. No próximo capítulo, a operação do sistema é avaliada por meio da construção das funções objetivo $F_6(X)$ até $F_{10}(X)$.

³ No presente estudo, todas as análises são feitas para um horizonte de 10 anos.

Capítulo 4

Operação e gerenciamento energético

“If I had asked the public what they wanted, they would have said a faster horse.”

Henry Ford

Neste capítulo são explorados os componentes relevantes para operação de sistemas de mobilidade elétrica na rede de distribuição, discutindo-se os parâmetros técnicos mais importantes para a modelagem dinâmica do ônibus elétrico, do seu sistema de armazenagem, sua estrutura de recarga, seu sistema de gerenciamento energético e sua interação com o sistema elétrico.

4.1 Sistema especialista *fuzzy*

Para se realizar a operação do sistema e se obter as funções objetivo $F_6(X)$ até $F_{10}(X)$ da equação (3.1), foi desenvolvido um sistema especialista também baseado na teoria de conjuntos *fuzzy* [Zadeh, 1965]. Sua estrutura se baseia na modelagem de funções de pertinência, que por meio de regras do tipo (*if-then*) permitem a correlação entre variáveis de entrada, tendo como resultado final uma solução de controle [Ekel et al., 2001, 2013]. Dependendo de sua estrutura particular, três tipos principais de modelos especialista *fuzzy* são possíveis:

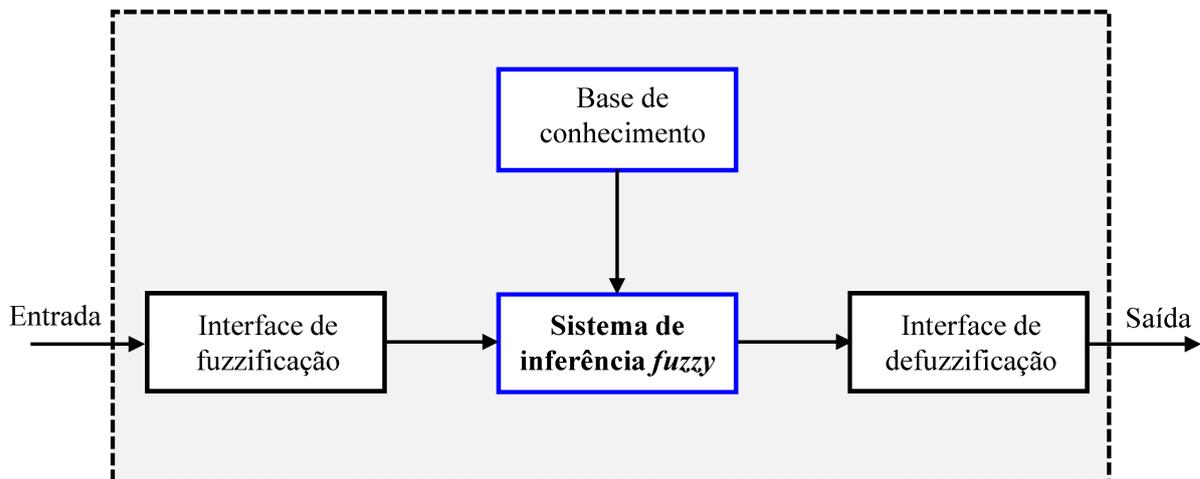
- modelo *fuzzy* linguístico (Mamdani) [Zadeh, 1973, Mamdani, 1977];
- modelo *fuzzy* relacional [Pedrycz, 1984];

- modelo *fuzzy* Takagi – Sugeno (TS) [Sugeno, 1985].

Uma distinção importante pode ser feita entre o modelo linguístico, que possui conjuntos *fuzzy* tanto nas funções de pertinência de entrada e de saída, e o modelo TS, onde as funções de pertinência de saída são funções bivalentes clássicas das variáveis de entrada, frequentemente chamados de conjuntos *crisp*. Os modelos relacionais *fuzzy* podem ser considerados uma extensão dos modelos linguísticos, que permitem diferentes graus de pertinência entre os termos linguísticos de entrada e saída. Neste trabalho, o modelo *fuzzy* linguístico é empregado para realizar a operação do sistema de mobilidade elétrica, por ser o mais adequado para a resolução de problemas que envolvem a aproximação de muitos sistemas e funções objetivo [Cordón, 2011]. Os modelos linguísticos também são relativamente fáceis de se modelar e suas regras e estruturas podem ser intuitivamente analisadas [Ekel et al., 2001].

Os sistemas especialistas *fuzzy* do tipo linguístico [Mamdani, 1975, 1977] apresentam dois componentes principais: (1) o sistema de inferência *fuzzy*, que implementa o processo de raciocínio *fuzzy* a ser aplicado na entrada do sistema para obter a saída desejada e (2) a base de conhecimento, que representa o conhecimento do especialista sobre o problema que está sendo resolvido, conforme representado graficamente na figura a seguir.

Figura 9 – Sistema especialista *fuzzy* linguístico.



Fonte: Adaptado de Cordón [2011]

Na figura 9, fuzzificação seria o processo de tornar um valor *crisp* em *fuzzy*. Esse processo é necessário dentro da abordagem, pois os dados de entrada, de caráter determinístico, na verdade carregam uma incerteza considerável. Se a forma de incerteza surgir devido à estocasticidade, ambiguidade ou informação parcial, então a variável deve ser representada por uma função de pertinência [Ross, 2000]. O processo de defuzzificação

seria o procedimento de converter novamente o valor *fuzzy* em *crisp* para ser representado na saída do sistema especialista [Ross, 2000].

A base de conhecimento contém as regras (*if-then*) que são compostas por variáveis linguísticas que assumem valores em um conjunto de termos com um significado do mundo real. Os conjuntos *fuzzy* são uniformemente modelados para todas as regras incluídas na base de conhecimento, de forma que seja legível e facilmente entendido por meio de semântica linguística.

Baseando-se em [Zadeh, 1973, Mamdani, 1975, 1977], um subconjunto *fuzzy* A pertencente ao universo U é caracterizado por uma função de pertinência que associa a cada elemento u de U um número $\mu(u)$ no intervalo $(0, 1)$ que representa o grau de pertinência de u em relação a A . O conjunto *fuzzy* A de $U = u_1, u_2, \dots, u_n$ pode ser denotado por

$$A = \sum_{i=1}^n \mu(u_i)/u_i = \sum_i \mu(u_i)_A \quad (4.1)$$

Pela definição de (4.1), três operadores básicos podem ser utilizados para realizar as operações *fuzzy*. A união, a interseção e o complemento.

A união de dois subconjuntos *fuzzy* A e B é denotada por $A + B$ e é definida por

$$A + B = \sum_i \mu(u_i)_A \vee \mu(u_i)_B \quad (4.2)$$

onde \vee representa máximo, sendo que nas regras *fuzzy*, a união corresponde ao sinal lógico *OR*. Da mesma forma, a interseção de A e B é denotada $A \cdot B$ e é definida por

$$A \cdot B = \sum_i \mu(u_i)_A \wedge \mu(u_i)_B \quad (4.3)$$

onde \wedge representa mínimo, correspondendo ao sinal lógico *AND* nas regras *fuzzy*. Finalmente, o complemento de um conjunto A é denotado por A^c e é definido por

$$A^c = \sum_i 1 - \mu(u_i)_A \quad (4.4)$$

Nas regras *fuzzy* a operação de complemento equivale a regra lógica de negação, ou seja, *NOT*.

4.2 Modelagem do sistema de gerenciamento energético

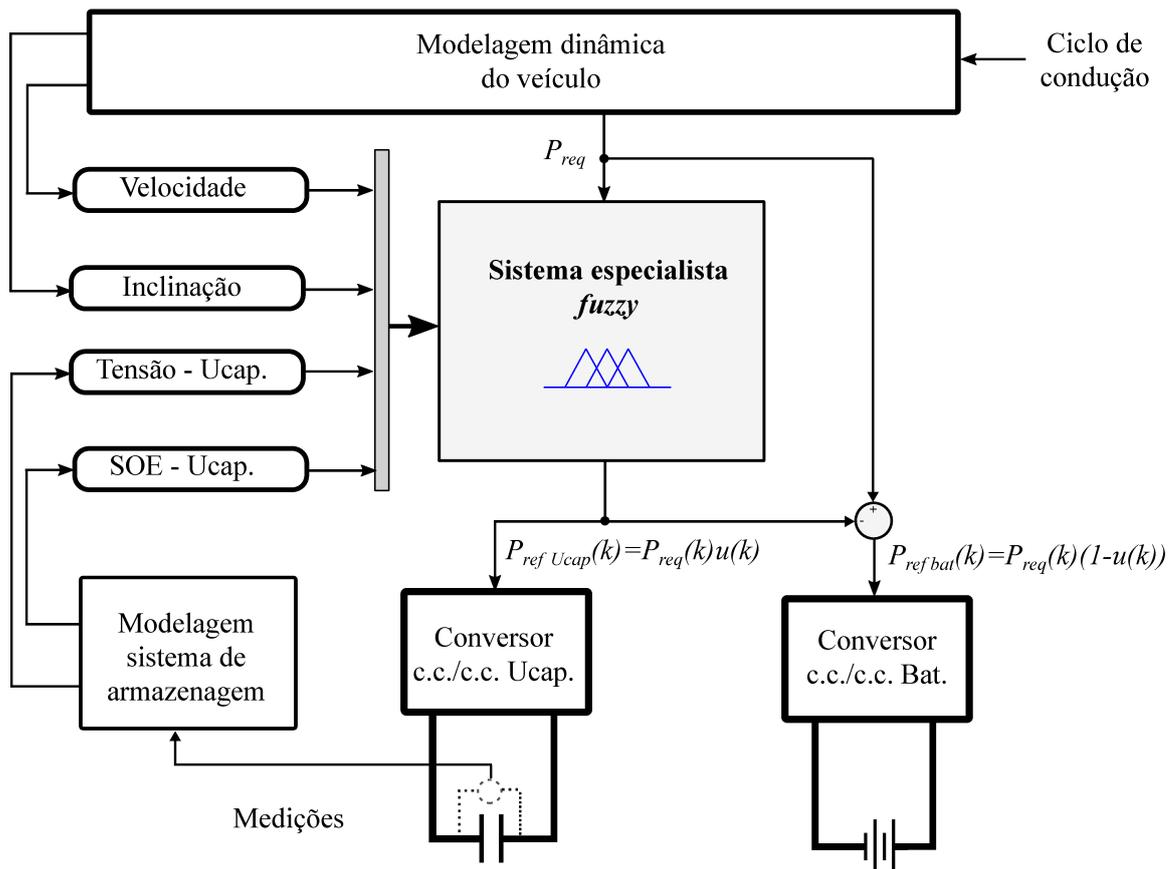
Os princípios componentes técnicos do sistema especialista *fuzzy* proposto são apresentados nesta seção. De acordo com a modelagem financeira realizada no Capítulo 3,

o custo de aquisição (*CAPEX*) da bateria do veículo é um dos maiores responsáveis pelo alto custo do veículo.

Além do *CAPEX*, seu custo operativo (*OPEX*) também é bastante elevado devido a sua limitação de ciclos de carga e descarga ao longo da sua vida útil [Xiong et al., 2018]. Para exemplificar a modelagem realizada, nos diagramas a seguir será utilizado um sistema híbrido de baterias e ultracapacitores, apesar desta abordagem também ser adequada para outros sistemas de gerenciamento energético com fontes híbridas.¹

Como regra geral, a saída do sistema de gerenciamento energético deve ser uma referência de comando para o conversor c.c./c.c. da fonte híbrida, nesse caso o ultracapacitor. A diferença do comando de referência do ultracapacitor em relação a energia requerida pelo veículo será a referência de comando para o conversor c.c./c.c. da bateria, conforme mostrado na figura 10

Figura 10 – Esquema de controle *fuzzy* para o veículo elétrico.



Fonte: Autoria própria.

Esta referência de comando é calculada para fornecer a energia para impulsionar o

¹ Nesta tese é realizada aplicações com modelagem de baterias e ultracapacitores no capítulo 6 e de baterias NCM e LFMP no capítulo 7.

veículo, realizando a divisão entre as fontes de energia existentes, de acordo com as regras definidas. Dessa forma, é definido um vetor de fluxo de energia U que determina quando e quanta energia a bateria e o ultracapacitor deverão descarregar no sistema no tempo k .

O passo de tempo é definido como 1 s e seu comprimento n irá representar o tempo médio, em segundos, previsto para um percurso completo do ônibus elétrico em sua trajetória. O espaço de solução vetorial U é dado como:

$$\vec{U} = \{\vec{u}(1), \vec{u}(2), \dots, \vec{u}(k), \dots, \vec{u}(n-1)\} \quad (4.5)$$

Em (4.5), os sub-vetores $\vec{u}(k = 1..n-1)$ devem ter cada uma de suas posições variando de 0 a 1, representando a razão de energia que está sendo fornecida pela bateria e pelo ultracapacitor no momento de tempo k .

De forma genérica, um modelo de avaliação quantificável é essencial para comparar os resultados de diferentes valores de k , uma vez que o objetivo é minimizar o custo total de implantação e operação do sistema

$$P_{refucap}(k) = P_{req}(k)u(k) \quad (4.6)$$

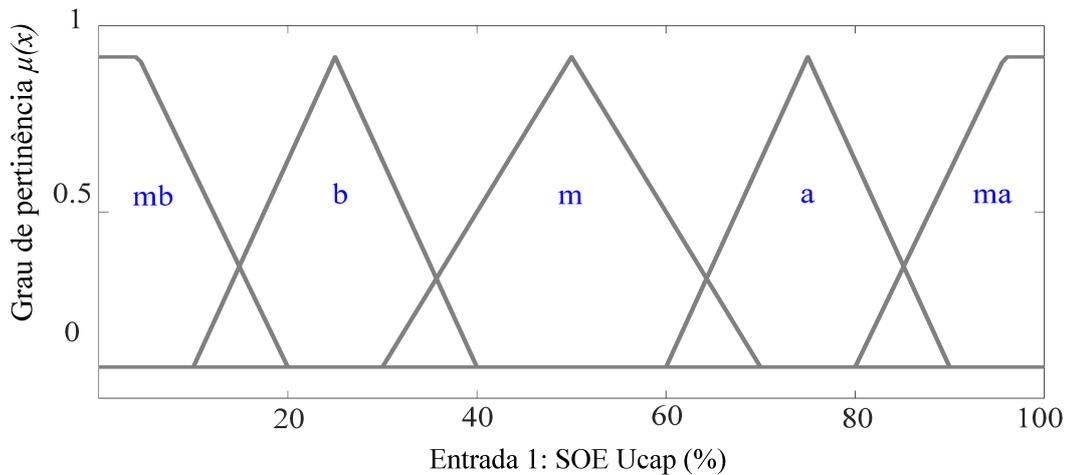
$$P_{refbatt}(k) = P_{req}(k)(1 - u(k)) \quad (4.7)$$

As equações (4.6) e (4.7) representam a referência de comando $P_{refucap}$ e $P_{refbatt}$ a serem entregues respectivamente pelo ultracapacitor e pela bateria no espaço de tempo k . O controlador baseado em lógica *fuzzy* desenvolvido possui quatro entradas, sendo: o SOE do ultracapacitor, a velocidade do veículo, a inclinação do trajeto e a tensão do ultracapacitor.

O sistema especialista foi idealizado de forma estabelecer o ultracapacitor como principal componente do sistema de armazenagem, apesar da sua limitada densidade energética. Dessa forma, é ideal que a bateria seja utilizada de forma complementar, se mantendo com maior nível de carga ao longo do trajeto e não chegando a descarga total ao longo do dia.

As funções de pertinência das quatro entradas e da saída são mostradas nas figuras a seguir, denotando "mb" muito baixo; "b" baixo; "m" médio; "a" alto e "ma" muito alto para cada respectivo grau de pertinência *fuzzy* $\mu(X)$.

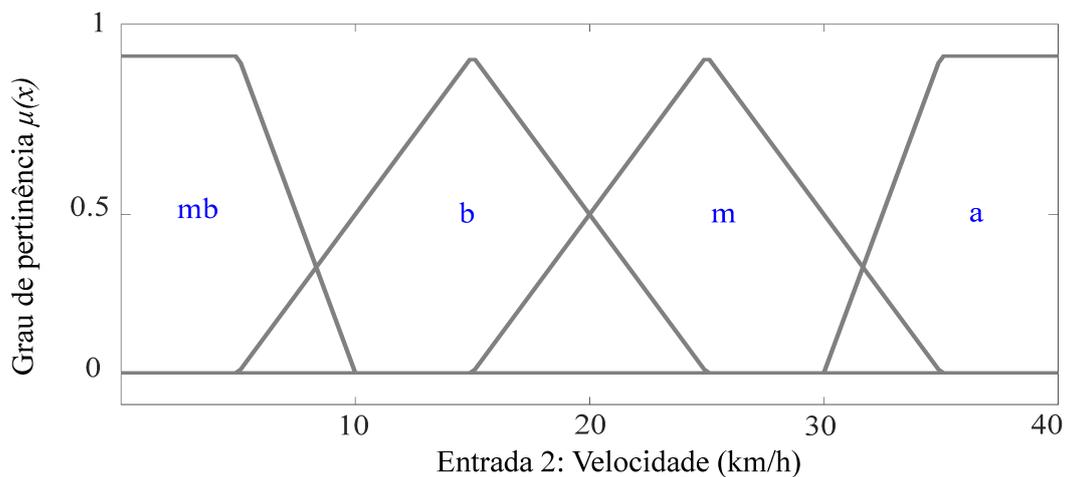
Figura 11 – Função de pertinência da entrada 1.



Fonte: Autoria própria.

A figura 11 representa a função de pertinência do SOE do ultracapacitor, que tem como premissa básica estar em nível alto para instantes de aceleração rápida e acíves acentuados. Além disso, a energia recuperada durante a frenagem regenerativa é armazenada primeiramente nos ultracapacitores devido a sua capacidade de absorver essa energia de forma mais rápida. Se os ultracapacitores estiverem totalmente carregados, a energia da frenagem regenerativa é capturada pela bateria.

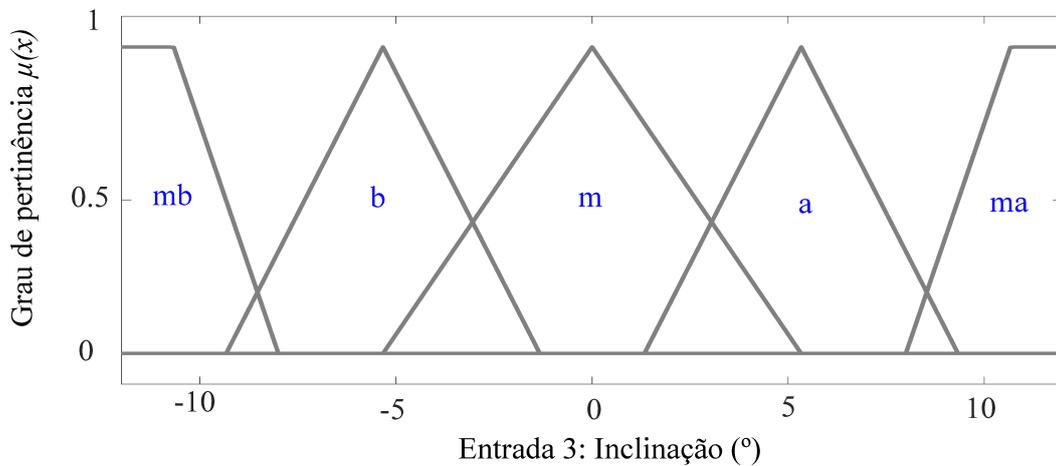
Figura 12 – Função de pertinência da entrada 2.



Fonte: Autoria própria.

A figura 12 retrata a função de pertinência de velocidade que deve ser monitorada para que em condições de baixa demanda energética (velocidade constantes ou desaceleração), a energia seja fornecida pela bateria, de forma a conservar o ultracapacitor para picos de potência requerida.

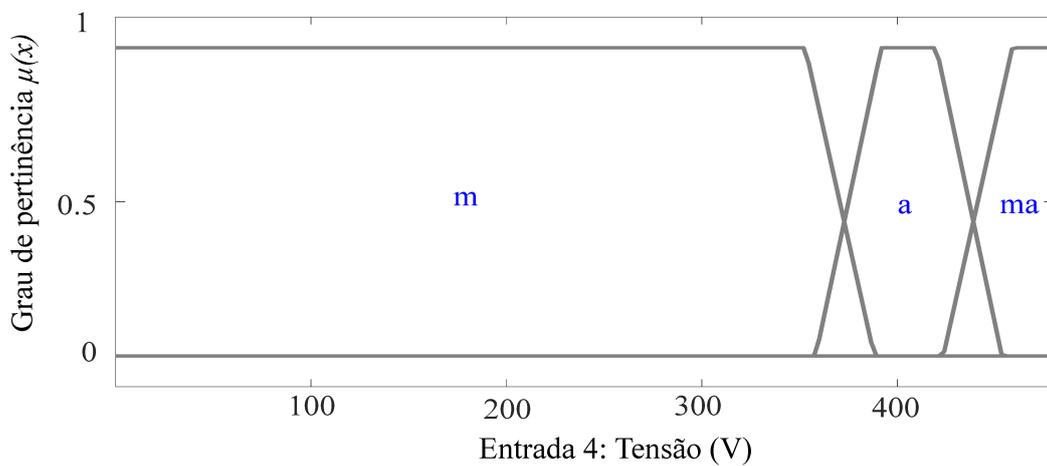
Figura 13 – Função de pertinência da entrada 3.



Fonte: Autoria própria.

A inclinação do trajeto é considerado na função de pertinência da figura 13, na qual também é de grande importância ser monitorada, pois em momentos de alta inclinação, a fonte híbrida, nesse caso o ultracapacitor poderá atuar de forma a auxiliar altas potências requeridas pelo veículo.

Figura 14 – Função de pertinência da entrada 4.

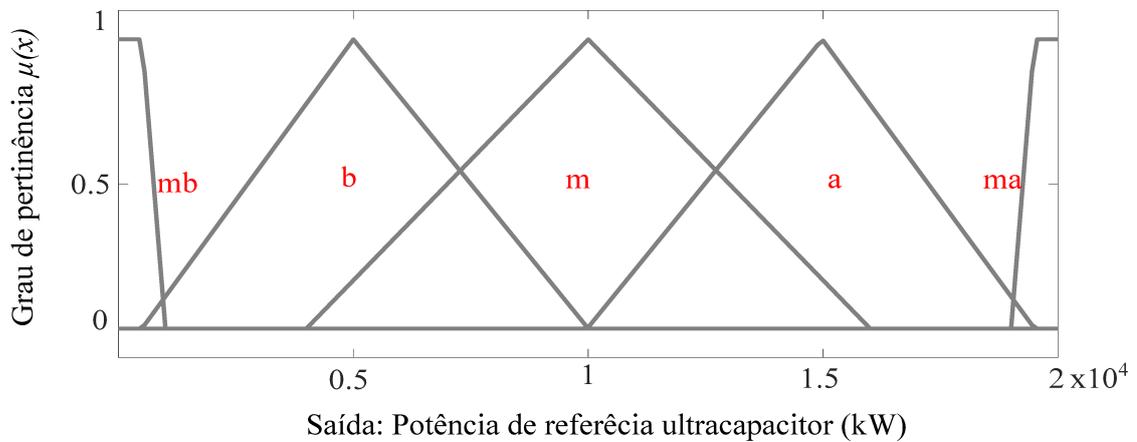


Fonte: Autoria própria.

A faixa de tensão operacional para o ultracapacitor é expressa por meio da função de pertinência da figura 14. A tensão máxima no ultracapacitor precisa ser limitada de acordo com as especificações do fabricante por questões de segurança².

² No estudo de caso esses parâmetros serão avaliados.

Figura 15 – Função de pertinência da saída.



A figura 15 representa a função de pertinência de saída do sistema especialista, que é uma referência de potência para o ultracapacitor $P_{refucap}(k)$. Vale ressaltar que a referência de potência para a bateria $P_{refbatt}(k)$ é a diferença necessária para complementar a potência requerida pelo veículo elétrico P_{req} .

De acordo com o princípio descrito na modelagem inicial, as condições de uso do ultracapacitor e bateria devem ser respeitadas para garantir um desempenho adequado do sistema, por meio do uso de regras *fuzzy* estabelecidas por um especialista.

Devido à necessidade de se minimizar o custo do sistema de armazenagem, as regras foram elaboradas de forma a permitir que a bateria fosse utilizada o mínimo possível, prolongando a sua vida útil e garantindo a eficiência global do ônibus elétrico.

Na literatura existem alguns trabalhos que fazem o gerenciamento energético da bateria e ultracapacitor do veículo utilizando regras *fuzzy*, tais com Caux et al. [2010], Li et al. [2012], Wu and C.-H. Zhang [2012], Michalczuk et al. [2015], Yin et al. [2017].

As regras *fuzzy* utilizadas nos trabalhos correlatos foram consideradas como referência de modelagem, realizando-se uma análise criteriosa dos seus pontos positivos e negativos, permitindo assim a elaboração do conjunto de regras *fuzzy* do presente trabalho, conforme mostrado no algoritmo 1.

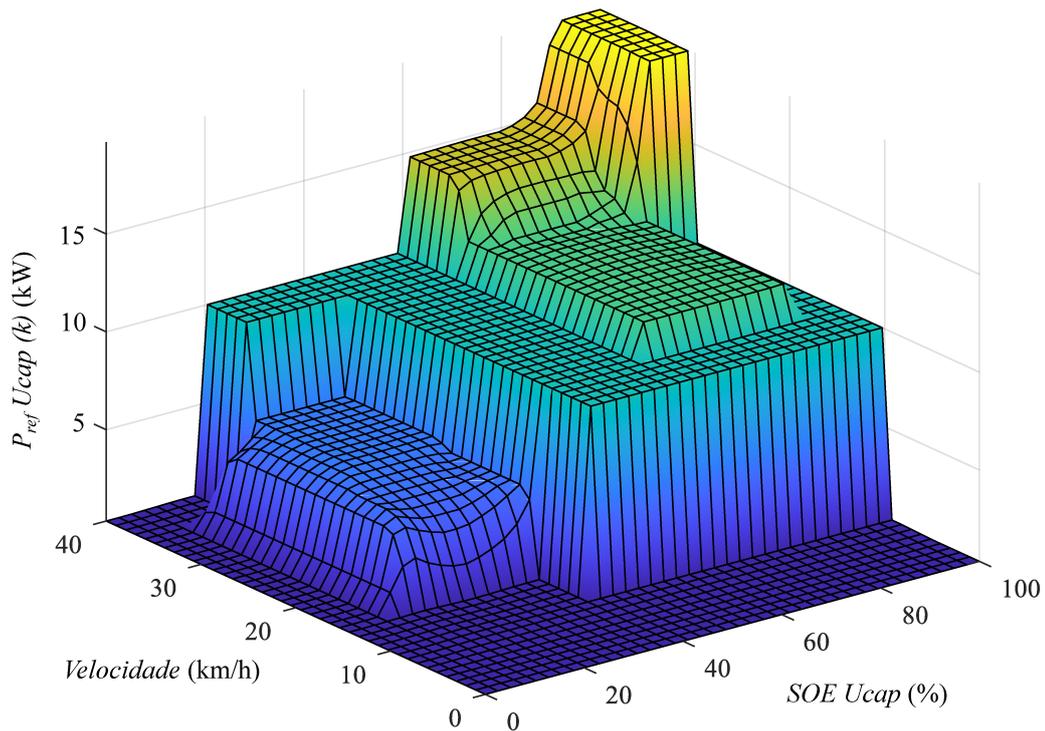
Algorithm 1: Conjunto de regras *fuzzy***Data:** Entrada do sistema de inferência *fuzzy***Result:** Saída do sistema de inferência *fuzzy*

Initialization;

while *inputs* $\neq \emptyset$ **do** read *inputs*; **if** *UcapSOE* = "mb" OR *Velocidade* = "mb" OR *Inclinacao* =
 "ma" OR *Ucap - tensao* = "ma" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "mb"; **if** *UcapSOE* = "a" AND *Velocidade* = "a" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "a"; **if** *UcapSOE* = "m" AND *Velocidade* = "a" AND *Inclinacao* =
 "a" OR *Ucap - tensao* = "ma" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "a"; **if** *UcapSOE* = "ma" AND *Velocidade* = "a" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "ma"; **if** *UcapSOE* = "a" AND *Velocidade* = "m" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "m"; **if** *Slope* = "mb" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "mb"; **if** *Inclinacao* = "b" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "b"; **if** *UcapSOE* = "b" AND *Velocidade* = "m" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "b"; **if** *UcapSOE* = "b" AND *Velocidade* = "b" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "mb"; **if** *UcapSOE* = "a" AND *Velocidade* = "m" **then** └ $P_{refUcap(k)}$ = "a";

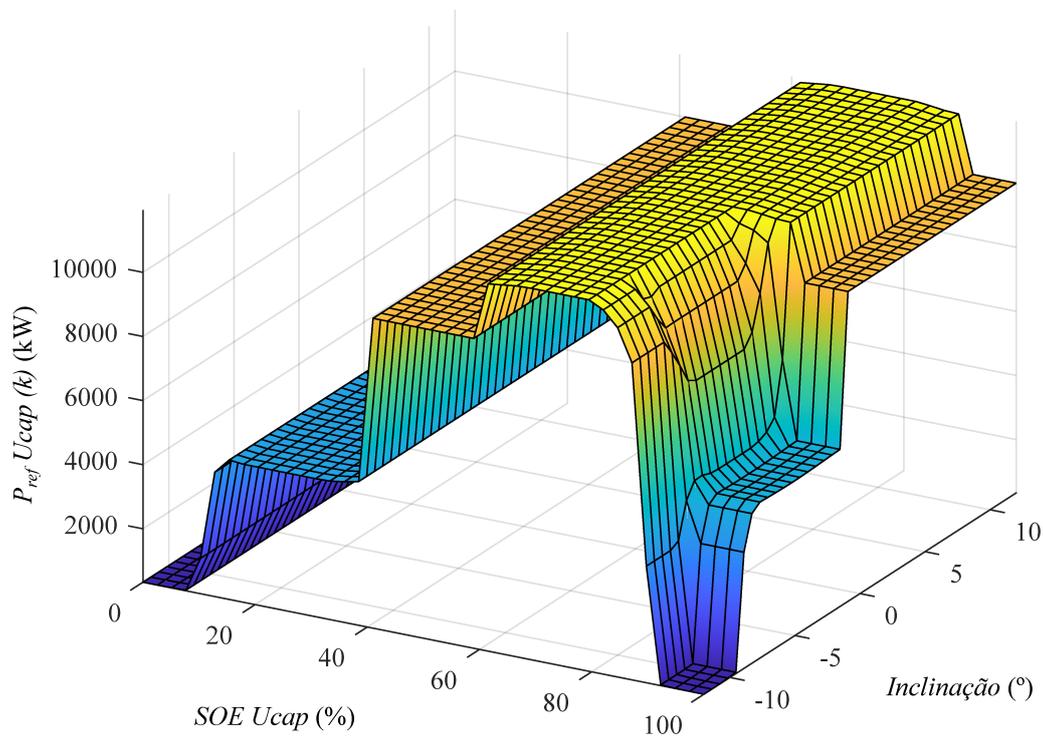
Para cumprir as exigências operacionais definidas por meio das funções de pertinência, o controlador basicamente realiza a correlação entre as suas funções de pertinência de entrada e saídas usando a lista de instruções *if – then* apresentadas. De forma a facilitar a visualização da interação destas regras com as funções de pertinência *fuzzy*, foram geradas curvas de superfície que são mostradas nas figuras a seguir.

Figura 16 – P_{ref} vs. velocidade vs. SOE_{UCap} .



Fonte: Autoria própria.

A figura 16 apresenta uma relação tridimensional entre o estado de carga do ultracapacitor, a velocidade do veículo e o respectivo comando do ultracapacitor necessário para respeitar as regras estabelecidas no controlador. É possível verificar por meio das regras *fuzzy* do algoritmo 1 que o ultracapacitor será utilizado como a principal fonte de energia do veículo, a não ser que o SOE do ultracapacitor esteja 'mb' ou 'b'. O ultracapacitor será utilizado de forma prioritária em velocidades mais altas ("a" e "mb"), quando ocorrerem picos de potência requeridas pelo veículo.

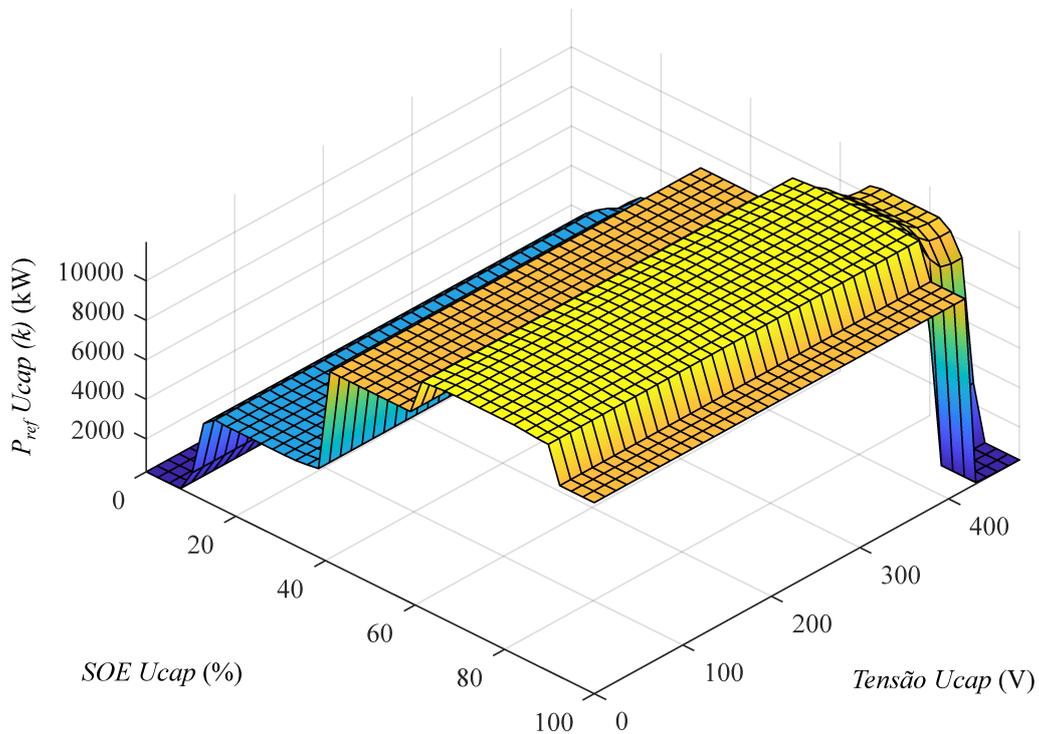
Figura 17 – P_{ref} vs. inclinação vs. SOE_{Ucap} .

Fonte: Autoria própria.

Na figura 17 é apresentada a relação entre a inclinação do trajeto e o SOE do ultracapacitor. É possível observar que o comando de potência entregue ao ultracapacitor cresce gradativamente com o aumento da inclinação do trajeto, desde que o ultracapacitor esteja com um nível de carga suficiente.

É verificado que para inclinações negativas (descidas) é possível que haja uso do ultracapacitor, mas em um nível bem menor do que em inclinações positivas. Entretanto, para o nível de inclinação mínimo, mesmo que o SOE do ultracapacitor esteja em seu máximo nível, não haverá comando para descarga.

Devido as altas correntes em baixa tensão (BT) dos ultracapacitores, a energia que realmente pode ser utilizada é menor do que a energia total armazenada neles [Michalczuk et al., 2013]. Por esta razão, decidiu-se que a faixa de variação do SOE seria mantida na maioria dos casos entre 30% e 100%, fazendo com que a energia utilizável seja 70% da energia total.

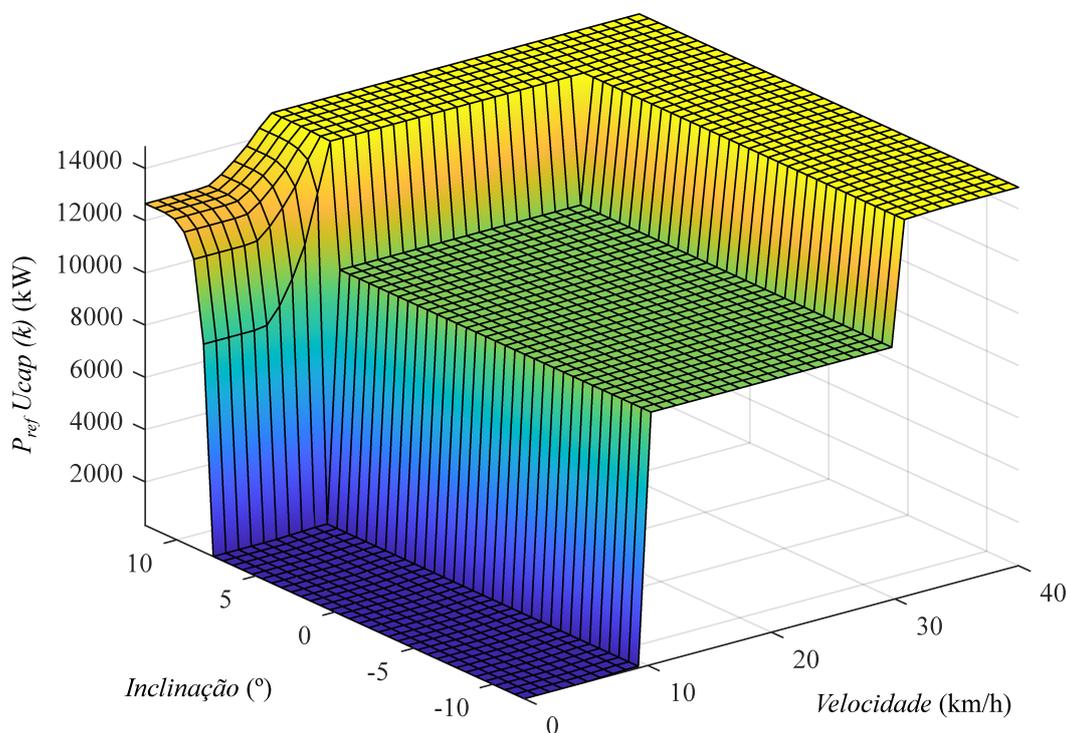
Figura 18 – P_{ref} vs. SOE_{UCap} vs. $Tensão_{UCap}$.

Fonte: Autoria própria.

É apresentado na figura 18 a relação tridimensional entre a tensão e o SOE do ultracapacitor e sua potência de referência. Uma das funções do sistema de gerenciamento energético é garantir que os níveis de tensão no ultracapacitor não atinjam níveis prejudiciais à segurança do sistema.

Por questões de segurança, é designado um valor de referência (que irá variar dependendo das especificações dos ultracapacitores, nesse estudo foi considerado 400 V), no qual a potência de referência será zerada, gerando uma região de restrição operativa.

Com relação ao estado de carga do ultracapacitor é observada uma gradação de potência, na qual a referência de carga é maior quando o nível SOE é mais elevado, sempre respeitando o nível mínimo de descarga de 30%.

Figura 19 – P_{ref} vs. inclinação vs. velocidade.

Fonte: Autoria própria.

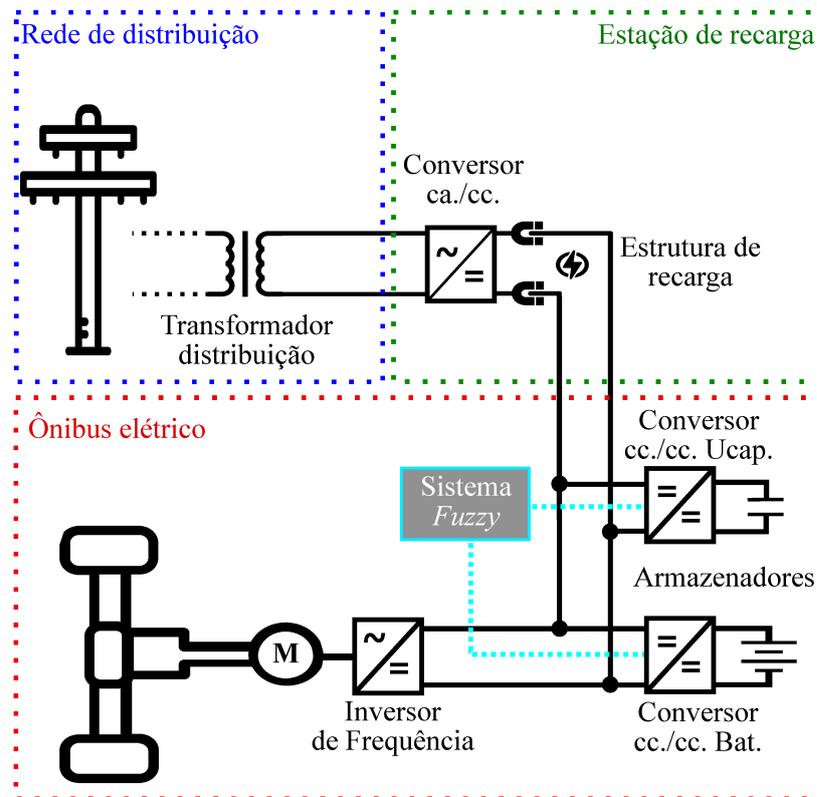
Tendo em vista que são as duas variáveis que irão impactar de forma mais significativa na demanda exigida pelo veículo ao longo de seu trajeto, na figura 19 é apresentada a relação entre velocidade, inclinação e o comando de potência para o ultracapacitor.

É possível verificar que o ultracapacitor não irá funcionar para velocidades baixas, a não ser que a inclinação do terreno seja alta. Isso ocorre porque o ultracapacitor é um elemento de baixa densidade específica e manter seu SOE em um estado adequado é particularmente importante.

Em momentos de maior necessidade de potência, por exemplo em velocidades altas combinadas com inclinações elevadas, é fundamental que o ultracapacitor esteja disponível para atuar no veículo. Isso significa que a energia durante a aceleração inicial não poderá ser fornecida apenas pelo ultracapacitor, sendo suprida na maioria dos casos pela bateria. Apenas nos casos em que a partida do veículo ocorrer em um trecho com inclinação "ma" haverá auxílio do ultracapacitor.

A seguir encontra-se a modelagem da dinâmica de todos os componentes relevantes que irão interagir com o sistema especialista *fuzzy*, sendo eles: ônibus elétrico, estação de carga e sua interação com a rede. A estrutura geral é mostrada na figura 20.

Figura 20 – Esquema de mobilidade elétrica e sua interação com a rede.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 20, é possível observar que o sistema especialista *fuzzy* desenvolvido é o responsável por enviar os sinais de potência para os conversor de potência do sistema de armazenamento híbrido, composto por bateria e ultracapacitor.

Esse comando de potência é calculado por meio das regras *fuzzy* apresentadas, levando em consideração a modelagem dos componentes dinâmicos e elétricos do sistema de mobilidade, conforme mostrado a seguir.

4.3 Modelagem do sistema de mobilidade elétrica

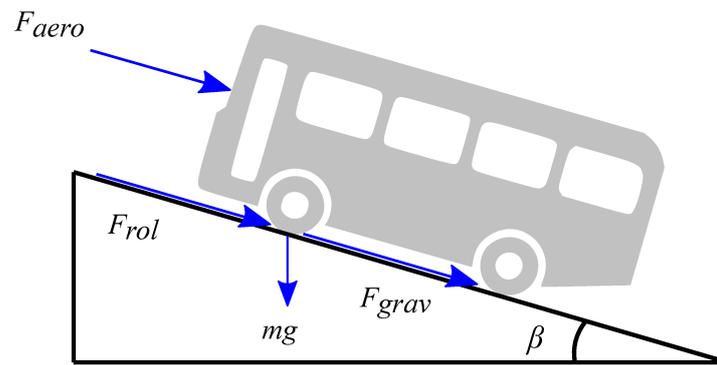
Primeiramente é realizada a modelagem do ônibus elétrico, representando as forças dinâmicas que atuam sobre este e que influenciam na demanda requerida pelo sistema de armazenamento. Posteriormente é realizada a modelagem da bateria, ultracapacitor e conversores de potência presentes no veículo e na sua estação de recarga. O detalhamento dessa modelagem é apresentado no Apêndice A.

4.3.1 Ônibus elétrico

4.3.1.1 Dinâmica do veículo

As diferentes forças que atuam em um veículo com massa total m_t movendo-se ao longo de uma via inclinada são representadas na figura 21 e são descritas a seguir [Gallet et al., 2018]:

Figura 21 – Forças de resistência ao movimento de um veículo.



Fonte: Autoria própria.

- (a) Força de resistência ao rolamento (F_{rol}): causado pelo atrito entre os pneus do veículo e o solo, sendo:

$$F_{rol} = m_t \times g \times f_{ro} \quad (4.8)$$

onde m_t é a massa total do veículo, g é a aceleração da gravidade e f_{ro} é o coeficiente de atrito do solo estudado.

- (b) Força aerodinâmica de arraste (F_{aero}): causada pela fricção do corpo do veículo com o ar. Sua expressão é:

$$F_{aero} = \frac{\rho_{air} \times A_f \times C_d \times V^2}{2} \quad (4.9)$$

sendo ρ_{air} a densidade do ar, A_f a área da superfície frontal do veículo, C_d o coeficiente de arraste aerodinâmico e V a velocidade do veículo.

- (c) Força gravitacional (F_{grav}): causada pela inclinação da via.

$$F_{grav} = m_t \times g \times \sin(\beta) \quad (4.10)$$

sendo β o ângulo de inclinação da via.

Finalmente, a potência requerida P_{req} pelo veículo pode ser determinado a partir da interação das forças que atuam no veículo e sua velocidade v_{bus} , conforme equação:

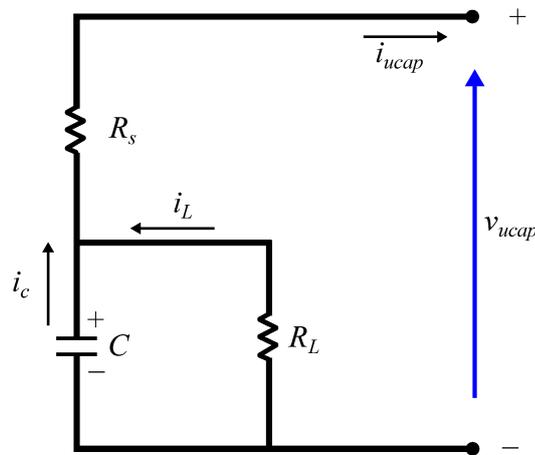
$$P_{req} = \left(m_t \frac{dv}{dt} + F_{rol} + F_{aero} + F_{grav} \right) \times v_{bus} \quad (4.11)$$

Sendo m_t a massa do veículo e dv/dt a aceleração necessária para mover o veículo ao longo de sua trajetória.

4.3.1.2 Ultracapacitor

O ultracapacitor, que possui a capacidade de realizar cargas e descargas ultrarrápidas, é o principal componente do sistema de armazenagem de energia do ônibus elétrico estudado. O circuito equivalente do banco de ultracapacitores adotado é baseado na representação clássica de Spyker [2000], demonstrado por um circuito equivalente composto por uma capacitância C , uma resistência em série R_S e uma resistência de fuga da isolação entre os dielétricos R_L , mostrado na figura 22.

Figura 22 – Circuito equivalente de um ultracapacitor.



Fonte: Adaptado de Spyker [2000]

Nessa representação, a resistência série R_S é calculada por meio dos parâmetros da especificação técnica do componente, utilizando-se a constante de tempo τ_S , que representa o seu tempo de descarga em uma resistência ôhmica R_d , sendo representado por

$$R_S = \frac{\tau_s}{C} - R_d \quad (4.12)$$

A resistência paralela R_L pode ser calculada por meio do tempo de auto-descarga do ultracapacitor τ_p pela equação

$$R_L = \frac{\tau_P}{C} \quad (4.13)$$

O desempenho do ultracapacitor pode ser representado em função do potencial elétrico dv_c/d_t no capacitor C , sendo expresso por meio da equação

$$\frac{dv_c}{d_t} = -\frac{i_{Ucap} + i_L}{C} \quad (4.14)$$

considerando que

$$i_L = \frac{v_c}{R_L} \quad (4.15)$$

é possível obter

$$\frac{dv_c}{d_t} = -\left(\frac{1}{C}i_{Ucap} + \frac{1}{CR_L}v_c\right) \quad (4.16)$$

E a tensão terminal do ultracapacitor durante a descarga pode ser expresso pela equação

$$v_{Ucap} = v_c - i_{Ucap} \cdot R_s \quad (4.17)$$

Finalmente, a potência total de saída do ultracapacitor P_{ucap} pode ser expressa por:

$$P_{ucap} = v_{ucap} \cdot i_{ucap} \quad (4.18)$$

4.3.1.3 Bateria

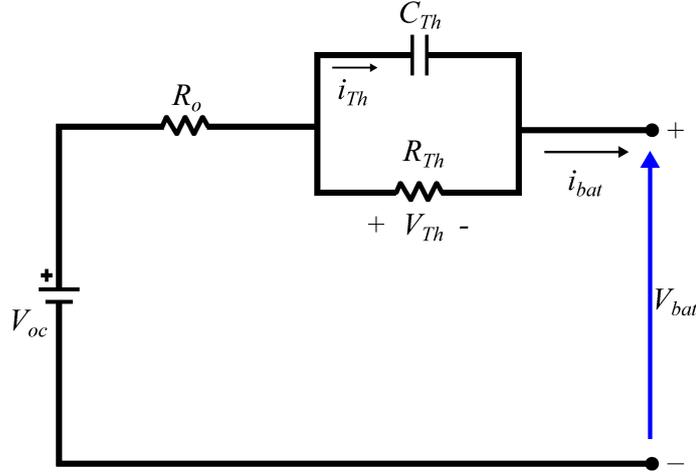
Para possibilitar um gerenciamento energético eficiente, é fundamental que o modelo seja capaz de considerar a variação da tensão de saída em função do seu próprio estado de carga [Roscher and Sauer, 2011, Gao et al., 2002, He et al., 2011]. Dessa forma, as características dinâmicas da bateria foram representadas pelo modelo clássico de Thevenin [Brittain, 1990], apresentado na figura 23.

O modelo Thevenin é composto por V_{oc} , que é a tensão de circuito aberto da bateria, pela resistência interna R_o e pelas impedâncias equivalentes de Thevenin R_{Th} e C_{Th} , que representam a polarização da bateria [He et al., 2011].

Vale ressaltar que o modelo de Thevenin utilizado é uma simplificação do real comportamento térmico e dinâmico da bateria que envolve modelos eletroquímicos mais detalhados e com maior custo computacional [Fleischer et al., 2014].

Para o presente trabalho optou-se por um modelo de bom compromisso entre precisão e complexidade, tendo em vista que o objetivo principal não é simular todos os detalhes da bateria, mas sim o comportamento global do veículo.

Figura 23 – Circuito equivalente de uma bateria.



Fonte: Adaptado de He et al. [2011].

O comportamento elétrico do modelo de Thevenin pode ser expresso por:

$$\dot{V}_{Th} = -\frac{V_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{i_{bat}}{C_{Th}} \quad (4.19)$$

$$V_{bat} = V_{oc} - V_{Th} - I_{bat}R_o \quad (4.20)$$

Em (4.19) e (4.20), V_{Th} é a tensão em C_{Th} e i_{Th} é a corrente de saída de C_{Th} . A capacitância equivalente C_{Th} é usada para descrever a resposta transitória durante o carregamento e o descarregamento das células [Roscher and Sauer, 2011, Gao et al., 2002]. Como as baterias são compostas por uma conexão em série de muitas células, caso seja utilizada uma representação estática que ignore o efeito da temperatura e de envelhecimento, é possível se construir um desenvolvimento numérico de uma única célula e replicar a modelagem para o restante da bateria, conforme realizado a seguir:

$$V_{battot} = V_{bat} \cdot N_{cell} \quad (4.21)$$

A tensão total da bateria V_{battot} pode ser obtida usando a equação (4.21), assumindo que todas as células têm um comportamento uniforme e que N_{cell} é o número de células que compõem a bateria [Mapelli et al., 2013]. A corrente e o estado de carga SOC da bateria podem ser definidos respectivamente por [Yu et al., 2016]:

$$i_{bat} = \frac{V_{battot} - \sqrt{V_{battot}^2 - 4R_o P_{reqbat}/N_{cell}}}{2R_o} \quad (4.22)$$

$$SOC(t) = SOC_{int} - \int_0^t \frac{i_{bat}(t)}{3600 \cdot C_{Th}} dt \quad (4.23)$$

Em (4.22) e (4.23), i_{bat} é a corrente de descarga da bateria, P_{reqbat} é a demanda total de energia da bateria e N_{cell} é o número total de células da bateria. $SOC(t)$ é o estado de carga da bateria no tempo t e SOC_{int} é seu estado de carga inicial.

Finalmente, a potência total de saída da bateria P_{bat} pode ser definida como

$$P_{bat} = V_{battot} \cdot i_{bat} \quad (4.24)$$

4.3.2 Estação de recarga

4.3.2.1 Estrutura de recarga

Os três principais tipos de infraestrutura para carregamento de ônibus elétricos são os sistemas *plug-in*, o carregamento indutivo e o carregamento aéreo por pantógrafo [Rogge et al., 2018, Chen et al., 2018, Pelletier et al., 2019, Bloomberg New Energy Finance, 2018].

Dependendo do conceito de carregamento, potência requerida e tempo de recarga/conexão, diferentes interfaces podem ser utilizadas. As suas principais características são listadas na tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo entre estruturas de recarga.

Tipo de estrutura	Potência requerida (kW)	Tempo de recarga
Sistemas <i>plug-in</i>	75 - 150	8h - 16h
Carregamento indutivo	200 - 600	Durante o trajeto
Carregamento pantográfico	120 - 480	15s - 45s

Fonte: Adaptado de Göhlich et al. [2014]

O carregamento *plug-in* é o sistema de carregamento mais tradicional e simples, principalmente pelo seu baixo custo de instalação e operação [Chen et al., 2018]. Existe uma variedade de potências de carregamento que influenciarão na velocidade de carga do veículo, dessa forma, é um sistema bastante versátil e aplicável a diversas categorias de ônibus elétricos [Pelletier et al., 2019, Bloomberg New Energy Finance, 2018].

Pesquisas recentes mostram que as tecnologias de baterias de íons de lítio têm avançado significativamente nos últimos anos em sua capacidade de receber recargas denominadas “extremamente rápidas”, nível XFC (do inglês, *extreme fast charging*), como é mostrado em [Lu et al., 2022] e apresentado comparativamente na tabela a seguir. Os valores assumidos para o cálculo são para uma bateria de capacidade igual a 60 kWh.

Tabela 5 – Comparativo entre tempos de carregamento *plug-in*

Carregamento	Tensão	Potência carregador	Tempo de carga (10-80%)
Nível 1	110 V (c.a.)	1,4 kW	30 horas
Nível 2	220 V (c.a.)	7,2 kW	5,8 horas
Nível 3	480 V (c.c.)	>50 kW	50 min.
Nível XFC	>800 V (c.c.)	>400 kW	7 min.

Fonte: Adaptado de [Kucevic et al. \[2020\]](#)

Estações de carregamento de corrente alternada (c.a.) do nível 1 e nível 2 são projetados para carregamento residencial, carregamento no local de trabalho ou vagas de estacionamento de longo período.

As estações de carregamento rápido de corrente contínua (c.c.) do nível 3 são projetadas para vagas de estacionamento público, onde os usuários do veículo desejam realizar a recarga em menos de uma hora.

As estações do nível XFC são estações de carregamento c.c. com um nível de tensão superior a 800 V e um nível de potência superior a 400 kW. Conforme mostrado na Tabela 5, o tempo de carregamento é de aproximadamente 7 minutos para 80% de SOC, o que aproxima bastante do tempo de abastecimento de um veículo à combustão interna.

No presente trabalho, serão exploradas a hibridização tanto com ultracapacitores, que permitem recargas ultra-rápidas na ordem de poucos segundos, quanto com baterias de diferentes tecnologias, que permitem recargas parciais rápidas. Os resultados serão apresentados respectivamente nos estudos de caso dos capítulos 6 e 7.

Além do carregamento *plugin*, também existe o carregamento indutivo, que seria uma opção com maior custo, e a que apresenta maior comodidade em termos de tempo de recarga e conexão. Apesar de já estar disponível comercialmente [[Mohamed et al., 2020](#)], as opções mais promissoras do ponto de vista tecnológico ainda estão em fase de pesquisa e projetos piloto ao redor do mundo [[Wu et al., 2011](#), [Machura and Li, 2019](#), [Ho et al., 2011](#), [Ahmad et al., 2017](#)].

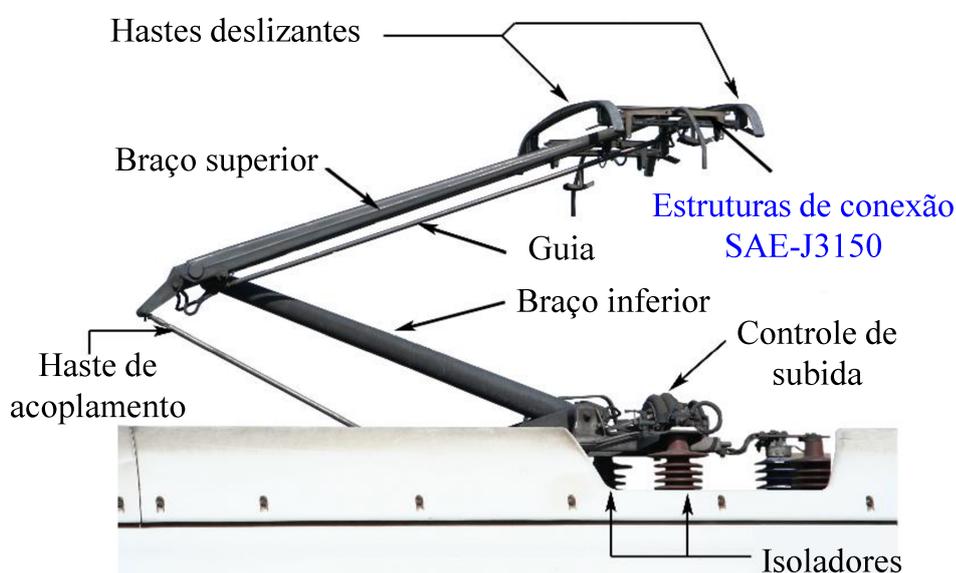
O carregamento pantográfico, que seria uma opção intermediária em termos de custo, está crescendo em popularidade nas frotas de ônibus na Europa e nos EUA nos últimos anos [[Bloomberg New Energy Finance, 2018](#)]. Este crescimento se deve principalmente a possibilidade da realização de carregamentos rápidos, o que permitiria a utilização de baterias menores embarcadas nos veículos [[Ortenzi et al., 2019](#), [Geno, 2015](#)].

Devido ao conceito de hibridização proposto no presente trabalho, no qual será utilizado um sistema de armazenagem com ultracapacitor e bateria, o tipo de carregador a ser modelado será o pantográfico, que é considerado o mais adequado para recargas ultra-rápidas [[Goehlich et al., 2014](#)].

4.3.2.2 Carregador pantográfico

O pantógrafo é uma estrutura articulável que possui a capacidade de alcançar o mastro superior da estação de espera dos passageiros. Dessa forma, a recarga começa quando o ônibus chega ao local de recarga e o pantógrafo é estendido para fazer contato com o carregador, conforme mostrado na figura 24. A potência de saída do carregador pode ser variável atingindo valores elevados, o que permitiria um carregamento ultra-rápido do conjunto ultracapacitor e bateria [Ortenzi et al., 2019, Geno, 2015].

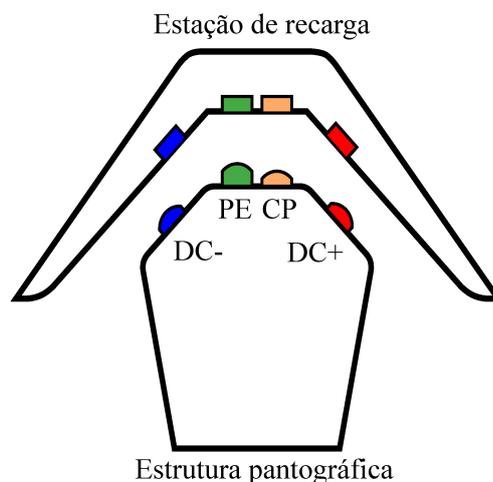
Figura 24 – Principais componentes do carregador pantográfico.



Fonte: Adaptado de Terfloth [2007]

O carregador pantográfico é normatizado internacionalmente pelo padrão SAE-J3105 [SAE, 2020], emitido em janeiro de 2020 pela *Society of Automotive Engineers*, que apresenta as práticas recomendadas e os requisitos físicos, elétricos, funcionais, de teste e de desempenho gerais para sistemas de transferência de energia em corrente contínua para recarga automatizada em ônibus elétricos. O esquema geral da estrutura de conexão SAE-J3150 é mostrado a seguir.

Figura 25 – Representação da estrutura de recarga SAE-J3150.



Fonte: Adaptado de Mliu [2020]

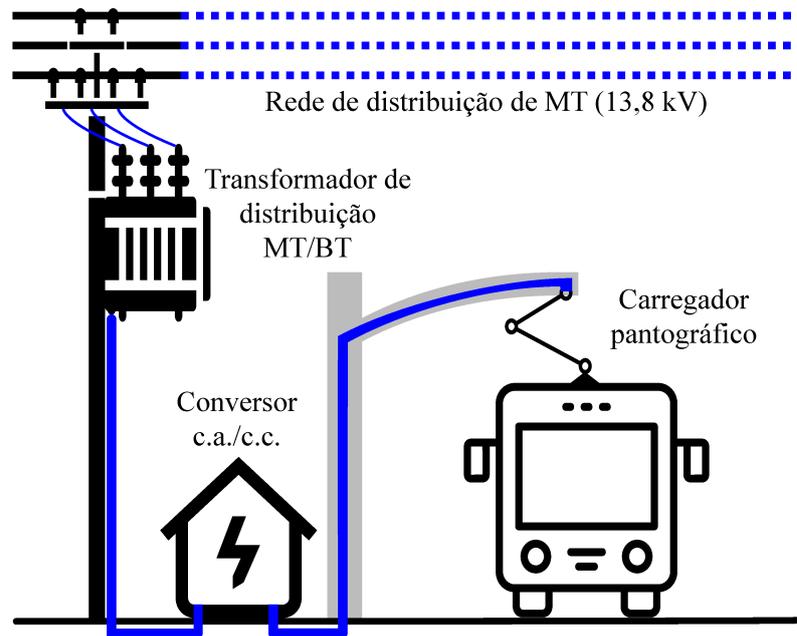
Na figura 25, DC+ e DC- representam respectivamente os polos positivo e negativo de conexão em corrente contínua entre a estrutura pantográfica e a estação de recarga. O sistema de aterramento e proteção de terra é representado pelo conector PE, do inglês (*protection earth*), e o sistema de comunicação e sinalização pós-inserção é denotado pelo conector CP, do inglês (*control pilot*).

4.3.2.3 Conversor c.a./c.c.

Como as estruturas pantográficas de recargas que foram definidas para modelagem estão localizadas nos pontos de paradas de ônibus em áreas urbanas. Elas possuem potência instalada que podem variar de 120 a 480 kW, devendo ser conectadas na rede de média tensão (MT) da concessionária (13,8 kV).

A estrutura básica da estação de recarga ultrarrápida para uso no carregamento dos ônibus elétricos, composta pela estrutura pantográfica, pelo conversor de potência c.a./c.c., pelo transformador de distribuição e sua conexão à rede de distribuição por meio de condutores de média tensão é mostrada na figura 26.

Figura 26 – Diagrama representativo da conexão da estação à rede elétrica.



Fonte: Autoria própria.

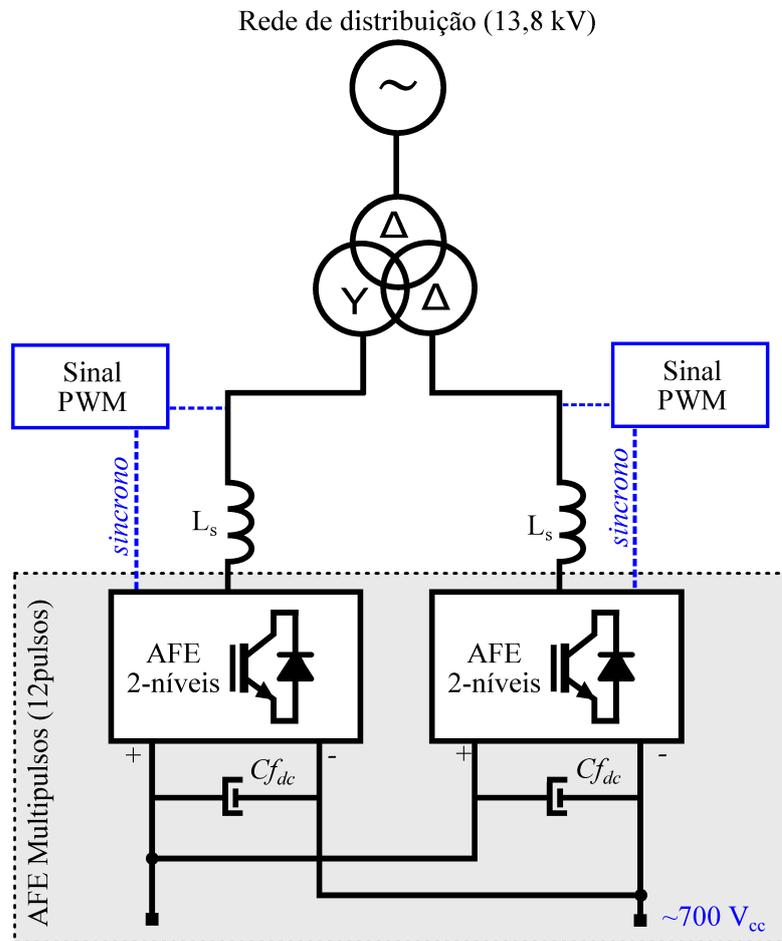
Para realizar esta conexão entre o sistema de corrente alternada da rede de distribuição com o sistema de corrente contínua utilizado no veículo elétrico existem algumas possibilidades de arquitetura para implementação do conversor c.a./c.c. [Bai and Lukic, 2013, Vasiladiotis et al., 2014, Hõimoja et al., 2012]

Na literatura há algumas soluções possíveis para essa conexão [Crosier et al., 2012, Aggeler et al., 2010, Wang et al., 2012, Bai et al., 2010] com pontos positivos e negativos. Como base para modelagem do presente trabalho, será utilizada a arquitetura proposta por Justino et al. [2016], conforme mostrado na figura 27.

Na arquitetura apresentada, um transformador trifásico de três enrolamentos é usado para fornecer o isolamento entre MT e BT além de fornecer dois sub-sistemas de retificadores ativos de baixa tensão. O retificador ativo AFE, do inglês, *active front-end*, é uma solução com baixo nível de distorção harmônica, permitindo controle do fator de potência e nível de tensão, fluxo bidirecional, controle do nível de tensão e redução do tamanho do capacitor C_{fuc} no barramento c.c.

O retificador utilizado na modelagem, denominado ZHD (*Zero Harmonic Distortion*) é considerado uma alternativa adequada para aplicações que envolvem altos níveis de potência, como as estações de recarga ultrarrápidas. As principais vantagens dos conversores ZHD são que eles operam com frequência de chaveamento reduzida e não exigem o uso de filtros sinusoidal, garantindo altos padrões de qualidade de energia e eliminando todas as distorções harmônicas até a 50^o ordem [Justino et al., 2014].

Figura 27 – Conversor c.a./c.c. para conexão com a rede.



Fonte: Adaptado de [Justino et al. \[2016\]](#)

4.4 Modelagem da rede de distribuição

Para a modelagem da rede de distribuição e execução dos cálculos de fluxo de potência para conexão das estações de recarga, foi utilizado o software OpenDSS [[Dugan and McDermott, 2011](#)], que é uma ferramenta abrangente de simulação de redes de distribuição de energia elétrica [[González et al., 2017](#), [Radatz et al., 2016](#)].

O *software* possui a capacidade de modelar diversos elementos, como transformadores, capacitores, geradores fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia e permite simulações de diversos módulos de cálculo como fluxo de potência, curto-circuito e análise de harmônicos [[Wang et al., 2014](#), [Montenegro et al., 2012](#)]. Os detalhes da modelagem no OpenDSS [[Dugan and McDermott, 2011](#)] são apresentados no Apêndice B.

4.4.1 Qualidade de energia

A realização de estudos de conexão são essenciais para determinar se as estações de recarga irão apresentar algum efeito adverso na qualidade de energia da rede. Em vista

disso, o OpenDSS foi utilizado para modelagem do sistema devido a sua capacidade de lidar com o desbalanceamento da rede e com vários modelos topológicos dinâmicos por meio de análise de séries temporais quasi-estáticas (QSTS).

A QSTS é uma forma de análise dinâmica que se baseia na execução de soluções de fluxo de potência consecutivos que levam em conta as variações das recargas dos veículos no tempo, correlacionando com a influência de outros elementos na rede, como sistemas fotovoltaicos, armazenadores de energia e outros.

Nos estudos QSTS realizados foram avaliados dois parâmetros principais, a saber, variações de tensão na rede e perdas na rede de distribuição, conforme detalhado a seguir.

4.4.1.1 Variação de tensão na rede de distribuição

Como os alimentadores de média tensão possuem arquitetura radial, a variação de tensão nas barras do sistema é um bom parâmetro para se ter uma avaliação do impacto das recargas ultrarrápidas na rede de distribuição [Suarez and Martinez, 2019, Mohamed et al., 2017, Zambrano-Perilla et al., 2016].

Para o cálculo da tensão, o OpenDSS relaciona às correntes injetadas em cada terminal dos elementos multifásicos com todas as matrizes Y_{prim} para se obter os valores de $v(t)$ em cada barra, conforme mostrado em

$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t + \theta) \rightarrow \dot{V} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \angle \theta \quad (4.25)$$

A representação do resultado pode ser realizada por meio de um perfil de tensão, ou seja, um gráfico de *Tensão vs Distância*, apresentando o comportamento da tensão em todas as barras do alimentador em um mesmo gráfico. Para referência, serão utilizados os valores de adequação do Módulo 8 do PRODIST [ANEEL, 2011], conforme mostrado na tabela 6

Tabela 6 – Níveis de tensão adequados, precários e críticos.

Faixas de operação	Magnitude de tensão (p.u.)
Adequada	$0,92 < V < 1,05$
Precária máxima	$1,05 < V < 1,06$
Precária mínima	$0,87 < V < 0,92$
Crítica máxima	$V > 1,06$
Crítica mínima	$V < 0,87$

Fonte: ANEEL [2011]

4.4.1.2 Perdas na rede de distribuição

Além das variações de tensão na rede, devido ao comportamento não linear das perdas com relação a carga e a possibilidade de haver elementos complexos como armazenadores de energia e usinas fotovoltaicas nas redes estudadas, é uma tarefa importante calcular corretamente as perdas de energia na rede por meio de fluxo de potência, conforme equação abaixo:

$$L_{add}(n, h) = L_{ev}(n, h) - L_{ini} \quad \forall i : S_i \neq 0 \quad (4.26)$$

Em (4.26), a perda de potência adicionada $L_{add}(n, h)$ devido à conexão das estações de recarga ao nó elétrico (h) é obtida subtraindo-se a perda inicial de energia L_{ini} por $L_{ev}(n, h)$, que representa as perdas quando as estações de carregamento estão conectadas ao barramento (n). No OpenDSS é possível realizar o cálculo de perdas de energia por meio do fluxo de potência temporal *daily*, no qual as soluções obtidas de convergência são utilizadas como estados iniciais para os fluxos subsequentes, reduzindo significativamente o tempo de convergência do algoritmo.

Na modelagem da rede são instalados elementos denominados *energy meters* que são capazes de registrar o fluxo de corrente em determinados trechos, sendo possível compará-los com medições reais, de forma a possibilitar a modelagem e a computação do nível de perdas no alimentador.

4.5 Conclusões

A abordagem elaborada para possibilitar a análise da operação dos sistemas de mobilidade elétrica realiza a avaliação do funcionamento do veículo elétrico, no que se refere a dinâmica de carga e descarga tanto da bateria principal como do elemento híbrido, além de permitir a análise da interação com a rede de distribuição de energia.

Analisando-se criticamente a metodologia desenvolvida neste estágio de modelagem dinâmica e a incorporando no processo de tomada de decisão como um todo, fica claro a importância desta etapa de análise operativa para contribuir na obtenção da solução final de longo prazo, que deve embarcar o mínimo possível de baterias no veículo analisado. É notável que reduzindo-se o volume de baterias no veículo, o valor presente líquido do projeto tende a reduzir significativamente.

Apenas por meio deste segundo estágio de otimização de curto prazo, com foco na modelagem dinâmica do sistema de armazenagem do veículo elétrico com a rede de distribuição, é possível realizar a especificação dos armazenadores de energia do ônibus e a localização das estações de recarga de forma a garantir o menor custo global para o sistema de mobilidade elétrica.

Além disso, como trata-se de um problema de tomada de decisão multiobjetivo, no qual é considerado tanto a integração como a operação do sistema, os conceitos e metodologias desenvolvidos neste capítulo possibilitam a aquisição das funções objetivo $F_6(X)$ até $F_{10}(X)$ de (3.1). Lembrando que as funções objetivo $F_1(X)$ até $F_5(X)$ já haviam sido discutidas no Capítulo 3.

Tendo em vista que o objetivo geral da abordagem é a realização da consideração da incerteza no processo de integração e operação do sistema de mobilidade elétrica, no capítulo a seguir serão apresentados as técnicas de consideração da incerteza do dados iniciais do problema por meio da construção e análise de matrizes *payoff*.

Capítulo 5

Consideração da incerteza dos dados iniciais

“There is no such uncertainty as a sure thing.”

Robert Burns

No problema de integração e operação de um sistema de mobilidade elétrica, a incerteza dos dados iniciais estão associadas à dificuldade de se definir ou obter informações confiáveis no processo de formulação dos modelos computacionais, que devem ser levadas em consideração na construção da abordagem de tomada de decisões discutidos nos capítulos 3 e 4.

Baseando-se em Pedrycz et al. [2011] e Pereira [2014], nesse capítulo serão explorados os conceitos relacionados à consideração desse tipo de incerteza por meio da construção e análise de matrizes *payoff*, construídas para as diferentes alternativas de solução do problema e cenários a serem estudados.

5.1 Considerações Iniciais

Considerando que em um problema real as incertezas tendem a ser mais complexas, a definição de medidas de probabilidade, bem como as funções de pertinência *fuzzy* que as podem modelar, tendem a se tornar inviáveis. Dessa forma, nesse tipo de problema, a construção de cenários, que seriam combinações dos dados iniciais, pode ser bastante útil, sendo cada cenário uma interpretação possível da realidade.

Para representar essas diferentes interpretações da realidade pelos cenários é necessário realizar a construção e análise multicritério de matrizes *payoff*, por meio da revisão dos conceitos da abordagem clássica para consideração da incerteza dos dados iniciais [Luce and Raiffa, 1957, Raiffa, 1968, Belyaev, 1977].

Em [Ekel et al., 2007, 2008, Pedrycz et al., 2011] é apresentado uma generalização da abordagem clássica para o tratamento de incerteza das informações iniciais para a consideração de múltiplos critérios, baseando-se nos resultados dos trabalhos [Ekel, 2001, 2002]. Nas próximas seções serão tratados os principais pontos relacionados a construção dos cenários utilizando esta abordagem. Será explorado a definição das alternativas de solução, a construção e análise das matrizes *payoff* e finalmente a escolha de soluções racionais para resolver o problema de integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica.

5.2 Construção dos Cenários

A avaliação das possíveis soluções em cada cenário seguida da escolha da alternativa mais robusta é o caminho para se resolver um problema de tomada de decisão complexo como é a integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica. Porém, para que seja obtida uma solução racional, é necessário fazer uma escolha que possua a melhor performance geral levando em conta todos os cenários ao mesmo tempo [Ekel et al., 2008, Miranda and Proença, 1997].

Para que um cenário seja considerado uma representação da realidade, é necessário que este seja factível. Dessa forma, dentre as inúmeras combinações possíveis dos dados iniciais, devem ser consideradas aquelas que tragam consigo respostas aceitáveis. Diversos pontos relacionados a construção de cenários são tratado na literatura, podendo-se destacar [Belyaev, 1977, Figueira et al., 2005, Goodwin and Wright, 1991]. O presente capítulo não tem como foco desenvolver em detalhes as metodologias de construção de cenários, dessa forma serão consideradas as sequências de $LP\tau$ [Sobol', 1979], originalmente abordadas em [Pedrycz et al., 2011].

5.3 Definição das Alternativas de Solução

A primeira etapa para a construção da matriz *payoff* está relacionado à construção do conjunto de alternativas de solução, levando em conta um número definido S de cenários $Y_s, s = 1, \dots, S$, sendo cada um deles avaliado individualmente.

A seguir é apresentado o problema de otimização a ser resolvido:

$$f_p(X, Y_s) \rightarrow \underset{X \in L}{\text{extr}}, \quad p = 1, 2, \dots, q \quad s = 1, \dots, S. \quad (5.1)$$

Dessa forma, é possível definir S soluções localmente ótimas correspondentes à alternativa de solução escolhida em cada um dos S problemas multiobjetivo levando em conta um total de S cenários. Além disso, um conjunto de K soluções diferentes é escolhida para a construção das matrizes *payoff* do conjunto de S soluções.

5.4 Construção da Matriz *Payoff*

Uma matriz *payoff* pode ser construída a partir de K alternativas de soluções $X_k, k = 1, \dots, K$ e S cenários, conforme mostrado na tabela 7. Entretanto, é necessário que todas as K soluções sejam calculadas nos S cenários, isto é, deve ser resolvido $f(X_k, Y_s)$ para todo $X_k, k = 1, \dots, K$ e $Y_s, s = 1, \dots, S$. Dessa forma, as implicações de uma ou outra ação $X_k, k = 1, \dots, K$, nos cenários correspondentes $Y_s, s = 1, \dots, S$ serão refletidos pela matriz *payoff*.

Tabela 7 – Matriz *payoff*.

	Y_1	...	Y_S	...	Y_s
X_1	$f(X_1, Y_1)$	...	$f(X_1, Y_s)$	...	$f(X_1, Y_S)$
...
X_k	$f(X_k, Y_1)$	...	$f(X_k, Y_s)$	...	$f(X_k, Y_S)$
...
X_K	$f(X_K, Y_1)$	...	$f(X_K, Y_s)$	...	$f(X_K, Y_S)$

Fonte: Adaptado de [Pedrycz et al. \[2011\]](#)

5.5 Matrizes *Payoff* e Seleção das Soluções Racionais

Para se realizar a seleção das alternativas de solução é necessário o uso de critérios de escolha específicos, conforme mostrado em [Luce and Raiffa \[1957\]](#), [Raiffa \[1968\]](#), [Belyaev \[1977\]](#). No presente trabalho serão utilizados os critérios de Wald, de Laplace, de Savage e de Hurwicz, que são apresentados a seguir, considerando-se que a função objetivo seja minimizada.

- Critério de Wald:

Possibilita a escolha da alternativa de solução X^W para a qual esta estimativa é mínima, por meio do uso da estimativa $f^{max}(X_k)$:

$$\min_{1 \leq k \leq K} f^{max}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \max_{1 \leq s \leq S} f(X_k, Y_s) \quad (5.2)$$

- Critério de Laplace:

Possibilita a escolha da alternativa de solução X^L que minimiza essa estimativa, por meio do uso da estimativa $\bar{f}(X_k)$:

$$\min_{1 \leq k \leq K} \bar{f}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S f(X_k, Y_s) \quad (5.3)$$

- Critério de Savage:

Possibilita a escolha da alternativa de solução X^S que minimiza essa estimativa, por meio do uso da estimativa $r^{max}(X_k)$:

$$\min_{1 \leq k \leq K} r^{max}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \max_{1 \leq s \leq S} r(X_k, Y_s) \quad (5.4)$$

- Critério de Hurwicz:

Possibilita a escolha da alternativa de solução X^H , por meio da combinação linear das estimativas $f^{min}(X_k)$ e $f^{max}(X_k)$

$$\begin{aligned} & \min_{1 \leq k \leq K} [\sigma f^{min}(X_k) + (1 - \sigma) f^{max}(X_k)] = \\ & = \min_{1 \leq k \leq K} [\sigma \min_{1 \leq s \leq S} f(X_k, Y_s) + (1 - \sigma) \max_{1 \leq s \leq S} f(X_k, Y_s)] \end{aligned} \quad (5.5)$$

onde $\sigma \in [0, 1]$ é um índice de “pessimismo-otimismo” definido pelo tomador de decisão.

Conforme citado, os critérios de escolha de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz são baseados na utilização das estimativas características $f^{max}(X_k)$, $f^{min}(X_k)$, $\bar{f}(X_k)$ e $r^{max}(X_k)$. Essas estimativas são apresentados a seguir e organizadas na tabela 8:

- Nível máximo da função objetivo:

$$f^{max}(X_k) = \max_{1 \leq s \leq S} f(X_k, Y_s) \quad (5.6)$$

representando nível máximo de otimismo caso a função objetivo deva ser maximizada ou nível máximo pessimismo caso a função objetivo deva ser minimizada para a alternativa de solução k ;

- Nível mínimo da função objetivo:

$$f^{min}(X_k) = \min_{1 \leq s \leq S} f(X_k, Y_s) \quad (5.7)$$

que, de forma oposta, representa nível máximo de otimismo caso a função objetivo deva ser minimizada ou nível máximo de pessimismo caso a função objetivo deva ser maximizada para a alternativa de solução k ;

- Nível médio da função objetivo:

$$\bar{f}(X_k) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S f(X_k, Y_s) \quad (5.8)$$

para a alternativa de solução k ;

- Nível máximo de risco:

$$r^{max}(X_k) = \max_{1 \leq s \leq S} r(X_k, Y_s) \quad (5.9)$$

que expressa o custo do risco da diferença dos valores da função objetivo escolhida X_k em relação a escolha da alternativa de solução que seria localmente ótima para o estado de natureza Y_s .

Tabela 8 – Matriz *payoff* com estimativas características

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$f^{max}(X_k)$	$f^{min}(X_k)$	$\bar{f}(X_k)$	$r^{max}(X_k)$
X_1	$f(X_1, Y_1)$	...	$f(X_1, Y_s)$	...	$f(X_1, Y_S)$	$f^{max}(X_1)$	$f^{min}(X_1)$	$\bar{f}(X_1)$	$r^{max}(X_1)$
...
X_k	$f(X_k, Y_1)$	...	$f(X_k, Y_s)$	...	$f(X_k, Y_S)$	$f^{max}(X_k)$	$f^{min}(X_k)$	$\bar{f}(X_k)$	$r^{max}(X_k)$
...
X_K	$f(X_K, Y_1)$	...	$f(X_K, Y_s)$	...	$f(X_K, Y_S)$	$f^{max}(X_K)$	$f^{min}(X_K)$	$\bar{f}(X_K)$	$r^{max}(X_K)$
$f^{min}(Y_s)$	$f^{min}(Y_1)$	...	$f^{min}(Y_s)$	...	$f^{min}(Y_S)$				

Fonte: Adaptado de [Pedrycz et al. \[2011\]](#)

No caso de maximização da função objetivo, para se avaliar os riscos $r(X_k, Y_s)$, deve-se calcular o valor máximo da função objetivo para toda combinação do cenário Y_s , conforme mostrado na tabela 8.

$$f^{max}(Y_s) = \max_{1 \leq k \leq K} f(X_k, Y_s) \quad (5.10)$$

E no caso de minimização da função objetivo, deve-se calcular o valor mínimo da função objetivo para todo cenário Y_s :

$$f^{min}(Y_s) = \min_{1 \leq k \leq K} f(X_k, Y_s) \quad (5.11)$$

Com relação ao nível de risco, caso a função objetivo deva ser maximizada pode-se defini-la como

$$r(X_k, Y_s) = f^{max}(Y_s) - f(X_k, Y_s) \quad (5.12)$$

e caso a função objetivo deva ser minimizada, calcula-se

$$r(X_k, Y_s) = f(X_k, Y_s) - f^{min}(Y_s) \quad (5.13)$$

para toda alternativa de solução X_k em qualquer cenário Y_s . Realizando-se os cálculos das equações 5.12 ou 5.13, para todo $X_k, k = 1, \dots, K$ e $Y_s, s = 1, \dots, S$ é possível construir a matriz de riscos apresentada a seguir na tabela 9:

Tabela 9 – Matriz de riscos.

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$r^{max}(X_k)$
X_1	$r(X_1, Y_1)$	...	$r(X_1, Y_s)$	...	$r(X_1, Y_S)$	$r^{max}(X_1)$
...
X_k	$r(X_k, Y_1)$	...	$r(X_k, Y_s)$	...	$r(X_k, Y_S)$	$r^{max}(X_k)$
...
X_K	$r(X_K, Y_1)$	...	$r(X_K, Y_s)$	...	$r(X_K, Y_S)$	$r^{max}(X_K)$

Fonte: Adaptado de [Pedrycz et al. \[2011\]](#)

5.6 Análise das Regiões de Incerteza em Problemas Multiobjetivo

Considerando-se S problemas de tomada de decisões multiobjetivo, é adequado que S problemas de otimização multiobjetivo sejam resolvidos para a construção das matrizes *payoff*. Dessa forma, tendo-se q funções objetivo levarão a q matrizes *payoff* a serem analisadas.

Neste sentido, constrói-se a matriz *payoff* modificada (normalizada) mostrada na tabela 10 para o p -ésimo critério, aplicando-se a equação (3.6) para normalização e construção das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos.

Tabela 10 – Matriz *payoff* modificada para o p -ésimo critério.

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S
X_1	$\mu_{A_p}(X_1, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(X_1, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(X_1, Y_S)$
...
X_k	$\mu_{A_p}(X_k, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(X_k, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(X_k, Y_S)$
...
X_K	$\mu_{A_p}(X_K, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(X_K, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(X_K, Y_S)$

Fonte: Adaptado de [Pedrycz et al. \[2011\]](#)

Na sequência, aplicando-se os operadores T -norma ¹ [[Pedrycz et al., 2011](#)] são construídas as novas estimativas característica $\mu_D^{max}(X_k)$, $\mu_D^{min}(X_k)$, $\bar{\mu}_D(X_k)$ e $r(X_k, Y_s)$, que servem como base para os critérios que devem ser usados na generalização da abordagem clássica para a tomada de decisões multicritério e são apresentadas a seguir:

- Nível máximo da função de pertinência

$$\mu_D^{max}(X_k) = \max_{1 \leq s \leq S} \mu_D(X_k, Y_s) \tag{5.14}$$

que é uma estimativa característica que expressa o nível máximo de otimismo para a referida alternativa de solução;

- Nível mínimo da função de pertinência

$$\mu_D^{min}(X_k) = \min_{1 \leq s \leq S} \mu_D(X_k, Y_s) \tag{5.15}$$

que é uma estimativa característica que expressa o nível máximo de pessimismo para a referida alternativa de solução;

- Nível médio da função de pertinência

$$\bar{\mu}_D(X_k) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \mu_D(X_k, Y_s) \tag{5.16}$$

para a referida alternativa de solução;

- Nível máximo de risco

$$r(X_k, Y_s) = \max_{1 \leq k \leq K} \mu_D(X_k, Y_s) - \mu_D(X_k, Y_s) \tag{5.17}$$

¹ Nos conjuntos nebulosos, esses operadores seriam o correspondente as operações de união, interseção e complemento dos conjuntos clássicos.

Finalmente, é possível construir uma matriz *payoff* agregada, utilizando as q matrizes *payoff* modificadas previamente construídas em conjunto com as novas estimativas características. Essa matriz *payoff* agregada é mostrada na tabela 11. Nos casos em que não seja possível distinguir a qualidade das soluções obtidas, aconselha-se adicionar novos critérios de caráter qualitativo para escolha da solução final [Ekel et al., 1998, Pedrycz et al., 2011].

Tabela 11 – Matriz *payoff* agregada com estimativas características

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$\mu_D^{max}(X_k)$	$\mu_D^{min}(X_k)$	$\bar{\mu}_D(X_k)$	$r^{max}(X_k)$
X_1	$\mu_D(X_1, Y_1)$	...	$\mu_D(X_1, Y_s)$	...		$\mu_D^{max}(X_1)$	$\mu_D^{min}(X_1)$	$\bar{\mu}_D(X_1)$	$r^{max}(X_1)$
...
X_k	$\mu_D(X_k, Y_1)$	...	$\mu_D(X_k, Y_s)$	...	$\mu_D(X_k, Y_S)$	$\mu_D^{max}(X_k)$	$\mu_D^{min}(X_k)$	$\bar{\mu}_D(X_k)$	$r^{max}(X_k)$
...
X_K	$\mu_D(X_K, Y_1)$	...	$\mu_D(X_K, Y_s)$	...	$\mu_D(X_K, Y_S)$	$\mu_D^{max}(X_K)$	$\mu_D^{min}(X_K)$	$\bar{\mu}_D(X_K)$	$r^{max}(X_K)$
$\mu_D^{max}(Y_s)$	$\mu_D^{max}(Y_1)$	...	$\mu_D^{max}(Y_s)$	...	$\mu_D^{max}(Y_S)$				

Fonte: Adaptado de Pedrycz et al. [2011]

Dessa forma, é possível adaptar os critérios de escolha de alternativas de solução aos problemas multiobjetivo como mostrado na sequência.

- Critério de Wald adaptado:

$$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D(X_k) = \max_{1 \leq k \leq K} \min_{1 \leq s \leq S} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_D(X_k, Y_s) \quad (5.18)$$

- Critério de Laplace adaptado:

$$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D(X_k) = \max_{1 \leq k \leq K} \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A,p}(X_k, Y_s) \quad (5.19)$$

- Critério de Savage adaptado:

$$\min_{1 \leq k \leq K} r^{max}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \max_{1 \leq s \leq S} [\max_{1 \leq k \leq K} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A,p}(X_k, Y_s) - \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A,p}(X_k, Y_s)] \quad (5.20)$$

- Critério de Hurwicz adaptado:

$$\begin{aligned} & \max_{1 \leq k \leq K} [\sigma \min_{1 \leq k \leq K} \mu_D(X_k) + (1 - \sigma) \max_{1 \leq k \leq K} \mu_D(X_k)] = \\ & = \max_{1 \leq k \leq K} [\sigma \min_{1 \leq k \leq K} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_D(X_k, Y_s) + (1 - \sigma) \max_{1 \leq k \leq K} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_D(X_k, Y_s)] \end{aligned} \quad (5.21)$$

5.7 Conclusões

Baseando-se nos trabalhos de Ekel et al. [2007, 2008], Pedrycz et al. [2011], no presente capítulo foi explorada a generalização para a solução de problemas multicritério da abordagem clássica para a tomada de decisão em ambiente de incerteza.

Tal abordagem, tem como fundamento básico a construção das matrizes *payoff* e o uso dos critérios de escolha adaptados para a análise de problemas em condições de incerteza e definição da melhor alternativa de solução. A metodologia permite, por meio de uma abordagem possibilística associada com construção de cenários, gerar soluções multiobjetivo robustas.

Nos próximos capítulos serão apresentados exemplos de aplicação desta abordagem no contexto de integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica. A natureza desse problema é multiobjetivo e com alto nível de incertezas, logo levando isso em conta, é necessário salientar que uma das mais importantes questões será a garantia de qualidade das soluções obtidas.

Analisando-se criticamente a abordagem apresentada neste capítulo, é possível afirmar que nela, a concepção de solução ótima do problema multiobjetivo é definida com razoável validade. Isto é, o máximo grau de implementação de todos os objetivos é utilizado como um critério de otimalidade, que concorda com o princípio da garantia do resultado e produz uma linha para obter soluções harmoniosas. Além disso, a abordagem apresentada neste capítulo permite a criação de um método computacionalmente eficiente e rigoroso do ponto de vista da obtenção de soluções que pertencem ao conjunto de Pareto.

Dessa forma, nos capítulos a seguir, esta abordagem será validada por meio de dois estudos de caso que avaliam a integração e operação de um sistema de mobilidade elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais e no BH-Tec, considerando todas as modelagens desenvolvidas até então, bem como a análise detalhada da interação com a rede de distribuição que atende o sistema.

Capítulo 6

Estudo de caso I: Sistema de mobilidade elétrica da UFMG

“One of the major obstacles impeding any positive future change in our lives is that we are too busy with our current work or activity.”

Liev Tolstói

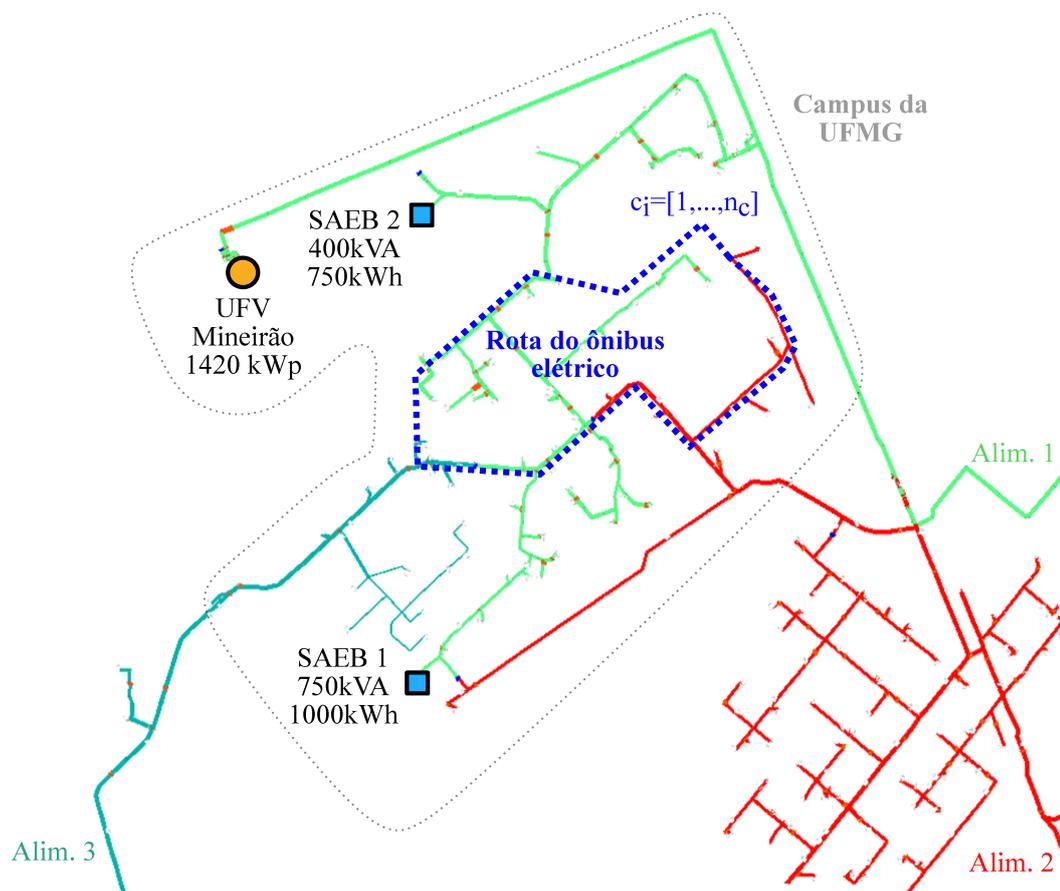
Nesse capítulo é realizada a aplicação da abordagem que foi desenvolvida nos capítulos 3 e 4 para a integração e operação de um sistema de mobilidade elétrica na rede de distribuição responsável pelo fornecimento de energia à Universidade Federal de Minas Gerais.

6.1 Apresentação do sistema

A abordagem desenvolvida foi aplicada na integração e operação de um sistema de mobilidade no campus da Universidade Federal de Minas Gerais. A rota consiste num circuito de 3,4 km que percorre diversos pontos do campus universitário, retornando ao ponto de partida após uma volta completa. Este circuito passa por três diferentes alimentadores de energia de média tensão (13,8 kV), nos qual está instalado uma usina fotovoltaica (UFV) de 1420kW. Existem projetos em andamento que preveem a instalação de dois sistemas de armazenamento de energia (SAEB 1 -750kVA/1000kWh e SAEB 2 -

400kVA/750kWh) neste alimentador, que também foram contemplados na presente análise, conforme mostrado na figura 28.

Figura 28 – Trajeto do ônibus elétrico no campus da UFMG.



Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que a análise da alternativa de ônibus elétricos com baterias ocorreu devido à possibilidade de integração dos veículos elétricos com os demais recursos energéticos distribuídos já existentes na rede, auxiliando na melhoria da qualidade de energia dos alimentadores estudados. Além disso, os sistemas de mobilidade elétrica proporcionam emissão local zero de poluentes, o que traz benefícios relacionados a maior aderência da universidade a políticas de sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

A tabela 12 apresenta os dados elétricos da rede de distribuição¹ utilizados na modelagem do sistema.

¹ Valores de referência do alimentador Alim.1

Tabela 12 – Dados elétricos da rede de distribuição.

Parâmetro	Valor
Potência máxima	5,56 MVA
Corrente nominal máxima	232 A
Tensão nominal	13,8 kV
Potência de curto circuito	61,13 MVA
Clientes de baixa tensão	39
Clientes de média tensão	41
Potência instalada UFV	1420 kWp
Potência/ energia SAEB 1	750 kVA/ 1000 kWh
Potência/ energia SAEB 2	400 kVA/ 750 kWh
Queda de tensão admissível	+/- 0.05 p.u.
Nível de perdas admissível	10 %

Fonte: Autoria própria.

No processo de integração do sistema de mobilidade elétrica pode ser que o ponto definido para a conexão da estação de recarga esteja distante da rede de distribuição de média tensão. Nesses casos a abordagem desenvolvida é capaz de encontrar o ponto de rede mais próximo e calcular a distância de extensão de condutores necessárias para realizar a conexão.

A tabela 13 mostra os condutores disponíveis para as redes de distribuição de média tensão, bem como sua corrente nominal, impedância e custo por quilômetro [NRECA \[2010\]](#).

Tabela 13 – Custos para extensão de rede de distribuição.

Condutor	1/0 ACSR	4/0 ACSR	336.4 MCM
I (A)	240	386	456
R_1 (ohms/km)	0.247	0.211	0.104
X_1 (ohms/km)	0.435	0.176	0.206
Custo (US\$/km)	\$ 10,766	\$ 15,073	\$24,314

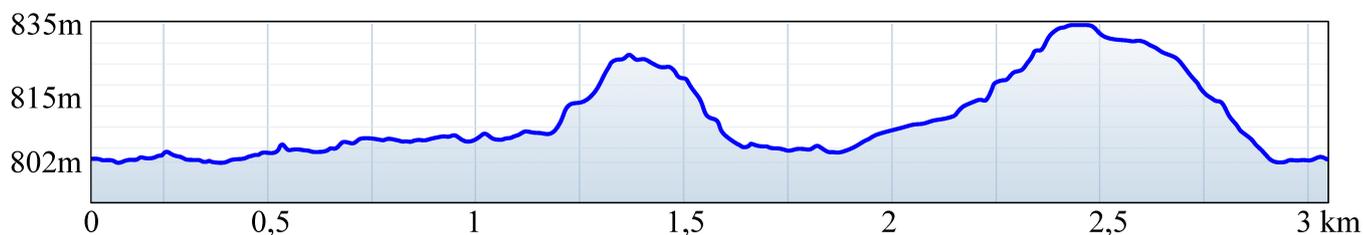
Fonte: [NRECA \[2010\]](#)

Atualmente, a rota estudada é atendida por ônibus a diesel, portanto, avalia-se a viabilidade técnica e econômica da substituição deste ônibus urbano por um modelo elétrico equivalente. Esta avaliação técnico-econômica pretende explicitar os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão de gestores e operadores sobre a mudança dessas diferentes tecnologias.

Uma característica importante do trajeto a ser percorrido pelo ônibus é a grande variação altimétrica ao longo da rota, conforme mostrado na figura 29. Tal fator impõem

um grande desafio relacionado a capacidade do sistema de armazenagem e gerenciamento energético do veículo.

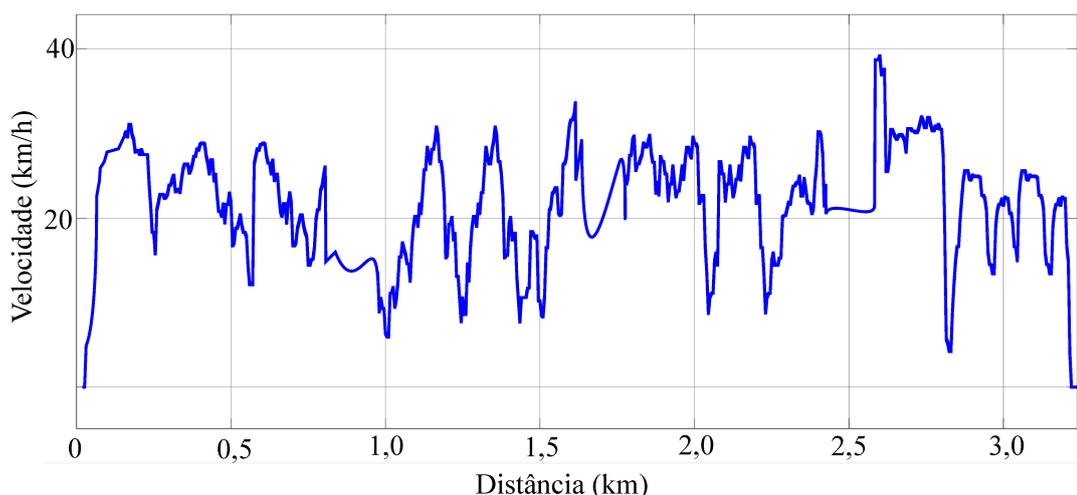
Figura 29 – Elevação do terreno.



Fonte: Autoria própria.

Como referência para modelar o estudo de caso, foi adotado o veículo elétrico apresentado por [Justino et al. \[2014\]](#), que se baseia na utilização de ônibus elétricos equipados com sistema de armazenamento de energia composto por baterias e ultracapacitores capazes de realizar cargas ultrarrápidas por meio de uma infraestrutura pantográfica localizada nos pontos de parada. As estações de carregamento têm potência instalada entre 200 e 400 kW e são capazes de carregar veículos regularmente durante a chegada e saída de passageiros, com um tempo estimado entre 10 e 30 segundos. Este fator impõe um grande desafio relacionado à capacidade do sistema de gerenciamento e armazenamento de energia do veículo. Conseqüentemente, a potência exigida pelo ônibus precisa ser calculada com base em seu ciclo de condução, conforme mostrado na figura 30.

Figura 30 – Velocidade do veículo.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, para possibilitar o gerenciamento energético do veículo, foi realizado o cálculo da potência requerida pelo ônibus ao longo do tempo. O ônibus utilizado como referência foi o Iveco Daily Electric, mostrado na figura 31, que é um veículo de propulsão

elétrica movido a bateria, possuindo um motor elétrico de 80 kW com torque de 300 Nm disponíveis à baixas rotações, com capacidade para 14 passageiros e autonomia que pode chegar até 280 km [Iveco, 2021].

Figura 31 – Ônibus Iveco Daily Electric.



Fonte: Iveco [2021]

Para a aplicação da abordagem proposta, é estudada a adaptação do veículo por meio da inclusão de um elemento híbrido de armazenagem: o ultracapacitor. Nesse caso, também serão avaliadas as adaptações necessárias na estrutura do veículo de forma a possibilitar a estrutura pantográfica para recargas ultrarrápidas.

Vale ressaltar que a maximização da autonomia do veículo é um dos parâmetros considerados na abordagem de tomada de decisão multiobjetivo realizada. Dessa forma, a associação dos bancos de ultracapacitores terá como objetivo permitir as recargas ultrarrápidas mas também preservar o SOC da bateria, elevando assim a autonomia do veículo. Os parâmetros do ônibus elétrico e do trajeto utilizados para a modelagem dinâmica do sistema de mobilidade são mostrados na tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros dinâmicos do ônibus elétrico.

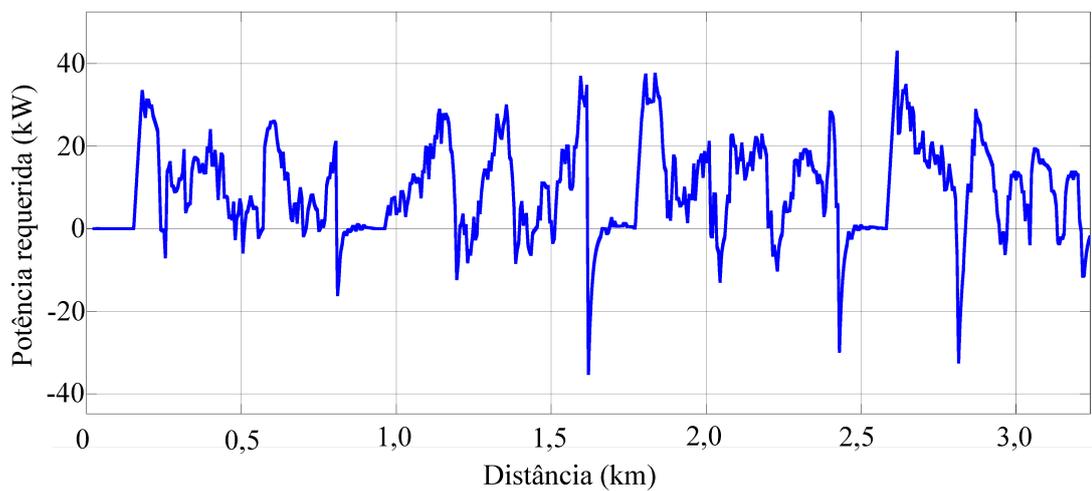
Parâmetro	Valor
Coefficiente de atrito do solo	0.02
Coefficiente de arraste	0.6
Força gravitacional	9.81 m/s ²
Densidade do ar	1.225 kg/m ³
Área frontal do veículo	3.78 m ²
Peso do veículo	5600 kg

Fonte: Autoria própria.

Por meio da modelagem dinâmica apresentada no Capítulo 4, o cálculo de potência requerida para este veículo é realizado e os resultados são mostrados na figura 32. Foi utilizado o bloco *Longitudinal Driver* do *Simulink* para emular um condutor com rastreamento de velocidade. A parametrização utilizada foi o ganho proporcional $K_p = 15$ e o ganho integral K_i do controlador igual a 1, que são os valores recomendados pelo modelo de simulação utilizado para esse tipo de aplicação [MATLAB, 2018].

É possível observar que a potência requerida pelo veículo varia bastante ao longo do trajeto, o que é uma consequência natural da alta intermitência de velocidade em uma área urbana. Esse fato é um grande desafio para o gerenciador energético do veículo e será uma boa oportunidade para validar o sistema especialista *fuzzy* desenvolvido.

Figura 32 – Potência requerida pelo veículo.



Fonte: Autoria própria.

6.2 Definição dos cenários

Na sequência, a resolução do problema passa então por todo o fluxograma definido na figura 5, de forma a colher os parâmetros necessários para realizar a tomada de decisão multiobjetivo em ambiente *fuzzy* do estudo.

O processo de tomada de decisão multiobjetivo realiza o cálculo da autonomia do veículo, da variação de perdas e tensão no sistema elétrico, do consumo energético da rede e o número de ultracapacitores necessários para determinada alternativa.

Fundamentado nos resultados calculados previamente nesta fase, são mensurados alguns indicadores financeiros para emular uma transição tecnológica de ônibus a diesel para elétrico, de forma a possibilitar uma avaliação da viabilidade do sistema de mobilidade a ser implantado. Os indicadores utilizados foram o custo inicial do projeto, a taxa interna de retorno (TIR), o valor presente líquido (VPL), o custo total de propriedade e tempo de retorno do investimento (*payback*).

Como discutido no Capítulo 3, no processo de tomada de decisão multiobjetivo, cada um desses parâmetros devem ser transformados em uma função objetivo de forma a possibilitar a resolução do problema.

Dessa forma, para considerar todas as variações possíveis para a implantação e operação do sistema, cinco diferentes cenários de política de mobilidade são apresentados, variando-se a importância λ das funções objetivo. A viabilidade econômico-financeira do sistema de mobilidade elétrica possui relação direta com um conjunto de aspectos de incerteza com relação ao futuro da tecnologia. Esta seção descreve cinco cenários que servirão como base para a análise do estudo de caso, conforme mostrado na tabela 15.

Tabela 15 – Cenários e políticas de mobilidade elétrica.

Cenário	I	II	III	IV	V
λ_1 - Custo ini.	0.2	0.1	0.1	0.05	0.1
λ_2 - VPL	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1
λ_3 - CTP	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
λ_4 - TIR	0.05	0.1	0.2	0.2	0.1
λ_5 - <i>Payback</i>	0.05	0.05	0.2	0.1	0.1
λ_6 - Autonomia	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
λ_9 - Perdas	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1
λ_{10} - Tensão	0.1	0.2	0.05	0.05	0.1
λ_7 - Ucaps	0.1	0.05	0.05	0.05	0.1
λ_8 - Consumo	0.1	0.05	0.05	0.05	0.1

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os parâmetros dos cenários mostrados na tabela 15, pode-se afirmar que:

- O Cenário I retrata a implantação de um projeto de pesquisa, no qual os custos iniciais presentes são bastante relevantes devido ao orçamento pré-definido do projeto. As variáveis financeiras de longo prazo possuem importância reduzida.
- O Cenário II pode corresponder ao problema quando a concessionária de energia elétrica é responsável pela implantação e operação de todo o sistema, participando do desenvolvimento das estações de recarga e aproveitando as suas vantagens de fornecimento e consumo de energia.
- O Cenário III mostra o caso em que o setor privado deseja investir no desenvolvimento de estações de carregamento visando o lucro e o retorno rápido do investimento.
- O Cenário IV considera subsídios governamentais para o financiamento da tecnologia, bem como incentivos de tarifas para viabilizar o consumo de energia elétrica pelo sistema de mobilidade elétrica.

- O Cenário V corresponde a solução de forma isonômica, no qual todos os pesos são distribuídos de forma igual para as funções objetivo.

6.3 Parametrização do estudo

A definição dos parâmetros financeiros a serem adotados em cada um dos cenários estudados é de essencial importância devido a sua capacidade de influenciar no resultado final dos indicadores financeiros de atratividade da transição tecnológica proposta.

O presente estudo utilizou como referência os custos apresentados em “*Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses*”, desenvolvido pelo laboratório americano de energia renovável - NREL [2020] para balizar o levantamento de valores para o mercado brasileiro. Os principais parâmetros financeiros que foram considerados para se avaliar a transição de ônibus a diesel para elétricos são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros financeiros para ônibus elétrico e diesel.

Parâmetro	Elétrico	Diesel
Custo de aquisição	R\$ 830.147	R\$ 196.000
Custo de adaptação	R\$ 148.862	–
Infraestrutura de recarga	R\$ 202.811	–
Custos de manutenção	R\$ 0,29/km	R\$ 1,41/km
Custo de energia	R\$ 0,35/kWh	R\$ 4,18/l
Rendimento	0,93	0,58
Custo de capital próprio	20%	50%
Taxa de financiamento	1%	12,5%
Percentual financiado	80%	50%
Valor de revenda	40%	40%
Período de financiamento	5 anos	5 anos

Fonte: [NREL, 2020]

No caso do custo de aquisição do ônibus elétrico, foi necessário a consideração de frete terrestre e frete marítimo, bem como taxas de importação tendo em vista que o veículo não é produzido atualmente no Brasil. Adicionalmente ao custo de aquisição do ônibus elétrico, deve-se considerar também os custos relativos à adaptação para receber a estrutura de recarga pantográfica. Para o custo de aquisição do ônibus à diesel, foi considerado o preço do veículo do mesmo fabricante com características semelhantes [DailyDiesel, 2021].

Para a infraestrutura de recarga, que somente é necessária no ônibus elétrico, os custos adotados foram baseados em valores de instalação de carregadores ultrarrápidos de fabricantes atualmente com experiências no mercado com este tipo de aplicação [Sanxing, 2021].

Os valores apresentados tanto para aquisição do ônibus elétrico quanto para sua adaptação e infraestrutura de recarga estão em reais, apesar de grande parte destes custos serem derivados de valores originalmente em dólar, posteriormente convertidos na moeda nacional. Para realizar a conversão foram utilizadas cotações do primeiro semestre de 2021².

Os custos de manutenção e seu rendimento são os grandes pontos em que o ônibus elétrico apresenta vantagens competitivas com relação ao ônibus à diesel. No presente estudo foram considerados os valores apresentados por NREL [2020] como referência.

No caso do ônibus elétrico, o custo de energia também deve ser considerado tendo em vista ser o insumo básico para funcionamento do sistema. No presente estudo foi considerado as tarifas de um cliente do grupo A4, para fornecimento entre 2,3 kV a 25 KV com uma tarifa de demanda em R\$/kW e uma tarifa de energia em R\$/kWh [Cemig, 2021]

Com relação ao financiamento, o ônibus elétrico possui outra vantagem com relação ao ônibus à diesel devido as melhores taxas do BNDES, que estabeleceu um programa de incentivo que permite o financiamento de até 80% do valor de veículos elétricos ao longo de 5 anos com taxas de apenas 1% a.a [BNDES, 2021].

6.4 Resultados obtidos

Os cinco cenários foram submetidos à técnica de tomada de decisão e ao sistema especialista *fuzzy* desenvolvidos nos Capítulos 3 e 4 e a tabela 17 mostra o número de estações, a quantidade necessária de ultracapacitores, a autonomia do veículo, a variação de tensão e taxa interna de retorno do investimento para a alternativa vencedora em cada um dos cenários estudados.

Tabela 17 – Resultados para diferentes cenários.

Cenário	Num. estações	Num. Ucaps	Autonomia (km)	Tensão (pu)	TIR (%)
I	4	6	686.58	+0.03	11.66
II	3	8	507.68	+0.01	14.22
III	3	7	393.54	+0.04	16.37
IV	3	6	608.07	+0.03	13.32
V	4	7	701.26	+0.02	11.25

Fonte: Autoria própria.

O estudo dos diferentes cenários possibilita a validação dos resultados da metodologia de tomada de decisão em diferentes circunstâncias, reduzindo o nível de incerteza na solução final do problema. Comparando-se os resultados apresentados na tabela 17 com

² Cotação do dia 10/02/2021 - US\$ 1,00 = R\$ 5,39.

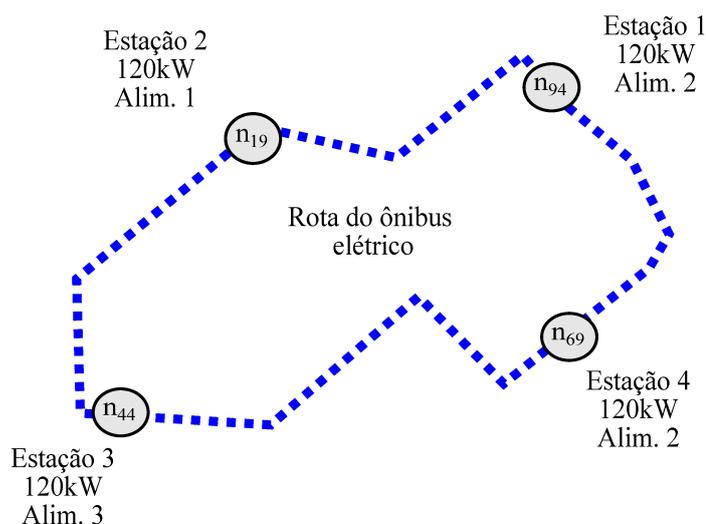
uma solução ótima utópica, no qual todos os objetivos são satisfeitos, pode-se observar que:

- Os resultados obtidos para o Cenário I mostram que quando são desconsiderados os indicadores financeiros de longo prazo, pode haver uma redução na atratividade do investimento em cerca de 20%, enquanto o impacto na autonomia do veículo é apenas de 3%.
- No Cenário II, o foco na minimização das variações de tensão na rede de distribuição acabaram por reduzir a autonomia do veículo em 38%, apesar de ter apresentado uma taxa de retorno do investimento atrativa de 14.22%.
- Comparando-se os resultados obtidos para os Cenários I e II, pode-se observar um claro compromisso entre a autonomia do veículo e os impactos na rede. Também é observado que o Cenário I possui vantagens com relação ao menor peso do veículo devido a menor quantidade de ultracapacitores, porém o cenário II possui um retorno de investimento mais atrativo.
- Os resultados apresentados para o Cenário III, mostram o impacto de ignorar a autonomia e as variações de tensão na rede de distribuição. Apesar do cenário apresentar a melhor taxa interna de retorno do investimento, a autonomia verificada foi 78% pior do que o valor de referência.
- Os incentivos governamentais retratados no Cenário IV resultaram em uma solução bastante equilibrada, tendo em vista que o consumo e o valor inicial do investimento puderam ser menor valoradas. Tal fato possibilitou resultados de autonomia satisfatórios e uma taxa de retorno do investimentos satisfatórios.
- No Cenário V pode-se observar que quando atribui-se pesos isonômicos para todas as funções objetivos, as soluções tendem a não representar um propósito específico e não serem equilibradas. Como não houve ponderação baseada em conhecimento prévio, apesar do cenário ter apresentado a melhor autonomia, ele também foi responsável pela pior taxa de retorno do investimento de projeto.
- Comparando os resultados apresentados para o cenário IV com os apresentados para o Cenário V, é possível observar que a solução do cenário IV tende a ser mais harmoniosa devido a uma redução leve da autonomia, porém acompanhada de um aumento significativo da taxa de retorno do investimento.

Para ilustrar os resultados alcançados nas rotinas de cálculo, a seguir são apresentados os impactos na rede de distribuição e a configuração do sistema de mobilidade elétrica obtido no Cenário I.

Como trata-se de um problema complexo, com elevado consumo computacional, foi definido uma alocação equidistante das estações de recarga, que também contribui para uma maior cobertura das estações ao longo do trajeto percorrido pelo ônibus elétrico. Dessa forma, como resultado do processo de tomada de decisão, o algoritmo definiu a necessidade de 4 estações de recarga, alocadas nas posições (19), (44), (69) e (94), conforme mostrado na figura 33.

Figura 33 – Alocação das estações de recarga e obtenção de solução racional.

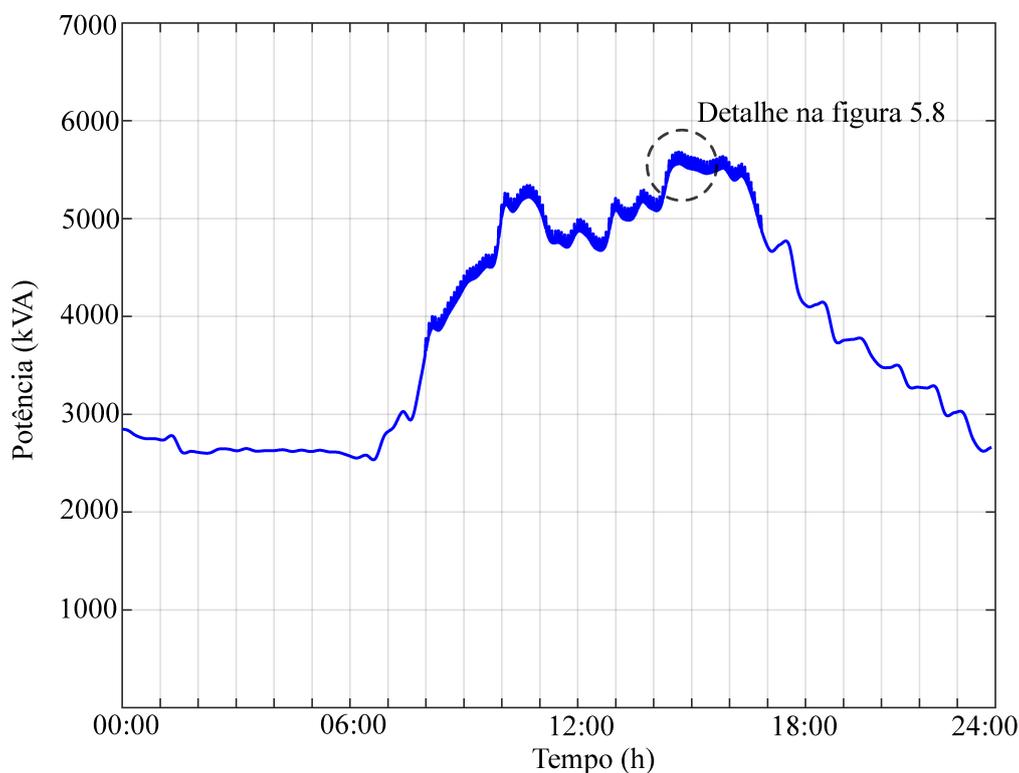


Fonte: Autoria própria.

6.5 Impactos na rede de distribuição

Uma das maiores preocupações para as concessionárias de energia com relação aos veículos elétricos com cargas ultrarrápidas são os impactos que os picos de potência decorrentes das recargas podem causar na rede de distribuição. Dessa forma, a análise da variação de demanda após a conexão das estações de recarga precisou ser realizada e é apresentada na figura 34.

Figura 34 – Demanda total do alimentador após conexão das estações

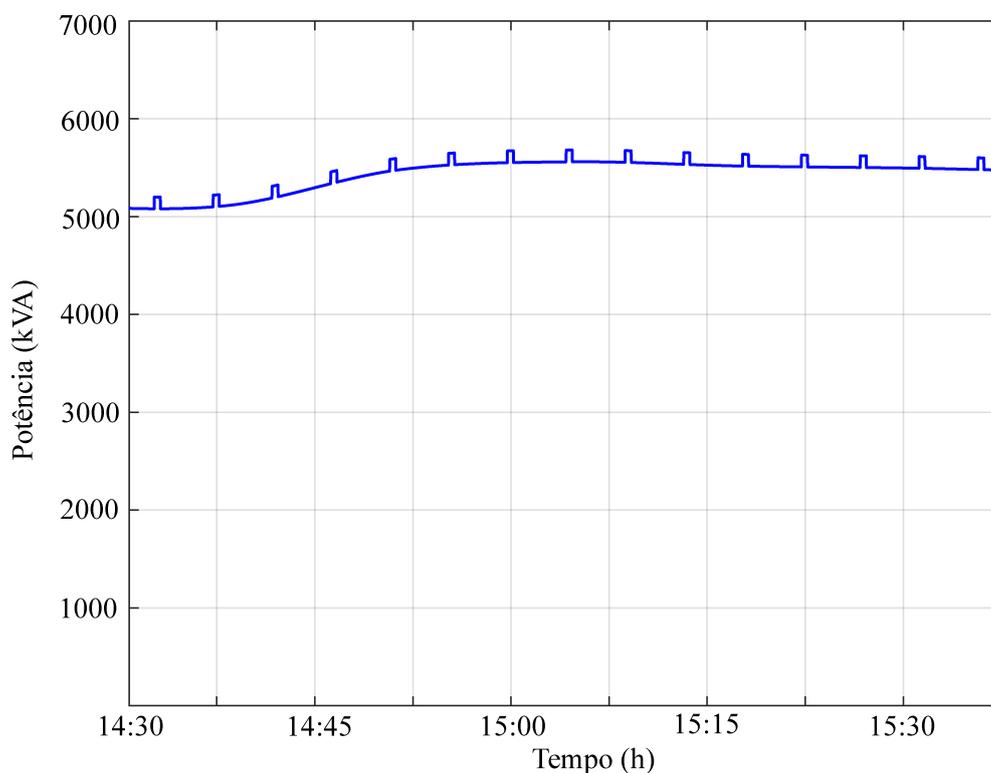


Fonte: Autoria própria.

Para a simulação, foi considerado um ônibus elétrico operando ininterruptamente de 08:00 até às 17:00 realizando recargas ultrarrápidas na rede de distribuição na rota estudada. Pode-se observar que, quando analisadas de forma macro, as cargas de 120 kW são relativamente baixas com relação a demanda total do alimentador que já possuía 5560 kVA no horário de carga máxima (15:00).

Devido à velocidade da recarga do ônibus elétrico, do ponto de vista de influência no carregamento do alimentador, pode-se considerar que está havendo um aumento constante de 120 kW durante o tempo de trabalho estudado. Para se possibilitar uma avaliação direcionada ao momento da carga, é plotada na figura 35 a variação de demanda após a conexão das estações de recarga focada no momento de demanda máxima do alimentador que ocorre às 15:00.

Figura 35 – Detalhe da demanda total do alimentador às 15:00

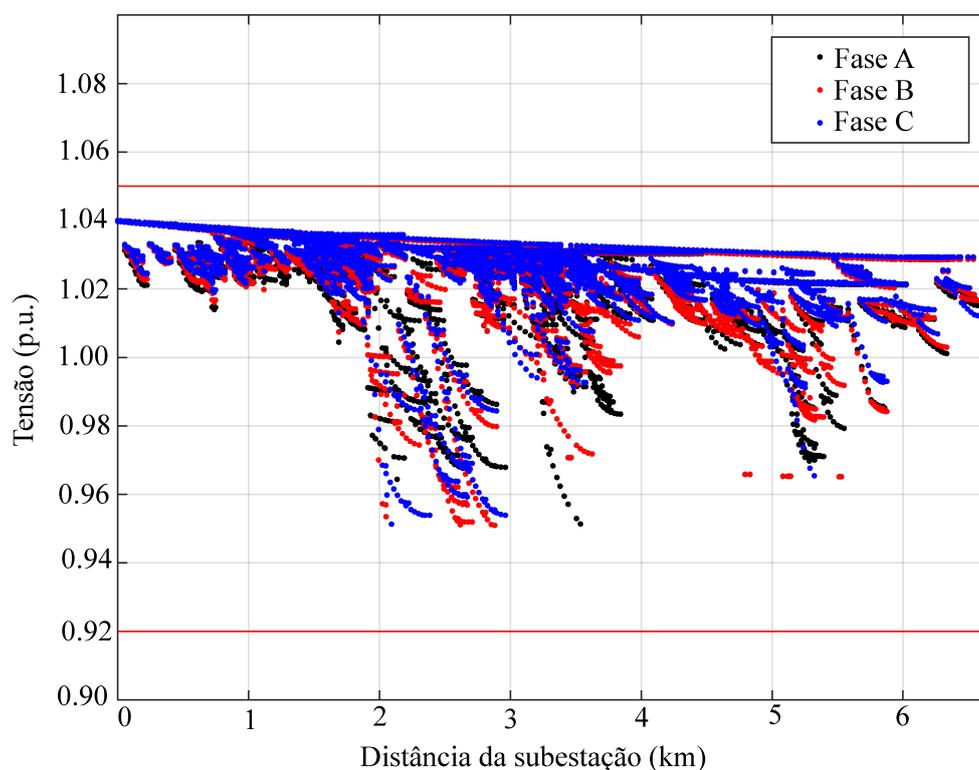


Fonte: Autoria própria.

Somente ao se analisar a demanda do alimentador em um período de tempo menor torna-se possível observar as recargas rápidas regulares que ocorrem na rede de distribuição. Em termos de potência, de fato a recarga representa muito pouco em relação ao suportado pela rede, que no caso da bitola do tronco do alimentador estudado, suportaria até 9,6 MVA. Porém é importante avaliar qual a influência dessa variação abrupta de potência pode ter na qualidade de energia do alimentador.

Devido a característica radial da rede de distribuição, a variação de tensão no sistema é o parâmetro mais adequado para se verificar preliminarmente os impactos das recargas ultrarrápidas do ônibus elétrico. Dessa forma, o perfil de tensão do alimentador após a conexão das estações de recarga, no qual é apresentado o nível de tensão em todos os nós elétricos da rede estudada, é apresentado na figura 36.

Figura 36 – Perfil de tensão do alimentador com estações de recarga



Fonte: Autoria própria.

No gráfico apresentado, no qual é avaliado o nível de tensão no instante em que o ônibus realiza a recarga na estação, pode-se observar que todos os nós elétricos estão entre 0,92 p.u. e 1,05 p.u., portanto toda a rede permanece com nível de tensão adequado segundo o módulo 8 do PRODIST apresentado na tabela 6.

6.6 Discussão dos resultados

Como resultado do do processo de tomada de decisão em condições de incerteza, cada estação de recarga é dimensionada então com capacidade definida pelo algoritmo de 120kW de potência instalada e o tempo máximo de recarga estipulado de 30s. Nessa configuração, a tabela 18 mostra a especificação do sistema de armazenagem definido. Para a bateria foi utilizado o modelo de referência do veículo Tesla Model 3 [Tesla, 2021] e para o ultracapacitor foi utilizado como referência os dados do fabricante Maxwell, modelo BMOD0165 P048 [Maxwell, 2013].

Tabela 18 – Especificação do sistema de armazenagem de energia.

Parâmetro	Bateria	Ultracapacitor
Capacidade nominal	230 Ah	16.5 F
Tensão nominal	350 V	480 V
Tensão máxima	375 V	510 V
Corrente máxima	1150 A	1900 A
Peso	480 kg	135 kg

Fonte: Autoria própria.

Nesta especificação, a tabela 19 mostra o desempenho do sistema de armazenagem de energia para completar um circuito na rota estudada.

Tabela 19 – Desempenho do sistema de armazenagem de energia.

Potência máxima da bateria (kW)	14.15
Energia consumida pela bateria (kWh)	74.48
Potência máxima do ultracapacitor (kW)	145.74
Energia consumida pela ultracapacitor (kWh)	244

Fonte: Autoria própria.

De forma a expandir a vida útil da bateria e minimizar o custo total de energia, o modelo implementado no controlador foi bastante eficaz no estudo de caso apresentado. É possível observar que o sistema especialista *fuzzy* foi capaz de realizar um dimensionamento que preserva a vida útil da bateria, não exigindo elevados níveis de potência ao longo do trajeto ao mesmo tempo em que exige fortemente o ultracapacitor, que é responsável por prover potência para o veículo elétrico nos momentos de maior necessidade.

Um grande desafio para o controlador é o fato da energia armazenada no ultracapacitor não ser suficiente para cobrir longas distâncias do trajeto. Dessa forma, o sistema deve realizar um gerenciamento conservador das fontes energéticas, de forma a manter os níveis de carga na bateria e de energia no ultracapacitor dentro dos parâmetros mínimos definidos nas regras *fuzzy*. Isso é necessário para mantê-los disponíveis em momentos de real necessidade de aceleração ou mudança brusca na velocidade do veículo, conforme mostrado na figura 30.

Se o controlador *fuzzy* realizar um comando de potência desnecessário para o ultracapacitor, ele estará descarregado quando de fato for necessário, ocasionando uma falta de suporte no estágio final da aceleração, quando a potência exigida pelo veículo é bastante alta.

Por outro lado, focar apenas nos pulsos de maior potência pode resultar em um uso raro e não eficiente dos ultracapacitores. A lógica contraditória das fontes de energia

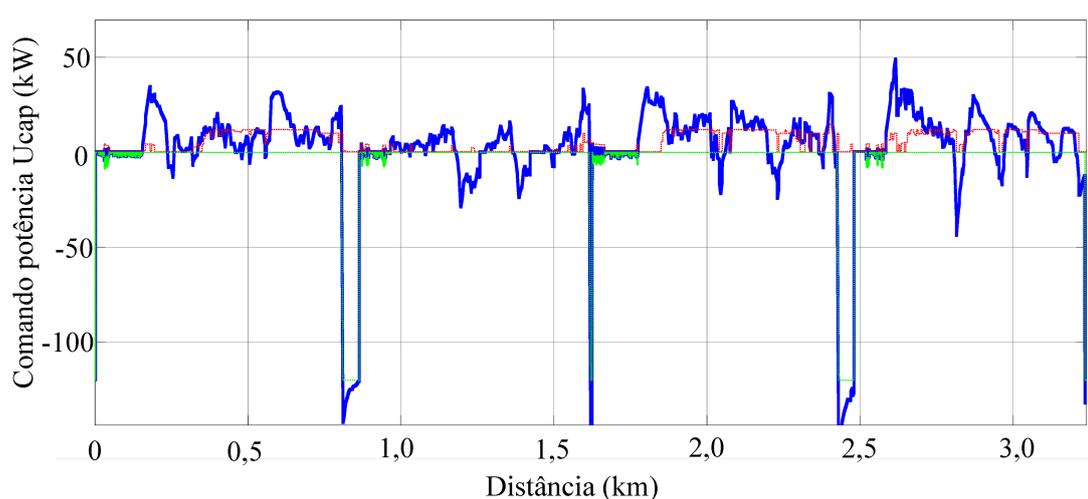
evidencia a necessidade do uso do controlador *fuzzy*, que é capaz de modelar facilmente o comportamento complexo desse sistema usando regras simples, baseadas nos conhecimentos prévios de especialistas.

Para obter o desempenho mostrado, o controlador desenvolvido executou respectivamente os comandos de potência para o ultracapacitor e bateria mostrados nas figuras 37 e 38.

Nos gráficos, a curva pontilhada vermelha representa o comando diferencial de potência da saída do controlador e a curva azul representa a potência que as fontes de energia realmente estão entregando para o sistema.

No caso do ultracapacitor, a curva verde representa os impulsos de potência de recarga pela rede de distribuição no momento de parada para embarque e desembarque de passageiros.

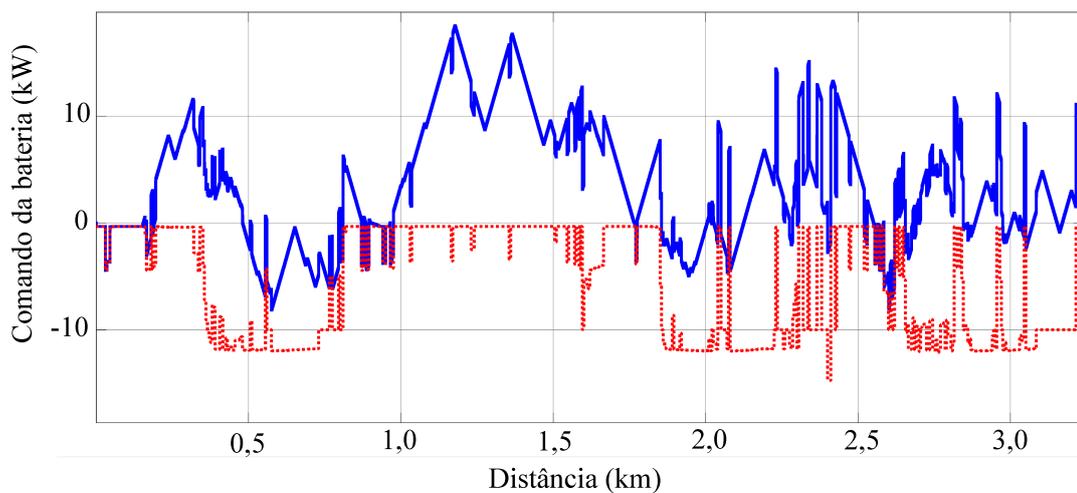
Figura 37 – Comando de potência do ultracapacitor.



Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que os valores negativos nas linhas azuis nos gráficos representam que o componente está absorvendo energia da rede de distribuição ou sendo carregado por meio da frenagem regenerativa do veículo.

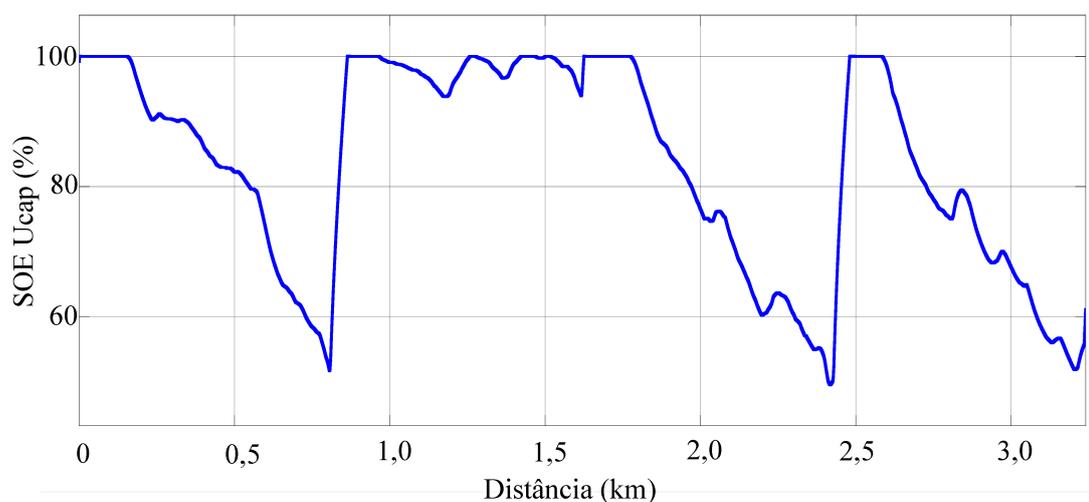
Figura 38 – Comando de potência da bateria.



Fonte: Autoria própria.

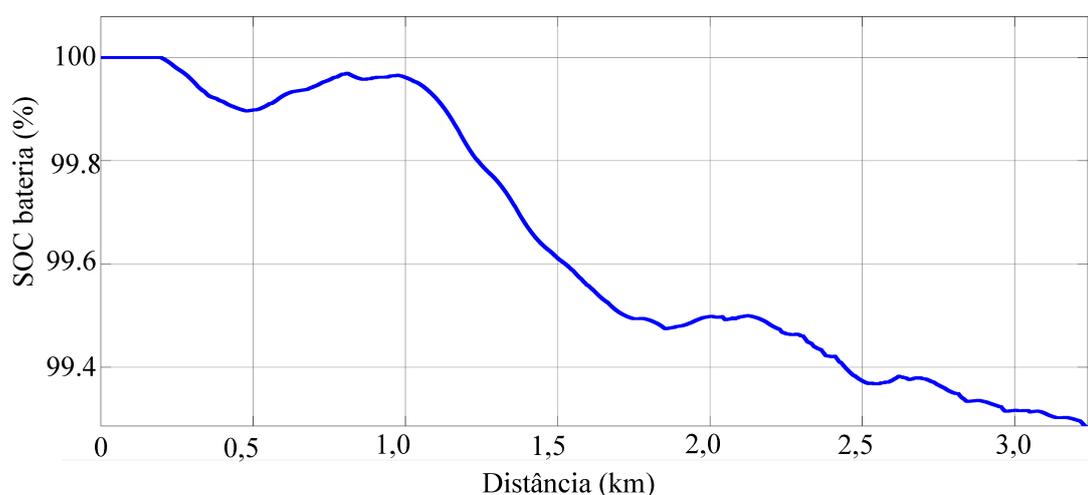
Os comandos executados pelo controlador possuem influência direta sobre o estado de energia do ultracapacitor (figura 39) e sobre o estado de carga da bateria (figura 40).

Figura 39 – SOE do ultracapacitor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – SOC da bateria.



Fonte: Autoria própria.

A figura 40 mostra que um importante objetivo da implementação, que é a preservação da vida útil da bateria, foi alcançado. É possível notar no gráfico apresentado que a queda no estado de carga da bateria foi de apenas 0,6%.

Como o gráfico representa o comportamento apenas para uma volta completa no trajeto estudado, é obtida uma autonomia de 686,58km, considerando-se um SOC mínimo de 30% para evitar danos por descarga excessiva. Neste cenário, o veículo seria capaz de realizar 221 voltas neste trajeto sem a necessidade de parar para realizar a recarga total da bateria.

A abordagem desenvolvida no presente trabalho foi capaz de identificar uma solução racional para o problema sob determinados requisitos estratégicos de integração e operação dos sistemas de mobilidade elétrica nas redes de distribuição, por meio da aplicação de uma abordagem possibilística para modelagem da incerteza e geração de combinações representativas dos dados iniciais, estados de incerteza e cenários.

Conforme apresentado nas regras *fuzzy* estabelecidas no Capítulo 4, o ultracapacitor funciona como sistema principal de armazenagem do veículo explorando seu longo ciclo de vida, enquanto a bateria funciona de forma auxiliar descarregando lentamente sua energia ao longo de várias voltas no trajeto.

Capítulo 7

Estudo de caso II: Expansão do sistema e atendimento ao BH-Tec

“For the robust, an error is information.”

Nassim Taleb

Como exemplo de aplicação das abordagens de soluções robustas apresentadas no capítulo 5, será considerado o problema de otimização e tomada de decisões multiobjetivo em condições de incerteza do processo de substituição de ônibus urbanos movidos a diesel que atendem o Parque Tecnológico de Belo Horizonte - BH-Tec por equivalentes movidos à eletricidade.

7.1 Objetivo

O BH-Tec é parque tecnológico de desenvolvimento e integração de negócios relacionados ao desenvolvimento científico nacional [BH-Tec, 2022]. Nesse cenário, é responsável por fomentar estratégias e prover ferramentas relacionadas a inovação em diversas áreas do conhecimento, abrigando empresas que se empenham a estudar e desenvolver novas tecnologias, contribuindo para o desenvolvimento do país.

O objetivo deste estudo de caso é realizar um processo de integração e operação de um sistema de mobilidade elétrica que permita uma maior sinergia entre o campus Pampulha da UFMG e o BH-Tec. O parque tecnológico atualmente é atendido por duas

linhas diárias de um ônibus à diesel que circulam às 7:40h e às 17:20h [UFMG, 2022a], utilizando a Linha 3 de ônibus internos da universidade, mostrado na figura 41.

Figura 41 – Ônibus à diesel que atualmente atende o BH-Tec



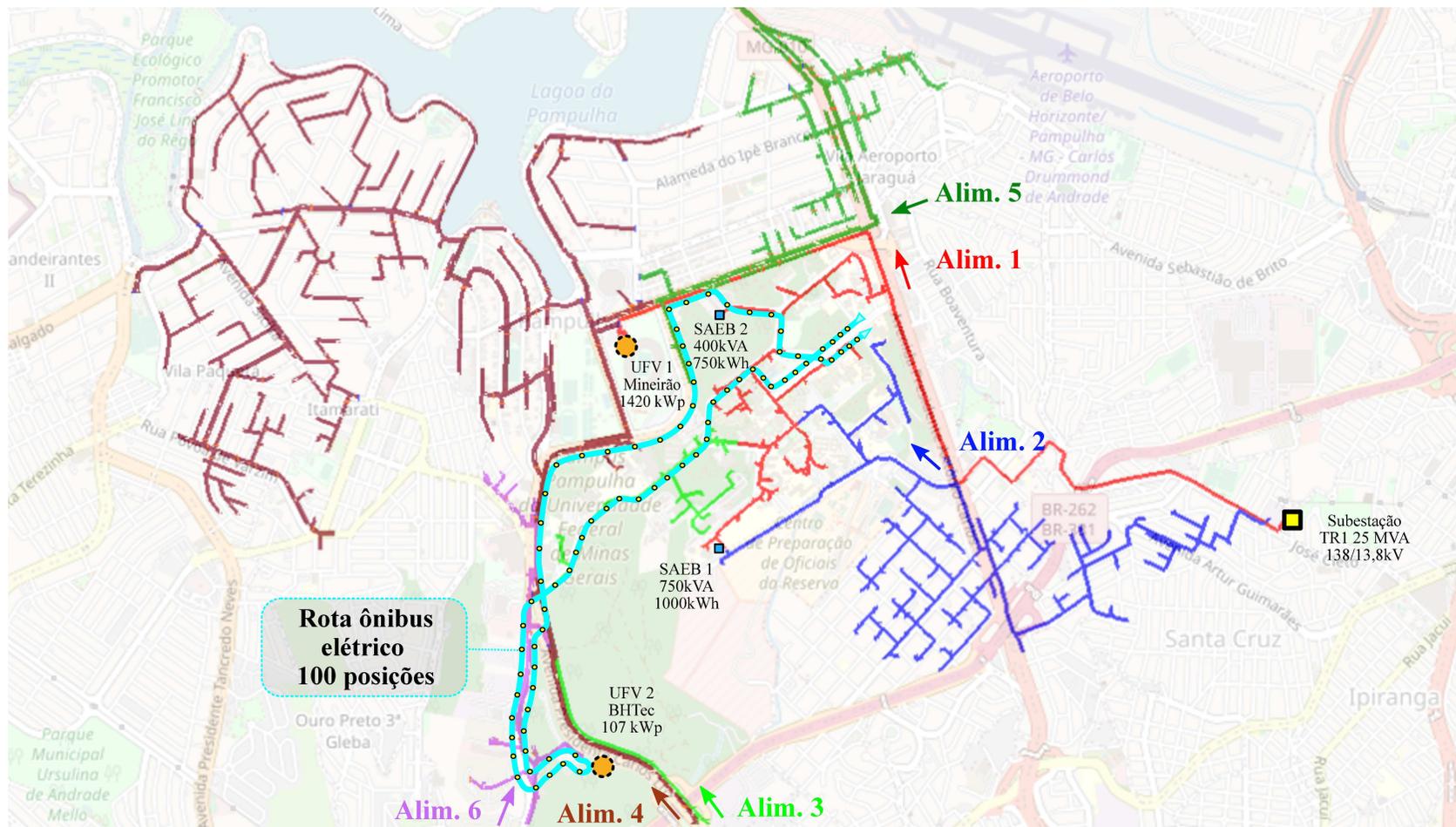
Fonte: UFMG [2022b]

O estudo irá avaliar a viabilidade técnica econômica da substituição destes ônibus urbanos à diesel por modelos elétricos equivalentes, por meio da implantação desta linha piloto de ônibus elétricos. De forma geral, esta avaliação técnico-econômica almeja deixar claro os diferentes fatores que exercem influência a tomada de decisão de gestores e operadores sobre a mudança dessas diferentes tecnologias.

7.2 Apresentação do Sistema

De forma complementar ao que foi analisado no estudo de caso do capítulo 6, a rota do presente estudo irá percorrer diversos pontos do campus universitário, indo até ao BH-Tec e retornando ao ponto de partida após uma volta completa, conforme ilustrado na figura 42.

Figura 42 – Rota do ônibus de circulação interna e alimentadores de média tensão.



Fonte: Autoria própria.

Este novo circuito irá passar por seis diferentes alimentadores de energia de média tensão (13,8 kV), dobrando a área de análise do estudo de caso anterior. Nesse novo sistema, além da usina fotovoltaica (UFV) de 1420kW do Mineirão, também haverá a presença de uma usina fotovoltaica instalada no BH-Tec de 107 kW, bem como os dois sistemas de armazenamento de energia (SAEB 1 -750kVA/1000kWh e SAEB 2 - 400kVA/750kWh) que já haviam sido considerados no estudo de caso anterior.

A presença de diversos recursos energéticos distribuídos (RED) na rede estudada é uma oportunidade de realizar uma integração dessas fontes com o sistema de veículos elétricos a ser implantado. Tal integração ajuda a construir um conceito de sustentabilidade que a UFMG tem buscado, por meio de alternativas que melhoram a eficiência energética, bem como a redução dos impactos ambientais e emissões de poluentes locais em suas instalações.

A tabela 20 apresenta os dados elétricos da rede de distribuição¹ utilizados na modelagem do sistema.

Tabela 20 – Dados elétricos da rede de distribuição.

Parâmetro	Valor
Potência ativa total	13.4376 MW
Potência reativa total	5.88934 Mvar
Máximo nível de tensão	1.0404
Mínimo nível de tensão	0.89803
Perdas de potência elétrica	0.349546 MW
Potência instalada UFV 1	1420 kWp
Potência instalada UFV 2	107 KWp
Potência/ energia SAEB 1	750 kVA/ 1000 kWh
Potência/ energia SAEB 2	400 kVA/ 750 kWh
Queda de tensão admissível	+/- 0.05 p.u
Nível de perdas admissível	10 %

Fonte: Autoria própria.

Como trata-se de um problema complexo, com elevado consumo computacional, será definida uma alocação equidistante das estações de recarga, que também contribui para uma maior cobertura das estações ao longo do trajeto percorrido pelo ônibus elétrico.

Caso o local de instalação das estações de recarga definido pelo algoritmo não possua conexão direta a rede de distribuição de média tensão, a abordagem desenvolvida é capaz de calcular o ponto de rede mais próxima e realizar a extensão de condutores necessário, calculando seu custo utilizando a mesma tabela 13 do estudo de caso anterior.

A rota a ser percorrida pelo ônibus elétrico neste estudo de caso possui grandes

¹ Considerando todos os seis alimentadores de média tensão (13,8kV) do estudo de caso

variações altimétricas, percorrendo cerca de 8,9 km, com inclinação máxima de subida de 26,8% e de descida de -34,8%. Essa variação, que impõem ao veículo elétrico um elevado gasto energético, é mostrada na figura 43.

Figura 43 – Elevação do terreno.

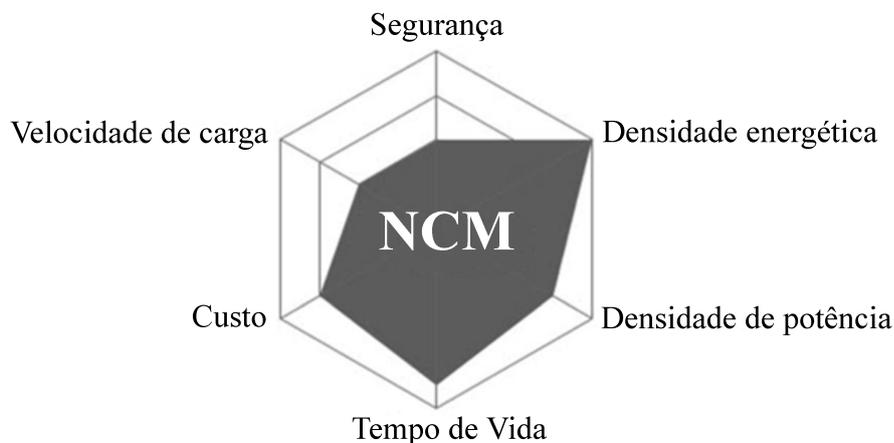


Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante ao sistema de mobilidade do estudo de caso do capítulo 6, o ônibus elétrico a ser estudado utilizará fonte de armazenamento híbrido, baseando-se em Justino et al. [2014]. Entretanto, ao invés do uso de bateria e ultracapacitor, para este estudo, será utilizado uma combinação de duas tecnologias diferentes de bateria, sendo elas a tecnologia NCM (Níquel Cobalto Manganês) e LFMP (Lítio Ferro Manganês Fosfato) [Pavlovskii et al., 2022, Quan et al., 2022].

O uso de dois estágios de bateria se deve ao fato do preço da bateria estar reduzindo significativamente nos últimos anos, bem como sua capacidade de receber recargas mais rápidas estar melhorando, conforme estudos de [Pavlovskii et al., 2022]. Além disso, a escolha por duas diferentes tecnologias é bastante interessante, pois permite a exploração das diferentes vantagens de cada uma delas no modelo de tomada de decisão multiobjetivo. A bateria NCM se destaca pela alta densidade energética [Quan et al., 2022] enquanto a bateria LFMP é conhecida por permitir uma recarga ultrarrápida com maior nível de segurança [Lei et al., 2022], conforme mostrado nas figuras 44 e 45.

Figura 44 – Tecnologia de bateria NCM



Fonte: Adaptado de [Pushevs \[2022\]](#)

Figura 45 – Tecnologia de bateria LFMP



Fonte: Adaptado de [Pushevs \[2022\]](#)

Na modelagem desenvolvida no presente estudo de caso, os módulos de bateria LFMP seriam utilizados no momento das recarga ultrarrápidas por meio da infraestrutura pantográfica presentes nos pontos de parada, enquanto os módulos de bateria NCM funcionariam apenas com recargas mais lentas, preservando sua vida útil [\[Sun et al., 2022\]](#).

O ônibus utilizado como referência foi o ABB TOSA, mostrado na figura 46, que originalmente já possui o sistema de recarga ultrarrápida nos pontos de parada, por meio de estações de alta potência a 600 kW por 15 segundos [\[ABB, 2022\]](#).

Figura 46 – Ônibus ABB TOSA.



Fonte: [ABB \[2022\]](#)

Para a aplicação da abordagem proposta, é estudada a utilização de duas diferentes tecnologias de bateria para realizar a maximização da autonomia do veículo. Dessa forma, o processo de tomada de decisão visa dimensionar um novo sistema de armazenamento menor, associado a instalação de diversas estações de recarga ao longo do trajeto. Os parâmetros deste ônibus e da rota adotada para a modelagem dinâmica do sistema de mobilidade são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros dinâmicos do ônibus elétrico.

Parâmetro	Valor
Coefficiente de atrito do solo	0.02
Coefficiente de arraste	0.6
Força gravitacional	9.81 m/s ²
Densidade do ar	1.225 kg/m ³
Área frontal do veículo	8.56 m ²
Peso do veículo	12000 kg

Fonte: Autoria própria.

A seguir, os dados de entrada do estudo de caso serão submetidos à técnica de tomada de decisão em condições de incerteza do Capítulo 5 para se obter a solução racional para o problema, dimensionando-se o número de estações, a quantidade necessária de módulos de cada uma das tecnologias de bateria, a autonomia do veículo, a variação de tensão e taxa interna de retorno do investimento deste projeto.

7.3 Aplicação das matrizes *payoff* para obtenção de soluções robustas

O processo de integração e operação do sistema de mobilidade elétrica apresentado pode ser descrito pelo problema de otimização e tomada de decisão multiobjetivo em condições de incerteza apresentado na tabela abaixo:

Tabela 22 – Funções objetivo do problema

	$F_1(X)$	$F_2(X)$	$F_3(X)$	$F_4(X)$	$F_5(X)$	$F_6(X)$	$F_7(X)$	$F_8(X)$	$F_9(X)$	$F_{10}(X)$
x_1	548.06	-3.53	0.03	3	24.10	685117.12	12.01	571374.02	138223.27	2
x_2	548.80	-3.20	0.03	3	23.81	725834.02	9.66	530657.12	97506.37	2
x_3	551.61	-3.63	0.02	3	40.87	780952.02	7.10	475539.12	42388.37	3
x_4	548.11	-3.29	0.02	3	35.71	815497.02	5.76	440994.12	7843.37	3
x_5	550.96	-2.68	0.02	3	38.45	850042.02	4.56	406449.12	-26701.63	5
x_6	545.50	-3.38	0.02	3	43.21	888701.62	3.37	367789.52	-65361.23	5
x_7	550.12	-3.44	0.02	5	42.26	934517.10	2.13	324407.06	-111176.71	6
x_8	552.89	-3.52	0.02	4	44.45	986057.16	0.86	271650.49	-162716.77	6
x_9	550.57	-3.13	0.02	4	42.55	1030888.66	-0.12	226818.99	-207548.27	7
x_{10}	550.86	-3.29	0.02	5	45.04	1072097.55	-0.94	186826.61	-248757.16	7

Fonte: Autoria própria.

A tabela 22 foi obtida por meio das etapas de modelagem do problema, sendo elas a modelagem técnico-financeira do Capítulo 3 e modelagem dinâmica do Capítulo 4. As funções objetivo são representadas pelas colunas $F_1(X)$ até $F_{10}(X)$ sendo respectivamente (1) autonomia em km, (2) perdas elétricas em kW, (3) elevação de tensão em p.u., (4) módulos de bateria em número discreto, (5) consumo de energia em MWh/ano, (6) custo inicial em R\$, (7) TIR em %, (8) VPL em R\$, (9) TCO comparativo em R\$ e (10) *payback* em anos.

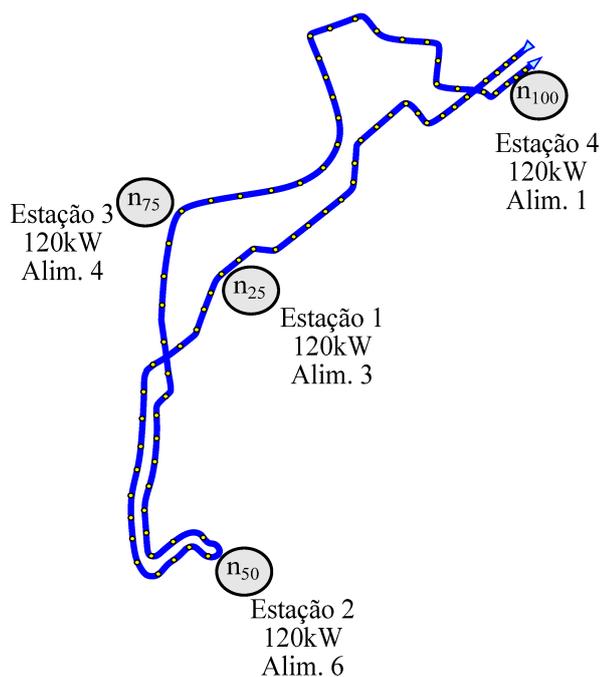
Ao contrário do que foi realizado no estudo de caso do Capítulo 6, onde os cenários foram construídos a partir da definição de diferentes políticas de mobilidade elétrica, neste estudo de caso os cenários foram construídos utilizando as sequências de $LP\tau$ [Sobol', 1979], baseando-se no trabalho de Pedrycz et al. [2011].

Devido ao elevado número de funções objetivo e alternativas de solução do problema original, o processo computacional de aplicação das matrizes *payoff* gerariam um grande volume de cálculos matemáticos, que são omitidos aqui. Contudo, no apêndice C, as etapas de cálculo, bem como os resultados da simulação computacional obtidos são apresentados em sua totalidade.

As alternativas de solução são denotadas pelas variáveis x_1 até x_{10} , que representam diferentes quantidades e localizações de estações de recarga, bem como diferentes alternativas de dimensionamento do sistema de armazenagem do veículo.

Analisando-se os cálculos apresentados no apêndice C, é possível encontrar a solução multiobjetivo para os critérios de Wald, Laplace, Savage e Hurwitz, ambos apontando para a variável x_4 como vencedora. Tal alternativa de solução, indica a necessidade de 4 estações de 120 kW, alocadas nas posições (25), (50), (75) e (100), conforme mostrado na figura 47.

Figura 47 – Alocação das estações de recarga e obtenção de solução racional.



Fonte: Autoria própria.

7.4 Resultados obtidos

Por meio do processo de tomada de decisão, é realizado a especificação do sistema de armazenamento, apresentado na tabela 23. Para o primeiro estágio de bateria foi definido a tecnologia LFMP considerando densidade de energia média de 125 Wh/kg e para o segundo estágio de bateria foi definido a tecnologia NCM, com densidade energética média de 225 Wh/kg [Licarco, 2022].

Tabela 23 – Especificação do sistema de armazenagem de energia.

Parâmetro	Bateria 1	Bateria 2
Tecnologia	LFMP	NCM
Capacidade nominal	72 Ah	480 Ah
Tensão nominal	350 V	350 V
Capacidade energética	25,2 kWh	168 kWh
Densidade energética	90 a 160 Wh	150 a 300 Wh
Peso	202 kg	746 kg

Fonte: Autoria própria.

Nesta configuração, é possível ilustrar a performance desse sistema híbrido em uma volta no trajeto analisado, conforme mostrado na tabela 24.

Tabela 24 – Desempenho do sistema de armazenagem de energia.

Potência máxima atingida na bateria 1 - LFMP (kW)	176.82
Energia absorvida na bateria 1 - LFMP (kWh)	5.54
Potência máxima atingida na bateria 2 - NCM (kW)	64.78
Energia absorvida na bateria 2 - NCM (kWh)	2.18

Fonte: Autoria própria.

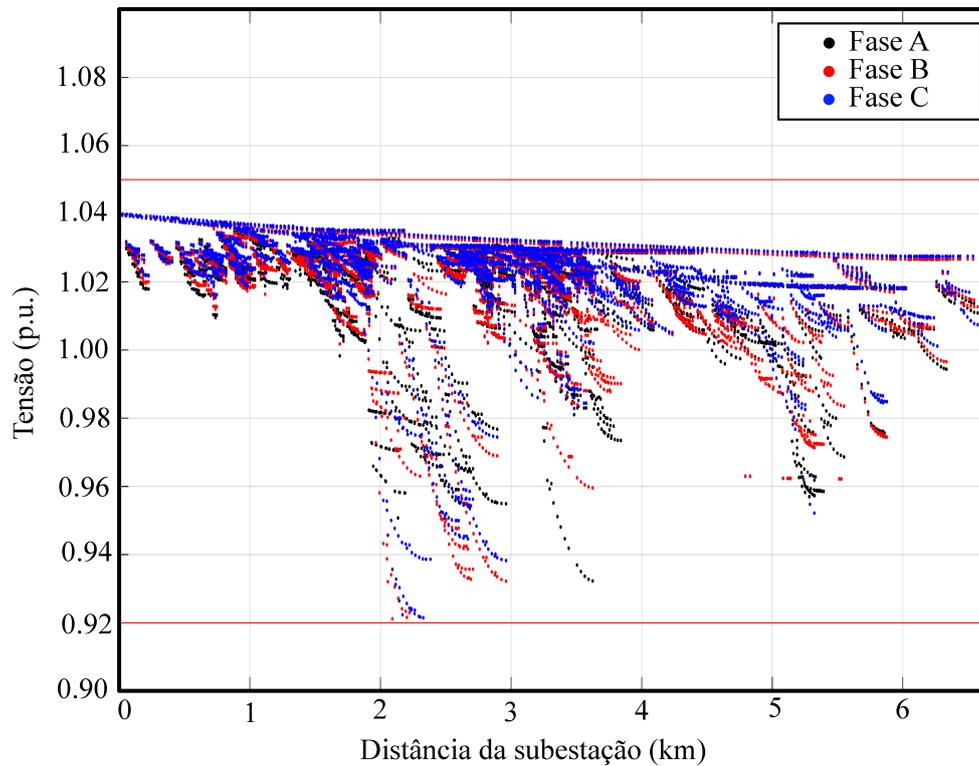
Observa-se que o sistema de gerenciamento energético *fuzzy* foi eficaz em preservar o segundo estágio de baterias NCM, dando prioridade para as recargas ultrarrápidas no primeiro estágio com baterias LFMP, que possuem maior capacidade de suportar esse tipo de carga, bem como possuem maior densidade de potência.

Para ilustrar os resultados alcançados nas rotinas de cálculo, a seguir são apresentados o desempenho do ônibus elétrico neste circuito, bem como os impactos na rede de distribuição para configuração do sistema de mobilidade elétrica escolhido pelo processo de tomada de decisão.

7.5 Impactos na rede de distribuição

O perfil de tensão do alimentador posteriormente a conexão das estações de recarga é mostrado na figura 48, no qual é sinalizado o nível de tensão em todos os nós elétricos dos seis alimentadores de 13,8 kV da rede analisada.

Figura 48 – Tensão do alimentador com estações de recarga



Fonte: Autoria própria.

Foram verificados níveis de tensão um pouco mais baixos do que no estudo de caso anterior, devido à necessidade de conexão das estações de carregamento em alimentadores que já possuíam anteriormente níveis de tensão mais baixos, como o alimentador 4. Tal fato ocorre devido a sua maior extensão, aumentando a distância entre fonte e carga e tendo como consequência uma maior queda de tensão na rede.

Entretanto, observa-se que todos os nós elétricos permanecem com nível de tensão adequado segundo o módulo 8 do PRODIST (entre 0,92 p.u. e 1,05 p.u.) no momento em que o ônibus realiza a recarga na estação, não impondo nenhuma restrição à conexão das estações ao sistema elétrico.

Em razão da característica radial da rede de distribuição, essa variação de tensão seria um dos impactos mais significativos que o ônibus elétrico com recargas ultrarrápidas poderia causar na rede de distribuição [Al-Saadi et al., 2022].

Considerando que o nível de tensão apresentado na figura 48 chegou no limite permitido pelo PRODIST, fica evidente que a abordagem utilizada explorou bastante o universo de solução, respeitando as restrições impostas inicialmente para o problema.

Como o ABB TOSA, ônibus utilizado como base para a simulação, utiliza carregadores de 600 kW por 15s [ABB, 2022], caso fosse feita a integração desse veículo sem

as modificações propostas, seriam necessárias obras de reforço nos alimentadores para minimizar os impactos na rede de distribuição.

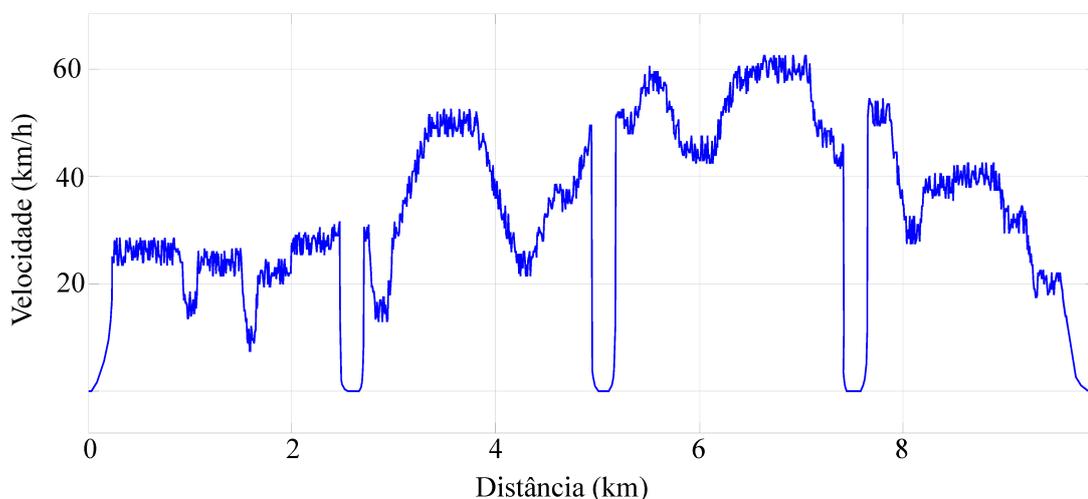
Além disso, deve-se analisar os impactos que os pulsos de grandes montantes de potência em um pequeno espaço de tempo podem causar nos alimentadores de média tensão. Uma fato interessante é que a própria metodologia de distribuição espacial das estações de recarga propicia uma menor demanda concentrada na rede, não causando impacto significativo no presente estudo. No pior cenário, foi calculado um aumento de apenas 4,8% na demanda do alimentador proveniente da recarga dos ônibus elétricos.

Com relação as perdas elétricas, também pode se observar um acréscimo no sistema proveniente das novas cargas inseridas na rede de distribuição. Entretanto, o valor calculado acrescido de 3.292 kW não transgride os valores máximos admissíveis para os alimentadores estudados.

7.6 Discussão dos resultados

A solução racional do processo de tomada de decisão em condições de incerteza prevê a instalação de 4 estações de carregamento com potência instalada de 120 kW, que serão capazes de carregar o ônibus elétrico regularmente durante a chegada e saída de passageiros, com um tempo médio de 30 segundos. A seguir, na figura 49, é apresentado as velocidades do veículo, considerando as 4 paradas necessárias que foram definidas na seção anterior. Esse ciclo de condução foi utilizada na modelagem dinâmica para se calcular a potência exigida pelo ônibus ao longo do seu trajeto.

Figura 49 – Velocidade do veículo.

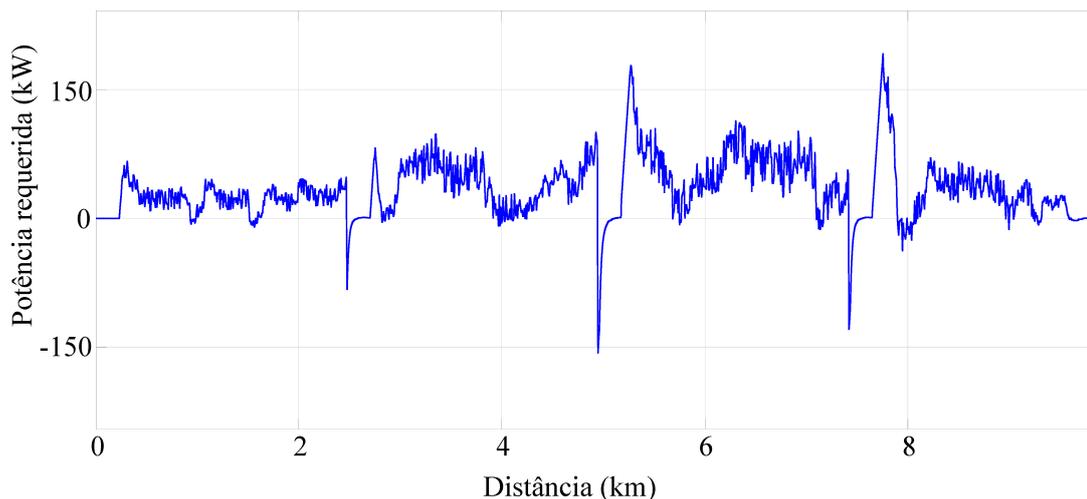


Fonte: Autoria própria.

Por meio do ciclo de condução do veículo é possível se calcular a potência requerida pelo ônibus ao longo do trajeto utilizando a modelagem dinâmica apresentada no Capítulo 4,

conforme mostrado na figura 50. De forma semelhante ao estudo de caso anterior, a potência requerida pelo ônibus elétrico possui grandes variações ao longo da rota avaliada em consequência da elevada variação altimétrica e predominância de trechos urbanos no trajeto que o veículo irá percorrer.

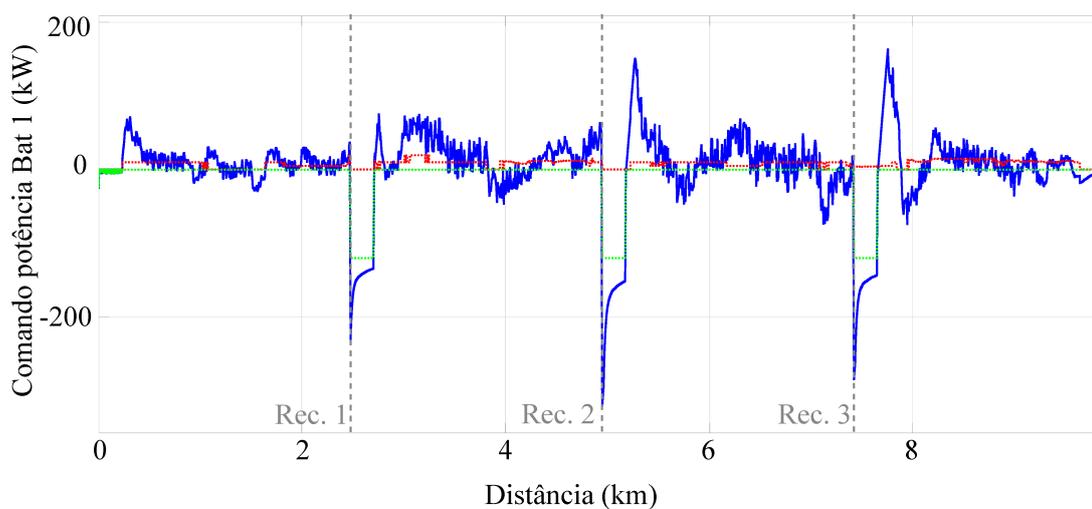
Figura 50 – Potência requerida pelo veículo.



Fonte: Autoria própria.

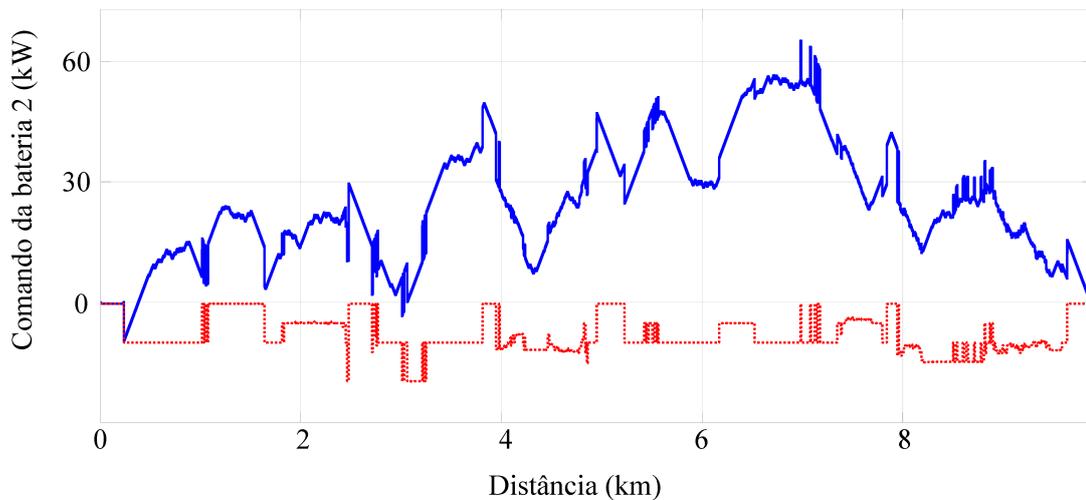
Para realizar a correspondência entre a potência requerida pelo ônibus elétrico e a potência entregue pelas baterias, o controlador desenvolvido executou respectivamente os comandos de potência para o primeiro e segundo estágios de bateria mostrados nas figura 51 e figura 52 .

Figura 51 – Comando de potência do 1º estágio de bateria (LFMP).



Fonte: Autoria própria.

Figura 52 – Comando de potência do 2º estágio de bateria (NCM).

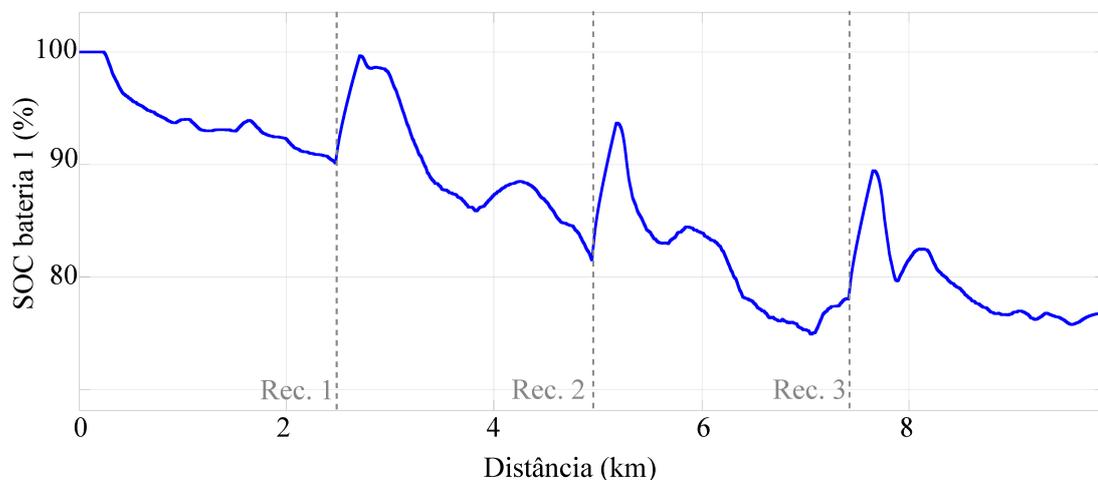


Fonte: Autoria própria.

A curva pontilhada vermelha representa o comando diferencial de potência da saída do controlador solicitando energia das baterias e a curva azul representa a potência que a bateria de fato entregou ao ônibus elétrico. Para os valores negativos, significa que a bateria está absorvendo energia da rede de distribuição ou sendo carregado por meio da frenagem regenerativa do veículo.

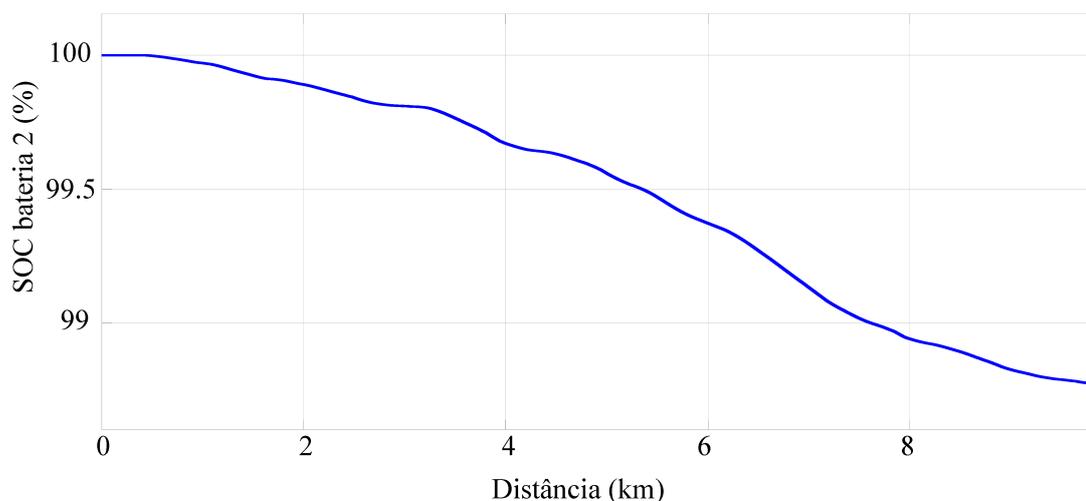
No primeiro estágio de bateria (LFMP), a curva verde indica os impulsos de potência de recarga proveniente da rede de distribuição no momento de parada nas estações. Esses comandos executados pelo controlador influenciam diretamente no SOC de ambas baterias, conforme mostrado na figura 53 e na figura 54.

Figura 53 – SOC da bateria 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – SOC da bateria 2.



Fonte: Autoria própria.

Analisando-se as figuras 53 e 54 é possível observar que o SOC do segundo estágio de bateria foi preservado, reduzindo aproximadamente apenas 1.3% de sua capacidade ao longo de uma volta na trajetória estudada.

Considerando um SOC mínimo de 20% para o segundo estágio de baterias e 548 km de autonomia, o ônibus elétrico seria capaz de realizar 62 voltas completas no trajeto estudado sem realizar uma nova recarga completa. Tal fato, mostra que um dos objetivos do processo de tomada de decisão foi atingido, que é o aumento da autonomia do veículo por meio da preservação da vida útil do segundo estágio de bateria, explorando o primeiro estágio que possui maior segurança para executar as recargas ultrarrápidas.

Analisando criticamente os resultados obtidos neste estudo de caso, que aplica a abordagem apresentada no Capítulo 5, foi possível gerar soluções multiobjetivo robustas, em condições de incerteza. Entretanto, a utilização direta desta metodologia e, particularmente, da sua técnica de construção de cenários pode não permitir a consideração adequada de algumas condições modernas de desenvolvimento energético, que podem demandar a consideração das incertezas ao longo do tempo, variando ao longo do horizonte de planejamento. De tal forma, seria necessário falar sobre a construção de cenários dinâmicos, seguindo, por exemplo, à metodologia proposta em [Bucciarelli et al., 2018, Amer et al., 2011].

Por meio do processo de aplicação das matrizes *payoff* deste Capítulo, foi possível observar que houve unanimidade na escolha da alternativa de solução pelos critérios de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz, sendo claramente possível ser definida a solução racional para o problema apresentado. Entretanto, em alguns casos, cada um dos critérios pode apontar para soluções diferentes, não sendo possível distinguir a qualidade das soluções. Nesse caso, aconselha-se adicionar novos critérios de caráter qualitativo para escolha da

solução final [[Ekel et al., 1998](#), [Pedrycz et al., 2011](#)].

Este capítulo mostra-se como uma eficaz diretriz para um gestor realizar o planejamento de integração de um sistema de mobilidade elétrica. De forma geral, a metodologia aplicada neste estudo de caso serve como uma ferramenta de auxílio a tomada de decisão nesta transição tecnológica, permitindo a análise de um tema complexo sobre a perspectiva financeira, de qualidade de energia e considerando todas as incertezas presentes no problema.

Capítulo 8

Conclusões

“The secret of change is to focus all of your energy not on the fighting the old, but on building the new. ”

Socrates

Nesse capítulo, são apresentadas as conclusões desta pesquisa, acerca do processo de tomada de decisão multiobjetivo e do sistema especialista *fuzzy* desenvolvidos e sua capacidade de realizar a integração e operação de sistemas de mobilidade elétrica, considerando as incertezas do problema.

8.1 Considerações finais

Este trabalho apresentou uma abordagem para a integração e operação de um sistema de mobilidade elétrica, considerando as incertezas do processo de transição tecnológica e os impactos na rede de distribuição. A abordagem proposta levou em consideração indicadores financeiros para realizar a avaliação do processo de tomada de decisão em ambiente *fuzzy*, considerando diversos cenários de implantação de um projeto de mobilidade elétrica.

Para lidar com as incertezas do processo de transição tecnológica, uma modelagem *fuzzy* foi aplicada tanto na fase de integração quanto de operação, garantindo que os parâmetros de entrada críticos do sistema tivessem sua incerteza considerada.

A aplicabilidade do modelo foi verificada em dois estudos de caso na Universidade

Federal de Minas Gerais e no BH-Tec, por meio da aplicação da metodologia em cenários operacionais realistas.

Os resultados indicam que os sistemas de ônibus elétricos são tecnicamente viáveis e podem se tornar economicamente competitivos, desde que o processo de integração e operação ocorra de forma prudente e planejada.

Nos Capítulos 6 e 7, a incerteza é considerada quando se analisa diferentes cenários para o processo de transição tecnológica por meio da aplicação de matrizes *payoff*, permitindo que o processo de tomada de decisão ocorresse de forma assertiva. Entretanto é importante ressaltar que a abordagem proposta pode ser expandida para análises mais amplas, no qual seja possível realizar uma combinação de alternativas de incertezas ao longo do tempo, utilizando cenários dinâmicos.

Da forma que a pesquisa foi concebida, a integração é possível por meio de um modelo $\langle X, F \rangle$ de tomada de decisão multiobjetivo em ambiente *fuzzy*, embasado por uma análise econômica detalhada por meio de diversos indicadores financeiros de projeto, tais como VPL, TCO, TIR e *payback*.

O processo de operação é realizado por meio da modelagem dinâmica de todo o sistema de mobilidade elétrica, desde o sistema de armazenagem, conversores de potência, estação de recarga e rede de distribuição. Utilizando-se esta modelagem, foi possível realizar uma simulação de performance do sistema especialista *fuzzy* proposto, considerando todos seus aspectos técnicos e operacionais.

Analisando-se criticamente os resultados obtidos na pesquisa, é possível constatar a importância do gerenciamento de carga e sua modelagem dinâmica, que reduz correntes de pico e garante que os ciclos de uso da bateria sejam minimizados, tendo como consequência a minimização do montante de bateria embarcado no veículo. Foi observado que a vida útil da bateria depende de vários parâmetros, como ciclo de uso, temperatura, valores de correntes de pico e intensidade de carga.

No sistema especialista *fuzzy*, dentre os parâmetros citados, somente a temperatura não foi considerada no controlador estudado, podendo ser avaliado em trabalhos futuros. Os resultados mostraram que diferentes pesos nas funções objetivo podem levar a soluções totalmente diferentes para a determinação da melhor configuração para a instalação das estações de recarga. Também foi demonstrado que caso haja políticas governamentais de subsídio e facilitação de crédito, os investimentos nesta área tendem a ser bastante atrativos e trazem inúmeros ganhos quando se realiza a análise ao longo do tempo.

Observou-se também que algumas variáveis são bastante sensíveis e podem ter forte interdependência nas variações de alguns cenários. Por exemplo, o aumento de ultracapacitores e conseqüentemente o aumento de peso do veículo, impactam significativamente na autonomia do veículo enquanto o aumento do número de estações aumenta considera-

velmente o consumo de energia do sistema.

De forma ampla, o sistema é dimensionado com o objetivo de se encontrar o valor mínimo de bateria embarcada no veículo para fornecer energia suficiente para cobrir trechos do trajeto do ônibus, considerando a recarga de modo ultrarrápida nos pontos de parada para entrada e saída de passageiros.

Desse modo, o presente trabalho tenta tornar viável o sistema de mobilidade elétrica por meio da exploração de uma abordagem que concilia os investimentos em armazenagem com os investimentos na infraestrutura de mobilidade elétrica.

Comparando com as abordagens apresentadas na literatura, a abordagem proposta encontra um ponto de harmonia entre o custo do sistema de armazenagem e o custo da infraestrutura, considerando critérios econômicos como: investimento em construção; despesas com operação e manutenção do sistema; depreciação dos ativos; gastos associados com as perdas de energia no sistema e valor presente dos equipamentos.

8.2 Publicação realizada em periódico

- Artigo "*Fuzzy Set-based Approach for Grid Integration and Operation of Ultra-fast Charging Electric Buses*" publicado no periódico "*International Journal of Electrical Power and Energy Systems*", em Janeiro de 2022 [Rocha et al., 2022].

8.3 Propostas de continuidade

A seguir são apresentados algumas propostas de continuidade do presente trabalho:

- (a) Aperfeiçoar a modelagem do sistema de armazenagem de forma a ser possível avaliar efeitos de profundidade de descarga, temperatura e envelhecimento da bateria e ultracapacitor.
- (b) Incluir variáveis da rede de distribuição no sistema especialista *fuzzy*, tais como medições de demanda e tensão instantânea em pontos de referência.
- (c) Realizar análise de sensibilidade dos fatores de importância das funções objetivos e implantação de cenários dinâmicos para a consideração efetiva das incertezas ao longo do tempo.
- (d) Utilizar a metodologia desenvolvida para realizar a otimização de outras linhas de ônibus que atendem as instalações da Universidade, possibilitando no futuro uma transição tecnológica para os sistemas de mobilidade elétrica.

Referências

- ABB. Abb_factsheeta4_tosa_technology_en.pdf. https://library.e.abb.com/public/ba41f281771a41e3a1da537b42842729/ABB_factsheetA4_TOSA_technology_EN.pdf, 10 2022. (Accessed on 10/01/2022).
- D. Aggeler, F. Canales, H. Zelaya - De La Parra, A. Coccia, N. Butcher, and O. Apeldoorn. Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe*, pages 1–8, 2010. doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638899.
- A. Ahmad, M. S. Alam, and R. Chabaan. A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1):38–63, 2017. ISSN 23327782. doi: 10.1109/TTE.2017.2771619.
- A. Ajanovic. The future of electric vehicles: Prospects and impediments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(6):521–536, 2015. ISSN 2041840X. doi: 10.1002/wene.160.
- M. Al-Saadi, S. Bhattacharyya, P. V. Tichelen, M. Mathes, J. Käsgen, J. Van Mierlo, and M. Bercibar. Impact on the power grid caused via ultra-fast charging technologies of the electric buses fleet. *Energies*, 15(4):1424, 2022.
- Alcazar, Desiree, J. Martinez, and L. Romeral. Model-based design validation and optimization of drive systems in electric, hybrid, plug-in hybrid and fuel cell vehicles. *Energy*, 254:123719, 2022.
- M. Amer, A. Jetter, and T. Daim. Development of fuzzy cognitive map (FCM)-based scenarios for wind energy. *International Journal of Energy Sector Management*, 2011. ISSN 17506220. doi: 10.1108/17506221111186378.
- S. B. Amor, A. Guitouni, and J. M. Martel. A synthesis of Information imperfection representations for decision aid. *Infor*, 53(2):68–77, 2015. ISSN 19160615. doi: 10.3138/infor.53.2.68.
- K. An. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111(January):572–587, 2020. ISSN

- 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2020.01.009. URL <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. *MME*, page 70, 2011.
- ANEEL. Projetos de chamada estratégica - programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica - aneel. https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false, 2018. (Accessed on 04/20/2021).
- C. H. Antunes and L. C. Dias. Managing uncertainty in decision support models. *European Journal of Operational Research*, 181(3):1425–1426, 2007. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2006.03.049.
- J. Arbib and T. Seba. Rethinking Transportation 2020-2030: Disruption, Implications and Choices Rethinking. *Report*, 3(May), 2017.
- M. Ashtiani and M. Abdollahi Azgomi. Trust modeling based on a combination of fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy VIKOR. *Soft Computing*, 20(1):399–421, 2016. ISSN 14337479. doi: 10.1007/s00500-014-1516-1.
- S. Aydin and C. Kahraman. Vehicle selection for public transportation using an integrated multi criteria decision making approach: A case of Ankara. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 26(5):2467–2481, 2014. ISSN 18758967. doi: 10.3233/IFS-130917.
- S. Bai and S. M. Lukic. Unified active filter and energy storage system for an MW electric vehicle charging station. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12):5793–5803, 2013. ISSN 08858993. doi: 10.1109/TPEL.2013.2245146.
- S. Bai, Y. Du, and S. Lukic. Optimum design of an EV/PHEV charging station with DC bus and storage system. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings*, pages 1178–1184, 2010. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617834.
- R. Banuelas and J. Antony. Modified analytic hierarchy process to incorporate uncertainty and managerial aspects. *International Journal of Production Research*, 42(18):3851–3872, 2004. ISSN 00207543. doi: 10.1080/00207540410001699183.
- R. E. Bellman and L. A. Zadeh. Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 17(4):B-141–B-164, 1970. ISSN 0025-1909. doi: 10.1287/mnsc.17.4.B141.
- L. S. Belyaev. A Practical Approach to Choosing Alternative Solutions to Complex Optimization Problems under Uncertainty. *International Institute for Applied Systems Analysis*, 1(January):1–60, 1977.

- BH-Tec. Bh-tec website. <https://www.bhtec.org.br/>, 9 2022. (Accessed on 09/26/2022).
- S. B. . Bhandari. Discounted payback period. *Journal of Financial Education*, 14(14): 1–16, 1985.
- P. Biernat and P. Rumniak. Powertrain system with the ultracapacitor-based auxiliary energy storage for an urban battery electric vehicle. *The Archives of Transport*, XXVII (3), 2013.
- L. H. Björnsson, S. Karlsson, and F. Sprei. Objective functions for plug-in hybrid electric vehicle battery range optimization and possible effects on the vehicle fleet. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86(December 2017):655–669, 2018. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2017.12.009. URL <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.12.009>.
- Bloomberg New Energy Finance. Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2. *IEEE*, page 63, 2018.
- BloombergNEF. 230,000 more e-buses in operation globally by 2025. an outlook on the future from bnep. <https://www.sustainable-bus.com/news/interview-aleksandra-o-donovan-bnep-electric-bus-market/>, 2020. (Accessed on 04/13/2021).
- BNDES. Bndes cria novas condições para compra de ônibus no brasil e exportação de carros. https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/20050923_not245_05, 2021. (Accessed on 05/02/2021).
- A. Bokhari, A. Alkan, R. Dogan, M. Diaz-Aguilo, F. De Leon, D. Czarkowski, Z. Zabar, L. Birenbaum, A. Noel, and R. E. Usef. Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3):1372–1381, 2014. ISSN 08858977. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2285096.
- B. Bouchon-Meunier, M. Rifqi, and S. Bothorel. Towards general measures of comparison of objects. *Fuzzy Sets and Systems*, 84(2):143–153, 1996. ISSN 01650114. doi: 10.1016/0165-0114(96)00067-X.
- J. E. Brittain. Thevéin’s theorem, 1990. ISSN 00189235.
- H. I. Brown. *Three revolutions?* IEEE, 2010. ISBN 9781610919067. doi: 10.1007/s11016-010-9404-5.
- M. Bucciarelli, S. Paoletti, and A. Vicino. Optimal sizing of energy storage systems under uncertain demand and generation. *Applied Energy*, 225(November 2017):611–621, 2018.

- ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.153. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.153>.
- G. Büyüközkan. Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58:186–207, 2018. ISSN 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.12.005.
- A. C. S. M. Campos, B. Mareschal, and A. T. De Almeida. Fuzzy FlowSort: An integration of the FlowSort method and Fuzzy Set Theory for decision making on the basis of inaccurate quantitative data. *Information Sciences*, 293:115–124, 2015. ISSN 00200255. doi: 10.1016/j.ins.2014.09.024. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.09.024>.
- J. Cao and A. Emadi. A new battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, pages 941–946, 2009. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289744.
- S. Caux, W. Hankache, M. Fadel, and D. Hissel. On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5):2134–2143, 2010. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.108. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.108>.
- Cemig. Valores de tarifas e serviços – cemig. <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>, 2021. (Accessed on 05/02/2021).
- C. C. Chan. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4):704–718, 2007. ISSN 00189219. doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- Z. Chen and W. Yang. A new multiple attribute group decision making method in intuitionistic fuzzy setting. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9):4424–4437, 2011. ISSN 0307904X. doi: 10.1016/j.apm.2011.03.015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.03.015>.
- Z. Chen, Y. Yin, and Z. Song. A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93(April):351–366, 2018. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2018.06.006. URL <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.006>.
- L. C. Cheng. The Hazards of Using IRR to Measure Performance: The Case of Private Equity. *CFA Digest*, 39(2):64–65, 2009. ISSN 0046-9777. doi: 10.2469/dig.v39.n2.28.

- CNBC. General motors plans to exclusively offer electric vehicles by 2035. <https://www.cnbc.com/2021/01/28/general-motors-plans-to-exclusively-offer-electric-vehicles-by-2035.html>, 2021. (Accessed on 02/21/2021).
- O. Cordon. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 52(6):894–913, 2011. ISSN 0888613X. doi: 10.1016/j.ijar.2011.03.004.
- H. Covington. Investment consequences of the Paris climate agreement*. *Journal of Sustainable Finance and Investment*, 7(1):54–63, 2017. ISSN 20430809. doi: 10.1080/20430795.2016.1196556.
- M. Creutz. Overrelaxation and Monte Carlo simulation. *Physical Review*, 36(2):2–6, 1987.
- R. Crosier, S. Wang, and M. Jamshidi. A 4800-V grid-connected electric vehicle charging station that provides STACOM-APF functions with a bi-directional, multi-level, cascaded converter. *IEEE*, pages 1508–1515, 2012. doi: 10.1109/apec.2012.6166020.
- DailyDiesel. Novo iveco daily. <https://www.ivecodaily.com.br/pages/furgao-55-170.html>, 2021. (Accessed on 05/02/2021).
- M. A. Delucchi, C. Yang, A. F. Burke, J. M. Ogden, K. Kurani, J. Kessler, and D. Sperling. An assessment of electric vehicles: Technology, infrastructure requirements, greenhouse-gas emissions, petroleum use, material use, lifetime cost, consumer acceptance and policy initiatives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2006), 2014. ISSN 1364503X. doi: 10.1098/rsta.2012.0325.
- A. P. Dempster. The Dempster-Shafer calculus for statisticians. *International Journal of Approximate Reasoning*, 48(2):365–377, 2008. ISSN 0888613X. doi: 10.1016/j.ijar.2007.03.004.
- X. Deng and Y. Yao. Decision-theoretic three-way approximations of fuzzy sets. *Information Sciences*, 279:702–715, 2014. ISSN 00200255. doi: 10.1016/j.ins.2014.04.022. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.022>.
- D. Dhouib. An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega (United Kingdom)*, 42(1):25–32, 2014. ISSN 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2013.02.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>.
- C. Driver. Here are all the promises carmakers have made about electric cars. <https://www.caranddriver.com/news/g35562831/ev-plans-automakers-timeline/>, 2021. (Accessed on 04/29/2021).

- R. C. Dugan. Reference Guide The Open Distribution System Simulator(OpenDSS). *IEEE*, pages 1–184, 2016.
- R. C. Dugan and T. E. McDermott. An open source platform for collaborating on smart grid research. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–7, 2011. ISSN 19449925. doi: 10.1109/PES.2011.6039829.
- Durbach and Stewart. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 223(1):1–14, 2012. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2012.04.038.
- D. Efthymiou, K. Chrysostomou, M. Morfoulaki, and G. Aifantopoulou. Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach. *European Transport Research Review*, 9(2), 2017. ISSN 18668887. doi: 10.1007/s12544-017-0239-7.
- Ekel, Pedrycz, and Schinzinger. A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 97(1):49–66, 1998. ISSN 01650114. doi: 10.1016/S0165-0114(96)00334-X.
- Ekel, L. D. B. Terra, M. F. Junges, F. J. De Oliveira, A. Melek, and T. Y. Taguti. Fuzzy logic in voltage and reactive power control in regulated and deregulated environments. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 1(C):85–90, 2001. doi: 10.1109/tdc.2001.971213.
- Ekel, M. Menezes, and F. H. Neto. Decision making in a fuzzy environment and its application to multicriteria power engineering problems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 1(4):527–536, 2007. ISSN 1751570X. doi: 10.1016/j.nahs.2006.04.005.
- Ekel, I. Kokshenev, R. Palhares, R. Parreiras, and F. Schuffner Neto. Multicriteria analysis based on constructing payoff matrices and applying methods of decision making in fuzzy environment. *Optimization and Engineering*, 12(1-2):5–29, 2011. ISSN 13894420. doi: 10.1007/s11081-010-9108-0.
- Ekel, I. Kokshenev, R. Parreiras, W. Pedrycz, and J. Pereira. Multiobjective and multiattribute decision making in a fuzzy environment and their power engineering applications. *Information Sciences*, 361-362:100–119, 2016. ISSN 00200255. doi: 10.1016/j.ins.2016.04.030.
- P. Ekel. Fuzzy sets and models of decision making. *Computers and Mathematics with Applications*, 44(7):863–875, 2002. ISSN 08981221. doi: 10.1016/S0898-1221(02)00199-2. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122102001992>.
- P. Ekel, M. Junges, I. Kokshenev, and R. Parreiras. Sensitivity and functionally oriented models for power system planning, operation, and control. *International Journal of*

- Electrical Power and Energy Systems*, 45(1):489–500, 2013. ISSN 01420615. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.09.022. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.022>.
- P. Y. Ekel. Methods of decision making in fuzzy environment and their applications. *Nonlinear Analysis*, 47:979–990, 2001.
- P. Y. Ekel and E. A. Galperin. Box-Triangular Multiobjective Linear Programs for Resource Allocation with Application to Load Management and Energy Market Problems. *PERGAMON Mathematical and Computer Modelling*, 37(522916):1–17, 2003. ISSN 08957177. doi: 10.1016/S0895-7177(03)80001-8.
- P. Y. Ekel, L. D. B. Terra, M. F. D. Junges, A. V. Prakhovnik, and O. V. Razumovsky. Multicriteria load management in power systems. *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Proceedings*, pages 167–172, 2000. doi: Doi10.1109/Drpt.2000.855658.
- P. Y. Ekel, C. A. P. S. Martins, J. G. Pereira, R. M. Palhares, and L. N. Canha. Fuzzy set based multiobjective allocation of resources and its applications. *Computers and Mathematics with Applications*, 52(1-2):197–210, 2006. ISSN 08981221. doi: 10.1016/j.camwa.2006.08.013.
- P. Y. Ekel, J. S. C. Martini, and R. M. Palhares. Multicriteria analysis in decision making under information uncertainty. *Applied Mathematics and Computation*, 200(2):501–516, 2008. ISSN 00963003. doi: 10.1016/j.amc.2007.11.024.
- S. E. Elmaghraby and W. S. Herroelen. The scheduling of activities to maximize the net present value of projects. *European Journal of Operational Research*, 49(1):35–49, 1990. ISSN 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(90)90118-U.
- T. Ferreira. Sistema de gerenciamento de energia para controle de carga/descarga entre baterias de lítio e ultracapacitores, envolvendo sistema de tração elétrica com frenagem regenerativa. *Aleph*, page 193 f. : il., 2014.
- B. G. Ferrin and R. E. Plank. Total cost of ownership models: An exploratory study. *Journal of Supply Chain Management*, 38(2):18–29, 2002. ISSN 1745493X. doi: 10.1111/j.1745-493X.2002.tb00132.x.
- J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott. *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer, Boston, 2005.
- C. Fleischer, W. Waag, H. M. Heyn, and D. U. Sauer. On-line adaptive battery impedance parameter and state estimation considering physical principles in reduced order equivalent circuit battery models: Part 1. Requirements, critical review of methods and modeling. *Journal of Power Sources*, 260:276–291, 2014. ISSN 03787753. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.129. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.129>.

- M. Fries, M. Kerler, S. Rohr, S. Schickram, M. Sinning, R. Kochhan, S. Fuchs, B. Reuter, P. Burda, S. Matz, and M. Lienkamp. An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017. *Researchgate*, pages 1–9, 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.19963.21285.
- M. Gallet, T. Massier, and T. Hamacher. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Applied Energy*, 230(January):344–356, 2018. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.086. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>.
- L. Gao, S. Liu, R. A. Dougal, and S. Member. Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation. *IEEE*, 25(3):495–505, 2002.
- Z. Gao, Z. Lin, T. J. LaClair, C. Liu, J. M. Li, A. K. Birky, and J. Ward. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122:588–600, 2017. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.101. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>.
- P. H. Garthwaite, J. B. Kadane, and A. O’Hagan. Statistical methods for eliciting probability distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 100(470): 680–701, 2005. ISSN 01621459. doi: 10.1198/016214505000000105.
- A. Geno. Fast charge and local public transport: an italian experience. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015.
- H. Gervásio and L. Simões Da Silva. A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications*, 39(8): 7121–7131, 2012. ISSN 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2012.01.032.
- D. Goehlich, F. Spangenberg, and A. Kunith. Stochastic total cost of ownership forecasting for innovative urban transport systems. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pages 838–842, 2014. ISSN 2157362X. doi: 10.1109/IEEM.2013.6962529.
- D. Göhlich, A. Kunith, and T. Ly. Technology assessment of an electric urban bus system for berlin. *WIT Transactions on the Built Environment*, 138:137–149, 2014. ISSN 17433509. doi: 10.2495/UT140121.
- R. González, A. Arguello, G. Valverde, and J. Quirós-Tortós. OpenDSS-based distribution network analyzer in open source GIS environment. *2016 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition-Latin America, PES T and D-LA 2016*, 2017. doi: 10.1109/TDC-LA.2016.7805643.
- P. Goodwin and G. Wright. *Decision analysis for management judgement* john wiley & sons, 1991.

- M. Guarnieri. Looking back to electric cars. *3rd Region-8 IEEE HISTory of Electro - Technology CONFerence: The Origins of Electrotechnologies, HISTELCON 2012 - Conference Proceedings*, 2012. doi: 10.1109/HISTELCON.2012.6487583.
- S. Güner. Measuring the quality of public transportation systems and ranking the bus transit routes using multi-criteria decision making techniques. *Case Studies on Transport Policy*, 6(2):214–224, 2018. ISSN 22136258. doi: 10.1016/j.cstp.2018.05.005. URL <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.05.005>.
- M. Guo, J. B. Yang, K. S. Chin, and H. Wang. Evidential reasoning based preference programming for multiple attribute decision analysis under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 182(3):1294–1312, 2007. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2006.09.064.
- S. Guo and H. Zhao. Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, 158:390–402, 2015. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.082. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.082>.
- M. Hamurcu and T. Eren. Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7), 2020. ISSN 20711050. doi: 10.3390/su12072777.
- J. Hanlin, D. Reddaway, and J. Lane. *TCRP Synthesis 130*. IEEE, 2018. ISBN 9780309390170. doi: 10.17226/25061.
- D. Hart. *Power Electronics*. McGraw-Hill Education, 1985. ISBN 9780073380674.
- A. Hatami-Marbini and M. Tavana. An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment. *Omega*, 39(4):373–386, 2011. ISSN 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2010.09.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2010.09.001>.
- H. He, R. Xiong, and J. Fan. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *IEEE*, pages 582–598, 2011. doi: 10.3390/en4040582.
- Y. He, Z. Song, and Z. Liu. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. *Sustainable Cities and Society*, 48 (April), 2019. ISSN 22106707. doi: 10.1016/j.scs.2019.101530.
- S. L. Ho, J. Wang, W. N. Fu, and M. Sun. A comparative study between novel witricity and traditional inductive magnetic coupling in wireless charging. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5):1522–1525, 2011. ISSN 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2010.2091495.

- H. Hõimoja, A. Rufer, G. Dziechciaruk, and A. Vezzini. An ultrafast electric vehicle charging station demonstrator. *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on*, pages 1390–1395, 2012.
- K. G. Høyer. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2):63–71, 2008. ISSN 09571787. doi: 10.1016/j.jup.2007.11.001.
- H.-y. Hsiao, Y.-C. Chan, C.-H. Chiang, and G.-H. Tzeng. Fuzzy AHP and TOPSIS for Selecting Low Pollutant Emission Bus Systems. *28th IAEE International Conference*, pages 1–19, 2005.
- ICCT. Global Transportation Roadmap Model. *Icct*, page 48, 2012. URL <http://www.theicct.org/info/assets/RoadmapV1/ICCTRoadmapModelVersion1-0Documentation.pdf>.
- IEA. Global EV Outlook 2020. *Global EV Outlook 2020*, 2020. doi: 10.1787/9789264302365-en.
- Iveco. Daily electric | iveco. <https://www.iveco.com/en-us/press-room/release/Pages/Iveco-presents-the-New-Daily-Electric.aspx>, 2021. (Accessed on 04/28/2021).
- D. Jefferies and D. Göhlich. A comprehensive TCO evaluation method for electric bus systems based on discrete-event simulation including bus scheduling and charging infrastructure optimisation. *World Electric Vehicle Journal*, 11(3):1–43, 2020. ISSN 20326653. doi: 10.3390/WEVJ11030056.
- Y. Ju and A. Wang. Emergency alternative evaluation under group decision makers: A method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 39(1):1315–1323, 2012. ISSN 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2011.08.012. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.012>.
- J. Justino, T. Parreiras, and B. Cardoso. Hundreds kW Charging Stations for e-Buses Operating under Regular Ultra-Fast Charging. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2):1766–1774, 2016. ISSN 00939994. doi: 10.1109/TIA.2015.2495279.
- J. C. G. Justino, L. A. R. Silva, A. Rocha, and B. D. J. C. Filho. Aspects of the operation of regular ultra fast charging e-bus in high grade BRT routes. *Proc. IEEE 40th Annu. Conf. Ind. Electron. Soc. (IECON)*, pages 3101–3107, 2014.
- D. Kahneman and A. Tversky. Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3(3):430–454, 1972. ISSN 00100285. doi: 10.1016/0010-0285(72)90016-3.

- R. Kee and B. Bublitz. The Role of Payback in the Investment Process. *Accounting and Business Research*, 18(70):149–155, 1988. ISSN 21594260. doi: 10.1080/00014788.1988.9729360.
- A. Khaligh and Z. Li. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6):2806–2814, 2010. ISSN 00189545. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
- D. Kucevic, C. N. Truong, A. Jossen, and H. C. Hesse. Lithium-ion battery storage design for buffering fast charging stations for battery electric vehicles and electric buses. *NEIS 2018 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, pages 150–155, 2020.
- A. Kunith, R. Mendeleevitch, and D. Goehlich. Electrification of a City Bus Network: An Optimization Model for Cost-Effective Placing of Charging Infrastructure and Battery Sizing of Fast Charging Electric Bus Systems. *SSRN Electronic Journal*, 2017. doi: 10.2139/ssrn.2782417.
- R. Lahdelma, J. Hokkanen, and P. Salminen. SMAA - Stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1):137–143, 1998. ISSN 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(97)00163-X.
- A. Lajunen. Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of Cleaner Production*, 172:56–67, 2018. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.066. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>.
- P. B. Lanjewar, R. V. Rao, and A. V. Kale. Assessment of alternative fuels for transportation using a hybrid graph theory and analytic hierarchy process method. *Fuel*, 154:9–16, 2015. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.062. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.062>.
- A. B. Laurent, S. Vallerand, Y. van der Meer, and S. D’Amours. CarbonRoadMap: A multicriteria decision tool for multimodal transportation. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(3):205–214, 2020. ISSN 15568334. doi: 10.1080/15568318.2018.1540734. URL <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1540734>.
- F. Lefley. The payback method of investment appraisal: A review and synthesis. *International Journal of Production Economics*, 44(3):207–224, 1996. ISSN 09255273. doi: 10.1016/0925-5273(96)00022-9.

- L. Lei, L. Zhao, J. Dan, and N. Huichang. Overcharge induced thermal runaway behaviors of pouch-type lithium-ion batteries with lfp and ncm cathodes: the differences and reasons. *Energy Storage Science and Technology*, 11(5):1419, 2022.
- G. Li and X. P. Zhang. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):492–499, 2012. ISSN 19493053. doi: 10.1109/TSG.2011.2172643.
- M. Li and P. Vitányi. *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*. Springer, 1993. ISBN 9783030112974. doi: 10.1007/978-1-4757-3860-5.
- Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, and J. Huang. Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 43(1):514–525, 2012. ISSN 01420615. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.026.
- Y. Li, B. Feng, G. Li, J. Qi, D. Zhao, and Y. Mu. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage. *Applied Energy*, 210(April):1073–1081, 2018. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.008>.
- Licarco. Lithium-ion battery cell types, lfp, nmc cells explained - licarco. <https://www.licarco.com/news/lithium-ion-battery-cell-types-lfp-nmc-cells-explained>, 7 2022. (Accessed on 10/04/2022).
- H.-w. Liu and G.-j. Wang. Multi-criteria decision-making methods based on intuitionistic fuzzy sets. *IEEE*, 179:220–233, 2007. doi: 10.1016/j.ejor.2006.04.009.
- J. Liu, X. Liao, and J. Yang. A group decision-making approach based on evidential reasoning for multiple criteria sorting problem with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 246(3):858–873, 2015. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.027. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.027>.
- J. R. Lohmann and S. N. BAKSH. The irr, npv and payback period and their relative performance in common capital budgeting decision procedures for dealing with risk. *The Engineering Economist*, 39(1):17–47, 1993.
- F. Lolli, A. Ishizaka, R. Gamberini, B. Rimini, A. Maria, F. Simona, and M. Roberto. Waste treatment : an environmental , economic and social analysis with a new group fuzzy PROMETHEE approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016. ISSN 1618-9558. doi: 10.1007/s10098-015-1087-6.

- M. Longo, D. Zaninelli, F. Viola, P. Romano, and R. Miceli. How is the spread of the Electric Vehicles? *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, RTSI 2015 - Proceedings*, pages 439–445, 2015. doi: 10.1109/RTSI.2015.7325137.
- L. L. Lu, Y. Y. Lu, Z. X. Zhu, J. X. Shao, H. B. Yao, S. Wang, T. W. Zhang, Y. Ni, X. X. Wang, and S. H. Yu. Extremely fast-charging lithium ion battery enabled by dual-gradient structure design. *Science Advances*, 8(17):1–9, 2022. ISSN 23752548. doi: 10.1126/sciadv.abm6624.
- R. D. Luce and H. Raiffa. *Games and Decisions*. John Wiley & Sons, New York, 1957.
- M. Ellram. Total cost of ownership: An analysis approach of ownership. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(8):4–23, 1995.
- P. Machura and Q. Li. A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104(January):209–234, 2019. ISSN 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2019.01.027. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.027>.
- C. A. Magni. Investment, financing and the role of ROA and WACC in value creation. *European Journal of Operational Research*, 244(3):855–866, 2015. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.02.010. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.02.010>.
- Mamdani. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1):1–13, 1975. ISSN 00207373. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- Mamdani. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, C-26(12):1182–1191, 1977. ISSN 00189340. doi: 10.1109/TC.1977.1674779.
- F. L. Mapelli, D. Tarsitano, and D. Annese. A study of urban electric bus with a fast charging energy storage system based on lithium battery and supercapacitors . *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013.
- MATLAB. *version 7.10.0 (R2018a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2018.
- Maxwell. hq_48v_ds10162013.pdf. http://www.maxwell.com/images/documents/hq_48v_ds10162013.pdf, 2013. (Accessed on 07/04/2021).
- M. Michalczuk. A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(4 B):158–162, 2012. ISSN 0033-2097.

- M. Michalczuk, B. Ufnalski, and L. Grzesiak. Fuzzy logic control of a hybrid battery-ultracapacitor energy storage for an urban electric vehicle. *2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2013*, pages 1–7, 2013. doi: 10.1109/EVER.2013.6521580.
- M. Michalczuk, B. Ufnalski, and L. M. Grzesiak. Fuzzy logic based power management strategy using topographic data for an electric vehicle with a battery-ultracapacitor energy storage. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 34(1):173–188, 2015. ISSN 03321649. doi: 10.1108/COMPEL-11-2013-0388.
- K. Miettinen. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- J. A. Miles and J. R. Ezzell. The Weighted Average Cost of Capital, Perfect Capital Markets, and Project Life: A Clarification. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 15(3):719, 1980. ISSN 00221090. doi: 10.2307/2330405.
- V. Miranda and L. M. Proença. Probabilistic Choise Vs. Risk Analysis - Conflicts and Synthesis in Power System Planning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1997.
- Mliu. 1280px-sae_j3105-2_schematic.svg.png (1280×1024). https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/96/SAE_J3105-2_schematic.svg/1280px-SAE_J3105-2_schematic.svg.png, 2020. (Accessed on 04/26/2021).
- A. A. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally, and S. I. Selem. A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Applied Energy*, 262(January): 114584, 2020. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114584. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114584>.
- M. Mohamed, H. Farag, N. El-Taweel, and M. Ferguson. Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis. *Electric Power Systems Research*, 142:163–175, 2017. ISSN 03787796. doi: 10.1016/j.epsr.2016.09.032. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.032>.
- D. Montenegro, M. Hernandez, and G. A. Ramos. Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis. *Proceedings of the 2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, T and D-LA 2012*, pages 1–5, 2012. doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319069.
- S. Moslem, O. Ghorbanzadeh, T. Blaschke, and S. Duleba. Analysing Stakeholder Consensus for a Sustainable Transport Development Decision by the Fuzzy AHP and Interval AHP. *Sustainability*, 11(12):3271, 2019. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su11123271.

- S. Mukherjee. Selection of Alternative Fuels for Sustainable Urban Transportation under Multi-criteria Intuitionistic Fuzzy Environment. *Fuzzy Information and Engineering*, 9(1):117–135, 2017. ISSN 16168666. doi: 10.1016/j.fiae.2017.03.006.
- G. Munda, P. Nijkamp, and P. Rietveld. Qualitative multicriteria methods for fuzzy evaluation problems: An illustration of economic-ecological evaluation. *European Journal of Operational Research*, 82(1):79–97, 1995. ISSN 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(93)E0250-2.
- S. Nag and K. Y. Lee. Optimized Fuzzy Logic Controller for Responsive Charging of Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 52(4):147–152, 2019. ISSN 24058963. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.08.170. URL <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.170>.
- M. Narayanan. Observability and the payback criterion. *Journal of Business*, pages 309–323, 1985.
- NRECA. Guides for Electric Cooperative Development and Rural Electrification Electric Distributor of the Hydroelectric Executive Commission of Rio Foundation for Economic Development. *IEEE*, 2010.
- NREL. Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses. *Johnson, Caley and Nobler, Erin and Eudy, Leslie and Jeffers, Matthew and Johnson, Caley and Nobler, Erin and Eudy, Leslie and Jeffers, Matthew*, 2020.
- L. Nurhadi, S. Borén, and H. Ny. A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in swedish medium sized cities. *Transportation Research Procedia*, 3(July):818–827, 2014. ISSN 23521465. doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.058. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.058>.
- N. C. Onat, S. Gumus, M. Kucukvar, and O. Tatari. Application of the TOPSIS and intuitionistic fuzzy set approaches for ranking the life cycle sustainability performance of alternative vehicle technologies. *Sustainable Production and Consumption*, 6(December 2015):12–25, 2016a. ISSN 23525509. doi: 10.1016/j.spc.2015.12.003.
- N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, and Q. P. Zheng. Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. *Journal of Cleaner Production*, 112:291–307, 2016b. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.021. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.021>.
- O. Ore. Pascal and the Invention of Probability Theory. *The American Mathematical Monthly*, 67(5):409–419, 1960. ISSN 0002-9890. doi: 10.1080/00029890.1960.11989521.

- F. Ortenzi, M. Pasquali, P. P. Prosini, A. Lidozzi, and M. Di Benedetto. Design and validation of ultra-fast charging infrastructures based on supercapacitors for urban public transportation applications. *Energies*, 12(12), 2019. ISSN 19961073. doi: 10.3390/en12122348.
- M. J. Osborne. A resolution to the NPV-IRR debate? *Quarterly Review of Economics and Finance*, 50(2):234–239, 2010a. ISSN 10629769. doi: 10.1016/j.qref.2010.01.002.
- M. J. Osborne. A resolution to the npv–irr debate? *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 50(2):234–239, 2010b.
- A. Ostadi and M. Kazerani. A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10):4449–4460, 2015. ISSN 00189545. doi: 10.1109/TVT.2014.2371912.
- B. Oztaysi, S. Cevik Onar, C. Kahraman, and M. Yavuz. Multi-criteria alternative-fuel technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53:128–148, 2017. ISSN 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.04.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.003>.
- D. Pamucar, M. Iordache, M. Deveci, D. Schitea, and I. Iordache. A new hybrid fuzzy multi-criteria decision methodology model for prioritizing the alternatives of the hydrogen bus development: A case study from romania. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57):29616–29637, 2021.
- P. Pant and R. M. Harrison. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 77:78–97, 2013. ISSN 13522310. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.028. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
- V. Pareto. *Cours d'Économie Politique*. Lousanne Rouge, Lousanne, 1886.
- R. O. Parreiras, P. Y. Ekel, J. S. Martini, and R. M. Palhares. A flexible consensus scheme for multicriteria group decision making under linguistic assessments. *Information Sciences*, 180(7):1075–1089, 2010. ISSN 00200255. doi: 10.1016/j.ins.2009.11.046. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2009.11.046>.
- A. Patil, P. Herder, and K. Brown. Investment Decision Making for Alternative Fuel Public Transport Buses: The Case of Brisbane Transport. *Journal of Public Transportation*, 13(2):115–133, 2010. ISSN 1077-291X. doi: 10.5038/2375-0901.13.2.6.
- A. A. Pavlovskii, K. Pushnitsa, A. Kosenko, P. Novikov, and A. A. Popovich. A minireview on the regeneration of ncm cathode material directly from spent lithium-ion batteries with different cathode chemistries. *Inorganics*, 10(9):141, 2022.

- Pedrycz, Ekel, and Parreiras. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications. In *Wiley*, page 350. Springer, 2011. ISBN 9780387768120. doi: 10.1007/978-0-387-76813-7.
- W. Pedrycz. An identification algorithm in fuzzy relational systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 13(2):153–167, 1984. ISSN 01650114. doi: 10.1016/0165-0114(84)90015-0.
- R. Pelissari, M. C. Oliveira, A. J. Abackerli, S. Ben-Amor, and M. R. P. Assumpção. Techniques to model uncertain input data of multi-criteria decision-making problems: a literature review. *International Transactions in Operational Research*, 28(2):523–559, 2021. ISSN 14753995. doi: 10.1111/itor.12598.
- S. Pelletier, O. Jabali, J. E. Mendoza, and G. Laporte. The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 109(June):174–193, 2019. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2019.10.012. URL <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>.
- J. G. Pereira. Modelos e Métodos de Tomada de Decisões Multiobjetivo em Ambiente com Incertezas e Suas Aplicações. *UFMG*, page 176, 2014.
- J. G. Pereira, P. Y. Ekel, R. M. Palhares, and R. O. Parreiras. On multicriteria decision making under conditions of uncertainty. *Information Sciences*, 324:44–59, 2015. ISSN 00200255. doi: 10.1016/j.ins.2015.06.013. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2015.06.013>.
- D. Peterson, M. Molloy, and S. Urban. Advanced Small Transit Vehicle Technology Study. *Fuel*, 2007.
- M. Petschnig. Innovative alternatives take action - Investigating determinants of alternative fuel vehicle adoption. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 61:68–83, 2014. ISSN 09658564. doi: 10.1016/j.tra.2014.01.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.01.001>.
- D. U. S. Philipp Sinhuber, Werner Rohlf. Conceptual Considerations for Electrification of Public City Buses. *Proc. Emobility-Elect. Power Train (EEPT)*, pages 1–5, 2010. doi: 10.1109/NAPS.2009.5484055.
- M. Pihlatie, S. Kukkonen, T. Halmeaho, V. Karvonen, and N. O. Nylund. Fully electric city buses - The viable option. *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2014*, 1, 2015. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056145.
- Pushevs. Comparison of different ev batteries in 2020 - pushevs. <https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020/>, 3 2022. (Accessed on 10/04/2022).

- Y. Qin, X. Tang, T. Jia, Z. Duan, J. Zhang, Y. Li, and L. Zheng. Noise and vibration suppression in hybrid electric vehicles: State of the art and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124(February):109782, 2020. ISSN 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2020.109782. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109782>.
- D. Qiu, Y. Ye, D. Papadaskalopoulos, and G. Strbac. A Deep Reinforcement Learning Method for Pricing Electric Vehicles with Discrete Charging Levels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5):5901–5912, 2020. ISSN 19399367. doi: 10.1109/TIA.2020.2984614.
- J. Quan, S. Zhao, D. Song, T. Wang, W. He, and G. Li. Comparative life cycle assessment of lfp and ncm batteries including the secondary use and different recycling technologies. *Science of The Total Environment*, 819:153105, 2022.
- P. Radatz, N. Kagan, C. Rocha, J. Smith, and R. C. Dugan. Assessing maximum DG penetration levels in a real distribution feeder by using OpenDSS. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, 2016-December: 71–76, 2016. ISSN 21640610. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783416.
- H. Raiffa. *Decision Analysis*. Addison-Wesley, 1968.
- F. D. Ramalho, Ekel, W. Pedrycz, J. G. Pereira Júnior, and G. L. Soares. Multicriteria decision making under conditions of uncertainty in application to multiobjective allocation of resources. *Information Fusion*, 49(March 2018):249–261, 2019. ISSN 15662535. doi: 10.1016/j.inffus.2018.12.010. URL <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.12.010>.
- S. Rao. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- J. Rezaei and R. Ortt. Multi-criteria supplier segmentation using a fuzzy preference relations based AHP. *European Journal of Operational Research*, 225(1):75–84, 2013. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2012.09.037. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.037>.
- S. P. Rocha, S. M. da Silva, and P. I. Ekel. Fuzzy set-based approach for grid integration and operation of ultra-fast charging electric buses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 138:107919, 2022.
- M. Rogge, S. Wollny, and D. U. Sauer. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport-A feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. *Energies*, 8(5):4587–4606, 2015. ISSN 19961073. doi: 10.3390/en8054587.

- M. Rogge, E. van der Hurk, A. Larsen, and D. U. Sauer. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211(February 2017):282–295, 2018. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.051. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>.
- M. A. Roscher and D. U. Sauer. Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 196(1):331–336, 2011. ISSN 0378-7753. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.06.098. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.098>.
- T. J. Ross. Membership Functions, Fuzzification and Defuzzification. *IEEE*, pages 48–77, 2000. doi: 10.1007/978-3-7908-1859-8_3.
- S. Rothgang, M. Rogge, J. Becker, and D. U. Sauer. Battery design for successful electrification in public transport. *Energies*, 8(7):6715–6737, 2015. ISSN 19961073. doi: 10.3390/en8076715.
- B. Roy. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(8):57–75, 1968. ISSN 0035-3035. doi: 10.1051/ro/196802V100571. URL <http://www.rairo-ro.org/10.1051/ro/196802V100571>.
- SAE. J3105: Electric vehicle power transfer system using conductive automated connection devices - sae international. https://www.sae.org/standards/content/j3105_202001/, 2020. (Accessed on 04/26/2021).
- Sanxing. Sxev-f2-120kw-500v. <http://www.sanxingelectric.com/prodeta.php?id=5aW9ezExNH10aGlzX21zX2FfZW5jcnlwdColJSQkLGQqaHombT9pZD04NjYv>, 2021. (Accessed on 05/02/2021).
- M. T. Sebastiani, R. Luders, and K. V. O. Fonseca. Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(10):2777–2786, 2016. ISSN 15249050. doi: 10.1109/TITS.2016.2525800.
- D. F. Silva, T. P. Abud, P. P. MacHado, M. Z. Fortes, R. S. MacIel, and D. H. Dias. Impact Analysis of Plug-in Electric Vehicle Connected in Real Distribution Network. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5):2239–2245, 2016. ISSN 15480992. doi: 10.1109/TLA.2016.7530419.
- L. M. L. D. Silva, Ekel, D. Vieira, and G. L. Soares. Multiattribute Spatial Decision-Making for Qualitative Information Processing as Applied to the Renewable Energy Generating Sites Prospection. *IEEE Access*, 8:137745–137757, 2020. doi: 10.1109/access.2020.3012098.

- P. Sinhuber, W. Rohlf, and D. U. Sauer. Study on power and energy demand for sizing the energy storage systems for electrified local public transport buses. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2012*, pages 315–320, 2012. doi: 10.1109/VPPC.2012.6422680.
- R. Sioshansi and P. Denholm. Emissions impacts and benefits of plug-in hybrid electric vehicles and vehicle-to-grid services. *Environmental Science and Technology*, 43(4): 1199–1204, 2009. ISSN 0013936X. doi: 10.1021/es802324j.
- P. Slowik, C. Araujo, T. Dallmann, C. Façanha, I. C. o. C. T. (ICCT), D. G. f. I. Z. G. GmbH, and C. E. e. S. Brazil. Ministério da Indústria. International Evaluation of Public Policies for Electromobility in Urban Fleets. *Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente – PROMOB-e*, page 89, 2018.
- P. Smets. Belief functions on real numbers. *International Journal of Approximate Reasoning*, 40(3):181–223, 2005. ISSN 0888613X. doi: 10.1016/j.ijar.2005.04.001.
- M. Smith and J. Castellano. Costs Associated With Non-Residential Electric Vehicle Supply Equipment. *U.S. Department of Energy*, pages 1–43, 2015.
- I. Sobol'. On the systematic search in a hypercube. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 16(5):790–793, 1979.
- S. Sojoudi and S. H. Low. Optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles in smart grids. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–6, 2011. ISSN 19449925. doi: 10.1109/PES.2011.6039236.
- R. L. Spyker. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36(3 PART 1):829–836, 2000. ISSN 00189251. doi: 10.1109/7.869502.
- R. Stephen. Uses, Abuses, and Alternatives to the Net-Present-Value Rule. *Financial Management*, 24(3):96–102, 1995. URL <http://www.jstor.org/stable/3665561?seq=1{#}page{ }scan{ }tab{ }contents>.
- T. Stewart. A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. *Omega*, 20(5-6):569–586, 1992. ISSN 03050483. doi: 10.1016/0305-0483(92)90003-P.
- C. Suarez and W. Martinez. Fast and Ultra-Fast Charging for Battery Electric Vehicles - A Review. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, pages 569–575, 2019. doi: 10.1109/ECCE.2019.8912594.

- T. T. Sugeno. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Fault Diagnosis Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 30(18):693–700, 1985. ISSN 14746670. doi: 10.1016/s1474-6670(17)42481-5.
- C. Sulzberger. An early road warrior. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(3):66–71, 2004. ISSN 15407977. doi: 10.1109/MPAE.2004.1293606.
- X. Sun, M. Ouyang, and H. Hao. Surging lithium price will not impede the electric vehicle boom. *IEEE*, pages 1–5, 2022.
- P. Taylor, R. E. Shrieves, and J. M. W. Jr. The Engineering Economist : A Journal Devoted to the Problems of Capital Investment FREE CASH FLOW (FCF), ECONOMIC VALUE ADDED (EVA TM), AND NET PRESENT VALUE (NPV): A RECONCILIATION OF VARIATIONS OF DISCOUNTED-CASH- FLOW (DCF) VALUATION (FCF), . *IEEE*, pages 37–41, 2012.
- O. Teichert, F. Chang, A. Ongel, and M. Lienkamp. Joint Optimization of Vehicle Battery Pack Capacity and Charging Infrastructure for Electrified Public Bus Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(3):672–682, 2019. doi: 10.1109/TTE.2019.2932700.
- S. Terfloth. Stromabnehmer_ice_3.jpg (3456×2304). https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Stromabnehmer_ICE_3.jpg, 2007. (Accessed on 04/27/2021).
- T. Tervonen and R. Lahdelma. Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 178(2):500–513, 2007. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2005.12.037.
- T. Tervonen, J. R. Figueira, R. Lahdelma, J. A. Dias, and P. Salminen. A stochastic method for robustness analysis in sorting problems. *European Journal of Operational Research*, 192(1):236–242, 2009. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2007.09.008.
- Tesla. Model 3 | tesla. <https://www.tesla.com/model3>, 2021. (Accessed on 07/04/2021).
- D. D. Tran, M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, R. Barrero, J. Van Mierlo, and O. Hegazy. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(xxxx):109596, 2020. ISSN 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2019.109596. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109596>.
- G. H. Tzeng, C. W. Lin, and S. Opricovic. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, 33(11):1373–1383, 2005. ISSN 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2003.12.014.

- UFMG. Ufmg website. <https://ufmg.br/servicos/onibus>, 9 2022a. (Accessed on 09/26/2022).
- A. UFMG. Notícias da ufmg - Ônibus circular interno do campus pampulha ganha novas linhas. <https://www.ufmg.br/online/arquivos/041586.shtml>, 10 2022b. (Accessed on 10/02/2022).
- L. Usai, C. R. Hung, F. Vásquez, M. Windsheimer, O. S. Burheim, and A. H. Strømman. Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts. *Journal of Cleaner Production*, 280(xxxx), 2021. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125086.
- B. Vahdani and H. Hadipour. Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets. *Soft Computing*, 15(3):569–579, 2011. ISSN 14337479. doi: 10.1007/s00500-010-0563-5.
- M. Vasiladiotis, B. Bahrani, N. Burger, and A. Rufer. Modular converter architecture for medium voltage ultra fast EV charging stations: Dual half-bridge-based isolation stage. *2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014*, pages 1386–1393, 2014. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869766.
- W. Walker, P. Harremoës, J. Rotmans, J. van der Sluijs, M. van Asselt, P. Janssen, and M. Kreyer von Krauss. Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1):5–17, 2003. ISSN 1389-5176. doi: 10.1076/iaij.4.1.5.16466.
- C. Wang, S. Nie, R. Xu, P. Li, C. Sun, Y. Yu, and N. Zhang. Analysis on the impact of DG on distribution network reconfiguration. *Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology*, 47(3): 189–194, 2014. ISSN 04932137. doi: 10.11784/tdxbz201206043.
- S. Wang, R. Crosier, and Y. Chu. Investigating the power architectures and circuit topologies for megawatt superfast electric vehicle charging stations with enhanced grid support functionality. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012*, pages 1–8, 2012. doi: 10.1109/IEVC.2012.6183177.
- T. J. Webster. *Managerial Economics: Theory and Practice*. Academic Press, London, 2003.
- H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen, and J. Muhs. A review on inductive charging for electric vehicles. *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2011*, pages 143–147, 2011. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994820.
- J. Wu and C.-H. Zhang. Fuzzy Energy Management Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Based on Driving Cycle Recognition. *IEEE*, 13(7):1159–1167, 2012. doi: 10.1007/s12239.

- W. xiang Li and B. yi Li. An extension of the Promethee II method based on generalized fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*, 37(7):5314–5319, 2010. ISSN 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2010.01.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.01.004>.
- R. Xiong, H. Chen, C. Wang, and F. Sun. Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management. *Journal of Cleaner Production*, 202:1228–1240, 2018. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.134. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.134>.
- M. Xylia, S. Leduc, P. Patrizio, S. Silveira, and F. Kraxner. Developing a dynamic optimization model for electric bus charging infrastructure. *Transportation Research Procedia*, 27:776–783, 2017. ISSN 23521465. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.075. URL <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.075>.
- W. H. Yang, I. Tsukui, E. Izutsu, Y. Kamiya, and Y. Daisho. Design and evaluation of 'Short-range Frequent-charging-type' and 'Night-charging-type' BE bus. *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEEC - ECCE Asia 2017*, pages 1628–1633, 2017. doi: 10.1109/IFEEEC.2017.7992291.
- M. Yavuz, B. Oztaysi, S. Cevik Onar, and C. Kahraman. Multi-criteria evaluation of alternative-fuel vehicles via a hierarchical hesitant fuzzy linguistic model. *Expert Systems with Applications*, 42(5):2835–2848, 2015. ISSN 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2014.11.010. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.010>.
- B. S. Ye and R. L. K. Tiong. Investment Evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(June):227–233, 2000.
- S. Yedla and R. M. Shrestha. Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(8):717–729, 2003. ISSN 09658564. doi: 10.1016/S0965-8564(03)00027-2.
- C. H. Yeh and Y. H. Chang. Modeling subjective evaluation for fuzzy group multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research*, 194(2):464–473, 2009. ISSN 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2007.12.029. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.029>.
- H. Yin, W. Zhou, M. Li, and C. Zhao. An Adaptive Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy on Battery / Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles. *IEEE*, 7782(c):1–12, 2017. doi: 10.1109/TTE.2016.2552721.

- H. Yu, D. Tarsitano, X. Hu, and F. Cheli. Real time energy management strategy for a fast charging electric urban bus powered by hybrid energy storage system. *Energy*, 112:322–331, 2016. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2016.06.084. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.084>.
- L. A. Zadeh. Fuzzy Sets. *Inform. Control*, 8:338–353, 1965.
- L. A. Zadeh. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(1):28–44, 1973. ISSN 21682909. doi: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
- S. Zambrano-Perilla, G. Ramos, and D. Celeita. Modeling and impacts of plug-in electric vehicles in residential distribution systems with coordinated charging schemes. *International Review on Modelling and Simulations*, 9(4):227–237, 2016. ISSN 25331701. doi: 10.15866/iremos.v9i4.9198.
- N. Zhou, N. Liu, J. Zhang, and J. Lei. Multi-objective optimal sizing for battery storage of PV-based microgrid with demand response. *Energies*, 9(8):1–24, 2016. ISSN 19961073. doi: 10.3390/en9080591.
- C. Zopounidis and P. M. Pardalos. *Handbook of Multicriteria Analysis*. Springer, Berlin, 2010.

Apêndice A

Modelagem dinâmica do sistema no Matlab Simulink

A modelagem dinâmica do sistema de mobilidade elétrica realizado no presente trabalho foi realizado no Simulink, que é um ambiente de programação gráfica baseado em Matlab. A ferramenta permite modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos através de uma ferramenta gráfica, composta por diagramas de blocos e um conjunto personalizável de bibliotecas. Nas simulações realizadas, nas quais foram desenvolvidos códigos de otimização e tomada de decisão, a escolha do Simulink foi realizada devido a sua vantagem com relação a possibilidade de integração direta com o ambiente Matlab e a possibilidade de se conduzir simulações programados a partir do *prompt* principal. Nas rotinas de tomada de decisão realizadas, os resultados das simulações dinâmicas foram de fundamental importância para descrever a dependência da alocação das estações de recarga (integração) com um ponto em um espaço geométrico no tempo do sistema especialista *fuzzy* (operação). O detalhamento da modelagem do sistema de mobilidade elétrica, incluindo o ônibus elétrico, sistema de armazenagem e controlador *fuzzy* é descrito a seguir.

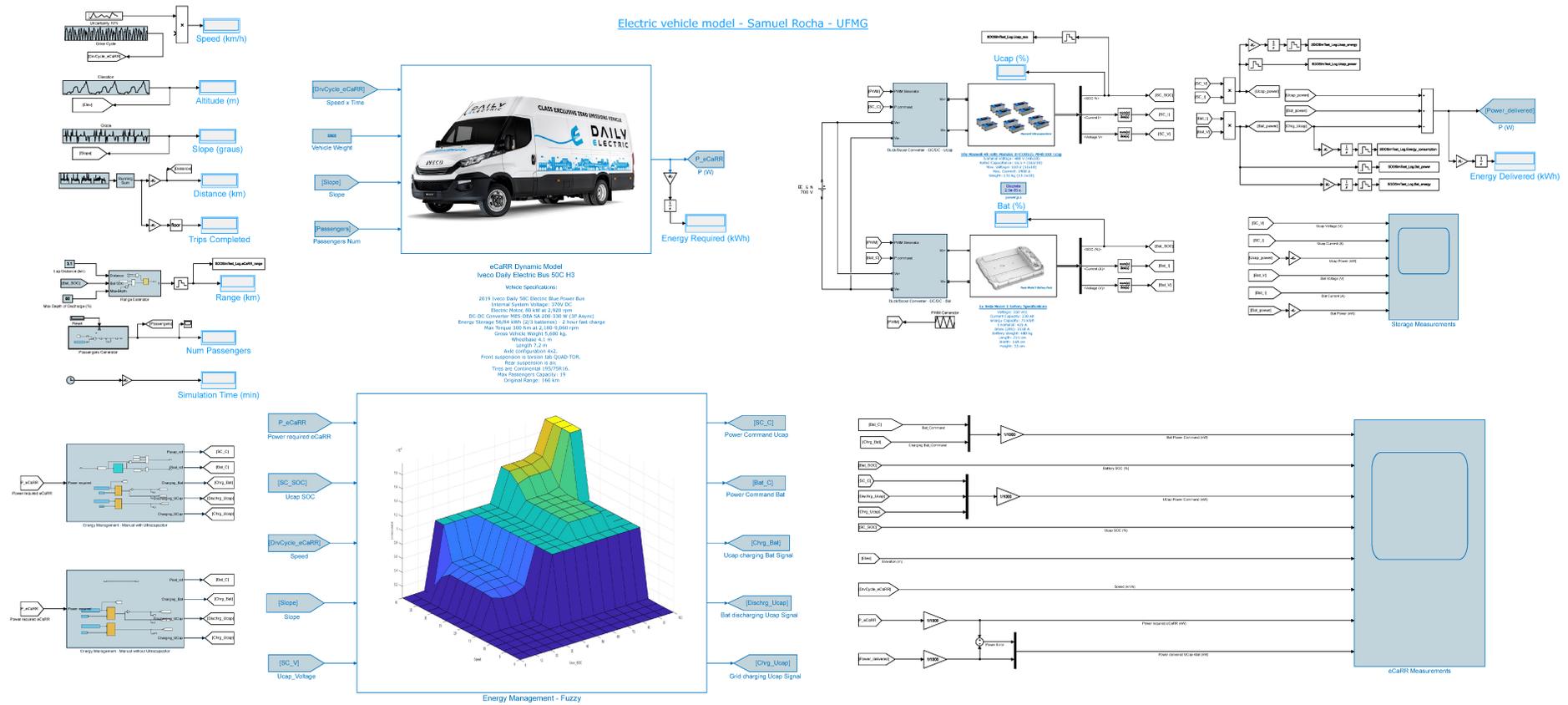
A.1 Sistema de mobilidade elétrica

A modelagem dinâmica do sistema de mobilidade elétrica estudado é composto por três principais componentes principais:

- Sistema dinâmico do ônibus elétrico;
- Sistema de armazenagem;
- Sistema especialista *fuzzy*.

Na figura 55 estes três componentes são mostrados, bem como suas principais interconexões.

Figura 55 – Visão geral da simulação no Matlab Simulink.



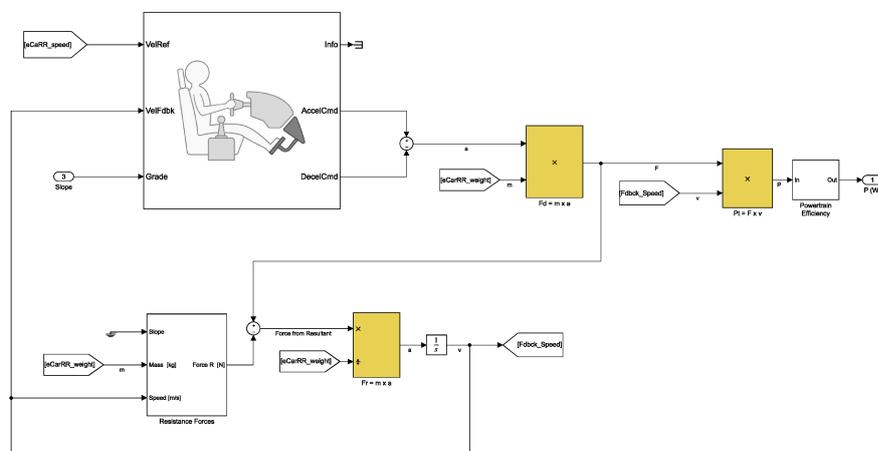
Fonte: Autoria própria.

A.2 Sistema dinâmico do ônibus elétrico

Para realizar a modelagem do ônibus elétrico, foi implementado um bloco de simulação baseado na ferramenta *Longitudinal Driver* do Matlab Simulink. Essa simulação é fundamental para se obter a potência requerida pelo veículo ao longo do trajeto percorrido.

Como entrada do sistema, é necessário o ciclo de condução do veículo, coletado através de experimentos realizados previamente na rota estudada. Para compor o cálculo dinâmico, também foi utilizado a inclinação do terreno percorrido pelo veículo, bem como seu peso e número de passageiros. A interação desses dados é mostrada na figura 56.

Figura 56 – Dinâmica do veículo elétrico.



Fonte: Autoria própria.

Conforme mostrada na figura 56, a implementação dinâmica do veículo é baseada em um controlador de rastreamento de velocidade longitudinal. O funcionamento básico do sistema é baseado na geração de comandos de aceleração e frenagem normalizados que podem variar de 0 a 1, levando em conta as referências de velocidades e *feedback* previamente alimentados no sistema.

Na presente simulação, o bloco *Longitudinal Driver* foi utilizado para modelar a resposta dinâmica de um motorista ao longo do trajeto estudado, bem como gerar os comandos necessários de potência requerida para o sistema especialista *fuzzy*.

Para as simulações, foi considerado um ônibus elétrico da marca Iveco Daily, modelo 50C com capacidade para 19 passageiros, que originalmente possui sistema de armazenagem de 56/84 kWh (2 ou 3 baterias). O ônibus possui torque máximo de 300 Nm a 2180-9060 rpm, pesando 5600 kg e seu motor possui potência máxima de 80 kW. Detalhes do ônibus e sua modelagem são mostrados na figura 57

Figura 57 – Visão da modelagem do ônibus elétrico.



eCaRR Dynamic Model
Iveco Daily Electric Bus 50C H3

Vehicle Specifications:

2019 Iveco Daily 50C Electric Blue Power Bus
 Internal System Voltage: 370V DC
 Electric Motor, 80 kW at 2,920 rpm
 DC-DC Converter MES-DEA SA 200-330 W (3P Async)
 Energy Storage 56/84 kWh (2/3 batteries) - 2 hour fast charge
 Max Torque 300 Nm at 2,180-9,060 rpm
 Gross Vehicle Weight 5,600 kg.
 Wheelbase 4.1 m
 Length 7.2 m
 Axle configuration 4x2.
 Front suspension is torsion tab QUAD-TOR.
 Rear suspension is air.
 Tires are Continental 195/75R16.
 Max Passengers Capacity: 19
 Original Range: 160 km

Fonte: Autoria própria.

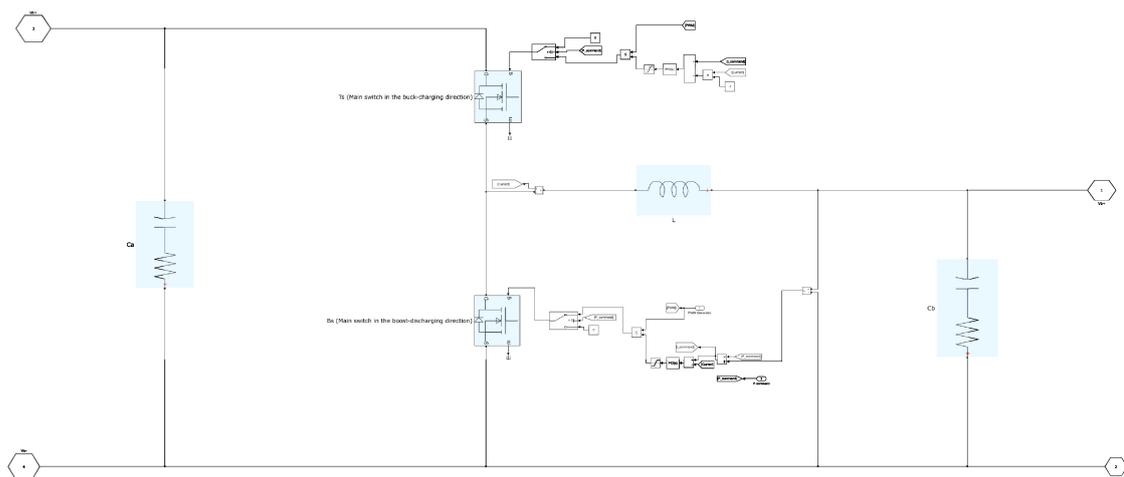
A.3 Sistema de armazenagem

Para a implementação do sistema de armazenagem no Matlab Simulink, utilizou-se o bloco de bateria e ultracapacitor, representados através de um modelo dinâmico nativos do *software*.

É importante ressaltar que o modelo utilizado, apesar de ser nativo da biblioteca, possui a possibilidade de parametrização do circuito equivalente, que permitiu a representação do tipo específico de bateria e ultracapacitores que foram utilizados, bem como suas características de carga e descarga.

Para realizar a hibridização do ultracapacitor com a bateria, foi necessário a implementação de um conversor de potência *Buck/ Boost* bidirecional, conforme mostrado na figura 58.

Figura 58 – Modelagem do conversor de potência c.c./c.c. bidirecional



Fonte: Autoria própria.

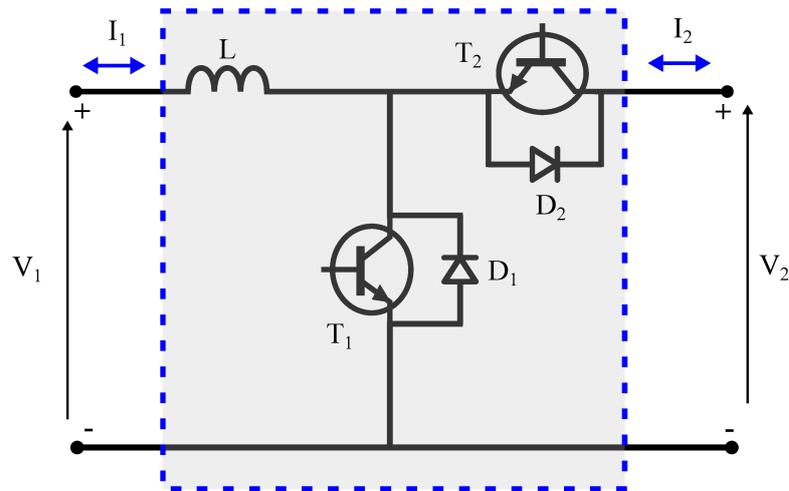
Para garantir a funcionalidade adequada de carga e descarga do sistema de armazenagem, o sistema de gerenciamento energético do veículo é composto por dois conversores cc./cc. bidirecionais [Hart, 1985].

Os conversores cc./cc. bidirecionais abrangem circuitos constituídos por semicondutores ativos (transistores), passivos (diodos) e por elementos armazenadores de energia, como indutores e capacitores.

Seu papel principal fundamenta-se no ajuste de níveis de tensão entre os terminais de entrada e saída possibilitando o fluxo de corrente em dois sentidos, não havendo a mudança da polaridade das tensões.

A figura 59 representa sua composição principal, onde se constata a presença de quatro semicondutores e de um indutor.

Figura 59 – Conversor c.c./c.c. bidirecional básico.



Fonte: Adaptado de Ferreira [2014]

Pode-se observar que o conversor bidirecional é constituído pelo conversor elevador (*boost*) e pelo conversor abaixador (*buck*). Isso possibilita o desempenho de ambas as operações, porém o acionamento dos transistores deve acontecer de modo controlado, para não provocar a condução de T_1 e T_2 no mesmo instante, ocasionando a queima dos componentes.

O duplo sentido das setas indicadoras das correntes I_1 e I_2 destaca a capacidade do fluxo de energia em ambos os sentidos, conferindo a operação em dois quadrantes, a saber, no primeiro e no quarto. Caso haja a necessidade de transferência de energia da fonte V_1 para a fonte V_2 o mesmo deverá operar como elevador e, caso contrário, como abaixador.

A tabela 25 apresenta quais semicondutores atuam em cada uma das operações possíveis juntamente com o sentido das correntes, admitindo-se como positivo o fluxo de energia de V_1 para V_2 . As fases de funcionamento em um período completo de chaveamento para a operação como abaixador e elevador são exploradas a seguir, considerando-se o modo de condução contínuo.

Tabela 25 – Características operacionais do conversor bidirecional básico.

Modo	Sinal das correntes	Semicondutores ativos
<i>Boost</i>	$I_1(+), I_2(+)$	T_1, D_2
<i>Buck</i>	$I_1(-), I_2(-)$	T_2, D_1

Fonte: Adaptado de Ferreira [2014]

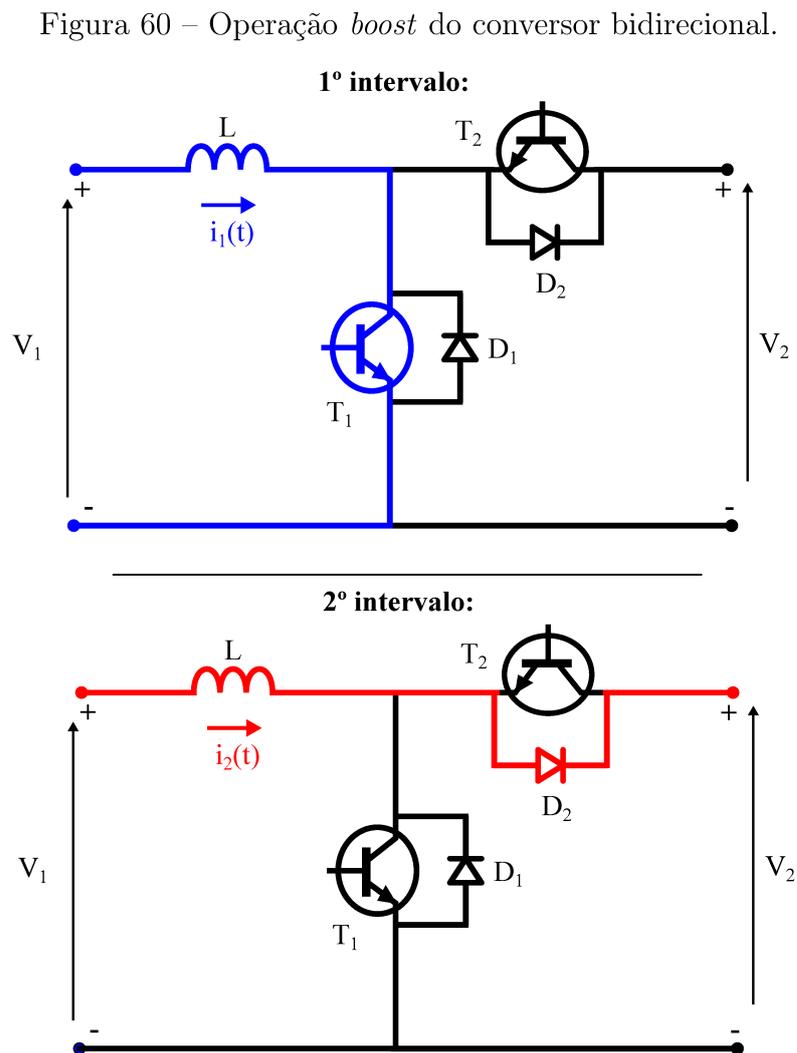
- Operação como elevador (*boost*):

O conversor bidirecional irá operar como elevador quando o transistor T_1 receber

pulsos retangulares (idealmente) aplicados ao terminal do “*gate*”, onde o período em nível alto corresponde ao tempo de condução.

Nesse momento a energia da fonte V_1 é armazenada no indutor L por meio de um campo magnético. No instante em que o pulso comuta para nível baixo, o transistor é bloqueado e a corrente segue para a fonte V_2 por meio da condução de D_2 .

A figura 60 mostra em destaque o caminho por ela percorrido em cada intervalo, onde o 1° e o 2° referem-se aos instantes de condução do transistor e do diodo, respectivamente.



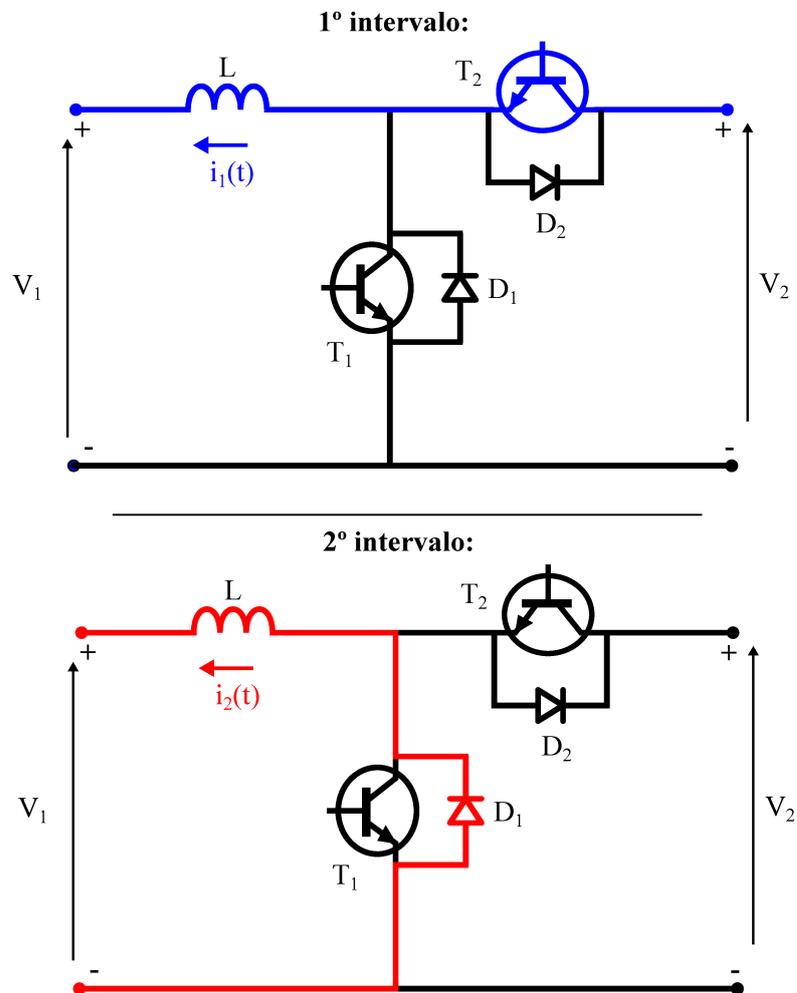
Fonte: Adaptado de Ferreira [2014]

- Operação como abaixador (*buck*):

O conversor bidirecional irá trabalhar como abaixador quando o transistor T_1 entrar em operação, de forma semelhante ao que foi apresentado antes para o T_2 . No momento em que o pulso está em nível alto (1° intervalo) o transistor conduz, enviando energia da fonte V_2 para a fonte V_1 , onde uma parcela fica armazenada no campo magnético do indutor L . No 2° intervalo o pulso está em nível baixo e,

nesse momento, a corrente circula pelo diodo D_1 (roda livre). A figura 61 mostra em destaque o caminho por ela percorrido, bem como os elementos ativos em cada intervalo.

Figura 61 – Operação *buck* do conversor bidirecional.



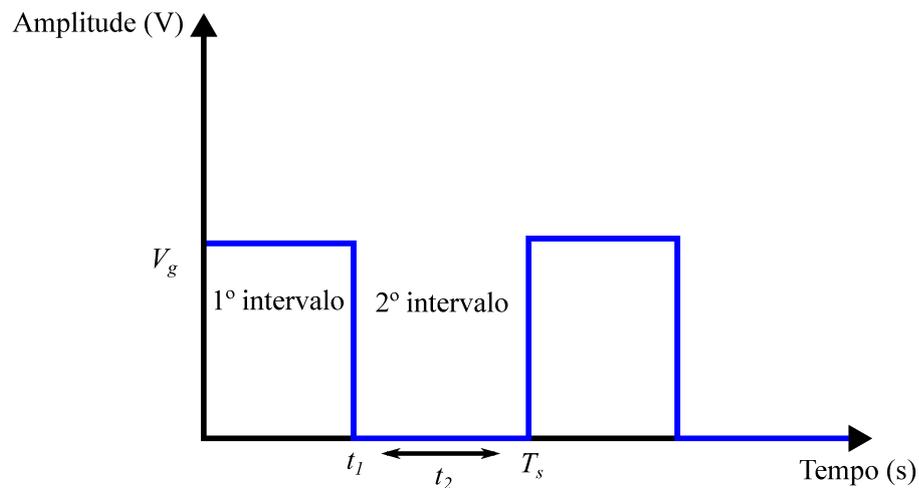
Fonte: Adaptado de [Ferreira \[2014\]](#)

A metodologia de ativação dos transistores é baseada na modulação de pulsos denominada de PWM (*Pulse Width Modulation*) ou modulação por largura de pulso. Nesta metodologia, um sinal de frequência fixa e período ativo variável possibilita a operação do conversor cc./cc e o controle da tensão de saída, da corrente no indutor e da potência entregue à carga.

O comportamento característico do sinal aplicado ao gate do transistor é apresentado na figura 62, onde são representados o 1º e 2º intervalos de modulação.

No 1º intervalo o sinal apresenta amplitude V_g , que é considerado o valor de tensão que garante a saturação do transistor. O período de tempo em que o pulso continua ativo é indicado por t_1 , e o período inativo é indicado por t_2 , que corresponde à diferença entre T_s e t_1 .

Figura 62 – Modulação por largura de pulso (PWM).



Fonte: Adaptado de [Ferreira \[2014\]](#)

Na modulação PWM existe um parâmetro denominado razão cíclica (D) relativo à razão entre o tempo do primeiro intervalo e o período de chaveamento, mostrado na equação (A.1).

$$D = \frac{t_1}{T_s} \leftrightarrow t_1 = DT_s \quad (\text{A.1})$$

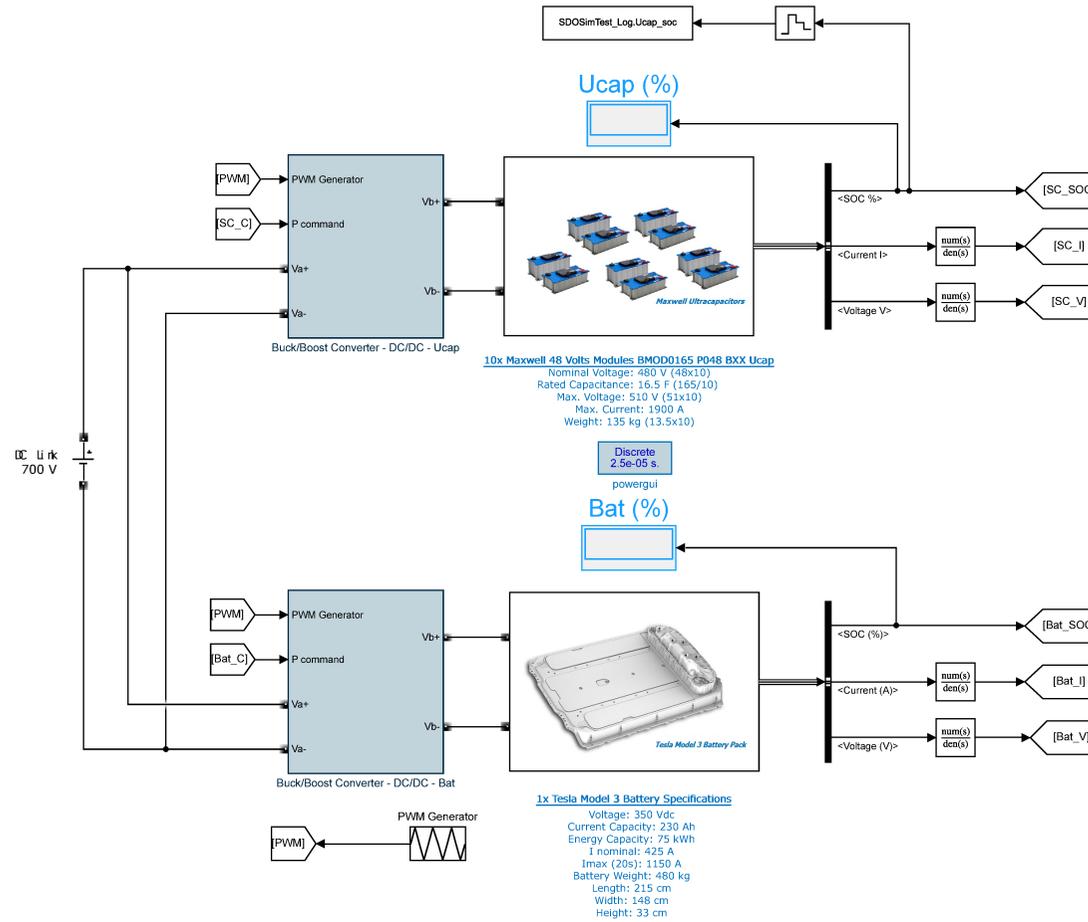
O intervalo t_2 , no qual o transistor estará bloqueado, relaciona-se com D e T_s de acordo com a equação (A.2).

$$t_2 = T_s - t_1 = T_s - DT_s = (1 - D)T_s + D'T_s \quad (\text{A.2})$$

Os parâmetros D e D' realizam a correlação entre as tensões e correntes nos terminais de entrada e saída, além de permitir a visualização do comportamento do conversor em qualquer condição de operação, desde a análise dos esforços nos semicondutores até a estimativa do rendimento. Na figura 58 é possível observar que o sistema de armazenagem é conectado ao conversor de potência bidirecional, associado à um barramento de corrente contínua que irá fazer a interface com o sistema de tração do veículo.

Além de realizar o processo de carga e descarga do sistema de armazenagem, na simulação realizada o conversor c.c./c.c. foi implementado com o objetivo também de realizar a manutenção da tensão de carga constante ao se realizar a extração de energia do ultracapacitor. Esse controle de tensão é fundamental, pois no momento de descarga do sistema de armazenamento para a carga (motor elétrico do veículo), a tensão do ultracapacitor naturalmente irá cair, sendo necessário um controle por parte do conversor de potência para gerenciar essa transferência de carga. Uma visão geral dessa integração, é apresentada na figura 63.

Figura 63 – Visão da modelagem do sistema de armazenagem



Fonte: Autoria própria.

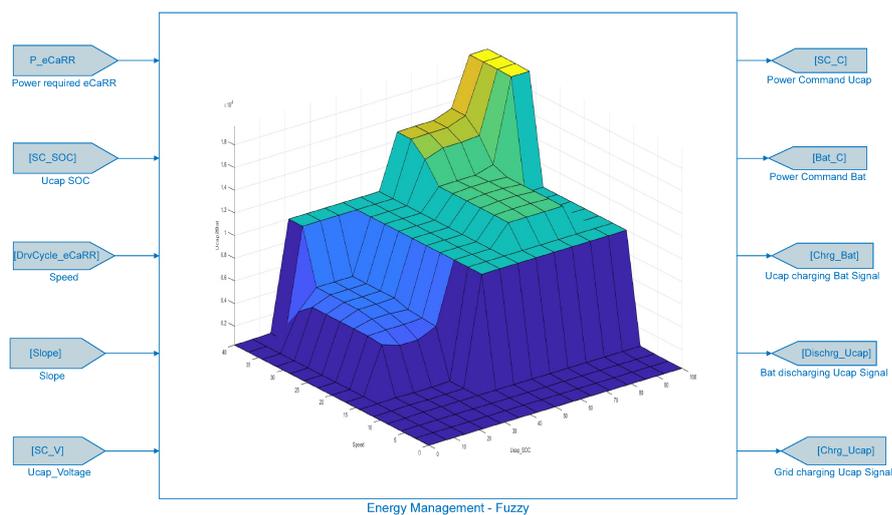
A.4 Sistema especialista *fuzzy*

Finalmente, a modelagem do sistema *fuzzy* foi realizada com o auxílio de linhas de comando no Matlab, juntamente com o *Fuzzy Logic Toolbox*, que fornece funções nativas para análise e simulação de sistemas de controle.

Conforme apresentado no Capítulo 4, o objetivo da implementação do controlador é realizar o gerenciamento energético do sistema de armazenagem, através do de modelos e métodos de inferência *fuzzy*.

O sistema dinâmico do veículo, bem como o processo de carga e descarga do ultracapacitor e baterias possuem comportamentos complexos, que puderam ser refletidos através de regras lógicas simples implementadas, conforme as entradas e saídas mostradas na figura 64.

Figura 64 – Visão da modelagem do sistema especialista *fuzzy*.



Fonte: Autoria própria.

Para alimentação do modelo, utilizou-se a potência requerida pelo veículo elétrico, conjuntamente com a tensão e estado energético do ultracapacitor, a velocidade do ônibus e a inclinação do trajeto. Como saída do sistema, tem-se os comandos de potência para a bateria e ultracapacitores, que serão processados pelos conversores de potência modelados anteriormente.

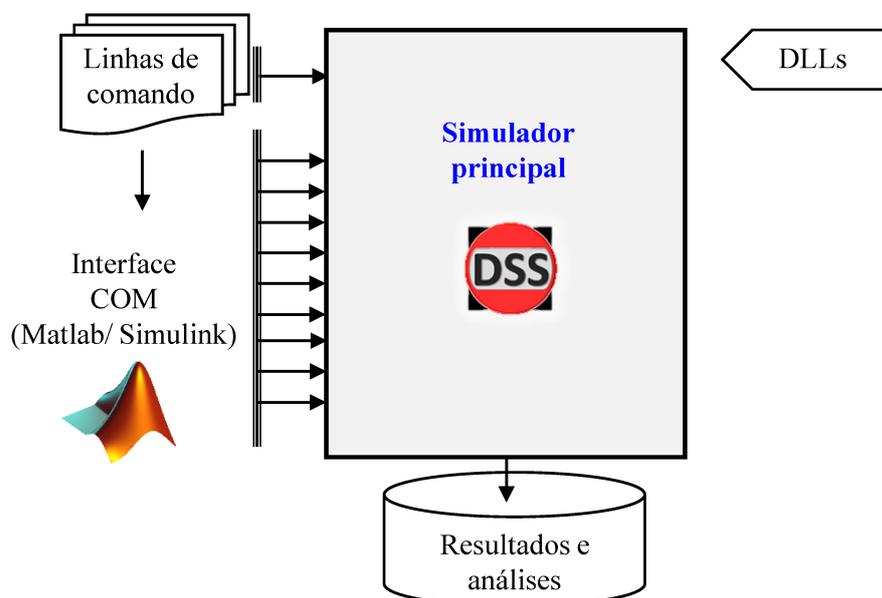
É importante ressaltar que trata-se de uma simulação temporal, ou seja, a cada momento, o sistema dinâmico possui um estado dado por um vetor de valores reais, correspondente a potência a ser carregada/descarregada pelo sistema de armazenagem, que foi representado por um ponto no espaço de estado do controlador. A regra de evolução do controle *fuzzy* implementado é uma função que descreve quais estados futuros seguem do estado atual, ou seja, cada comando de potência é na verdade uma referência diferencial do comando anterior.

Apêndice B

Modelagem dos elementos da rede no OpenDSS

Os elementos de rede são modelados e programados no OpenDSS [Dugan and McDermott, 2011] através de linhas de comando introduzidas pelo usuário diretamente no *software* ou através do uso de uma interface COM, do inglês (*Component Object Model*). A estrutura geral de programação e funcionamento do OpenDSS é apresentada na figura 65.

Figura 65 – Estrutura de programação do OpenDSS.



Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

A estrutura de entrada de comandos permite a programação e o desenvolvimento de soluções customizadas utilizando softwares externos. Para customizações ainda mais específicas, o OpenDSS também permite o uso de DLLs, do inglês, (*Dynamic-link library*), que são ferramentas compostas por bibliotecas compartilhadas ainda mais flexíveis que a

interface COM.

No presente trabalho, o OpenDSS será acionado através do Matlab, visando a integração com os algoritmos do sistema especialista *fuzzy*, bem como a modelagem do ônibus elétrico e conversores de potência realizadas no Simulink.

A seguir serão apresentados os parâmetros de programação necessários para se realizar a modelagem básicas dos principais componentes da rede de distribuição.

B.1 Subestação

A subestação de energia, que conecta o sistema de alta tensão da concessionária (138 kV) ao sistema de média tensão (13,8kV) é representado no OpenDSS através de um circuito equivalente de Thévenin.

Esse equivalente de Thévenin representa todo o sistema à jusante da barra da subestação, incluindo todas as linhas de transmissão e subestações de níveis de tensão ainda mais elevados (230kV, 345kV e 500kV).

Para se definir essa barra equivalente, o OpenDSS necessita das informações de resistência e reatância da fonte, além da potência de curto-circuito monofásica e trifásica em MVA, conforme mostrado na tabela 26

Tabela 26 – Parâmetros para modelagem da subestação.

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>basekV</i>	Tensão de linha nominal	<i>kV</i>
<i>bus1</i>	Nome da barra a qual o terminal do elemento é conectado	–
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva da fonte	Ω
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva da fonte	Ω
<i>mvasc3</i>	Potência de curto-circuito trifásico	<i>MVA</i>
<i>mvasc1</i>	Potência de curto-circuito monofásico	<i>MVA</i>
<i>pu</i>	Valor por unidade da tensão na barra	<i>p.u.</i>

Fonte: Adaptado de [Dugan \[2016\]](#)

Se for necessária a representação de um barramento infinito, ou barra *slack*, basta definir valores elevados para as potências de curto-circuito.

B.2 Condutores elétricos

O condutores elétricos são representados no OpenDSS através de dois terminais, entrada e saída, modelados por meio da definição da sua matriz de admitâncias nodais.

A definição da matriz de admitâncias nodais é realizada através das informações de impedâncias sequenciais ou pela definição de matrizes de reatâncias e resistências.

Os parâmetros básicos do elemento *line* no OpenDSS são mostrados na tabela 27.

Tabela 27 – Parâmetros para modelagem dos condutores elétricos.

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>Phases</i>	Número de fases	–
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual o terminal 1 é conectado	–
<i>Bus2</i>	Nome da barra a qual o terminal 2 é conectado	–
<i>Length</i>	Comprimento da linha	<i>km</i>
<i>Nphases</i>	Número de fases	–
<i>baseFreq</i>	Frequência base das reatâncias	<i>Hz</i>
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva por distância	Ω/km
<i>R0</i>	Resistência de sequência zero por distância	Ω/km
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva por distância	Ω/km
<i>X0</i>	Reatância de sequência zero por distância	Ω/km
<i>C1</i>	Capacitância total de sequência positiva por distância	nF/km
<i>C0</i>	Capacitância total de sequência zero por distância	nF/km
<i>Rmatrix</i>	Matriz de resistências da linha por distância	Ω/km
<i>Xmatrix</i>	Matriz de reatâncias da linha por distância	Ω/km
<i>units</i>	Unidade de distância utilizada	–
<i>Normamps</i>	Corrente nominal da linha	<i>A</i>

Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

Vale ressaltar que em um alimentador de distribuição real, a quantidade de trechos de condutores estaria na ordem de grandeza de milhares ou dezenas de milhares. Desta forma é conveniente organizar os tipo de condutores através do comando *LineCode*, que funciona como uma biblioteca no qual é possível recorrer às especificações de cada um dos elementos de forma mais simplificada.

B.3 Transformadores

Para se caracterizar o modelo do transformador no OpenDSS é exigido o fornecimento da quantidade de enrolamentos, número de fases e seus valores de impedância interna que serão utilizados para construção do seu circuito equivalente, conforme apresentado na tabela 28.

Tabela 28 – Parâmetros para modelagem dos transformadores.

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>Phases</i>	Número de fases (o default é 3)	–
<i>Windings</i>	Número de enrolamentos (o default é 2)	–
<i>XLH</i>	Reatância série	<i>p.u.</i>
<i>%loadloss</i>	Porcentagem da perda total	%
<i>%noloadloss</i>	Porcentagem da perda em vazio	%
<i>Wdg</i>	Nome do enrolamento	–
<i>bus</i>	Nome da barra a qual o terminal é conectado	–
<i>conn</i>	Ligação dos enrolamentos	Δ/Y
<i>kV</i>	Tensão de linha nominal do terminal (enrolamento)	<i>kV</i>
<i>kVA</i>	Potência nominal do terminal	<i>kVA</i>
<i>tap</i>	Tensão do tap utilizado	<i>p.u.</i>

Fonte: Adaptado de [Dugan \[2016\]](#)

Os transformadores podem ser monofásicos ou trifásico, com dois ou três enrolamentos. Nas redes de distribuição urbanas nas quais o sistema de mobilidade elétrica serão conectados, a grande maioria dos transformadores serão trifásicos e serão modelados para representar conexão da rede de MT aos subconjuntos de BT.

As cargas são representadas no OpenDSS através de apenas um terminal e sua caracterização pode ser feita através da sua potência ativa e fator de potência; sua potência ativa e reativa; ou através da sua potência aparente e fator de potência.

Para representação elétrica, as cargas são caracterizadas através de admitâncias nodais que são calculadas para tensão base estabelecida na rede. Na tabela 29 são apresentados os parâmetros necessários para sua modelagem.

Tabela 29 – Parâmetros para modelagem das cargas.

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>Phases</i>	Número de fases	–
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual a carga é conectada	–
<i>kV</i>	Tensão nominal	<i>kV</i>
<i>kVA</i>	Potência aparente nominal	<i>kVA</i>
<i>kW</i>	Potência ativa nominal	<i>kW</i>
<i>kVAr</i>	Potência reativa nominal	<i>kVAr</i>
<i>FP</i>	Fator de potência	<i>FP</i>
<i>Daily</i>	Nome da curva diária associada, para análise diária	–

Fonte: Adaptado de [Dugan \[2016\]](#)

No OpenDSS, todas as cargas são consideradas no cálculo de fluxo de potência de acordo com o modelo *ZIP*, no qual podem ser caracterizadas por impedância constante,

corrente constante ou potência constante [Bokhari et al., 2014].

Destaca-se que o OpenDSS permite o cálculo de curvas de cargas através da função *Loadshape*. Através desse elemento, é possível realizar o fluxo de potência no modo diário ou anual, que são essenciais para a análise de qualidade de energia ao longo do tempo.

B.4 Geradores fotovoltaicos

Os geradores fotovoltaicos são caracterizados no OpenDSS através do elemento *PVSystem*, que combina a placa fotovoltaica com o conversor de potência associado.

Do ponto de vista da modelagem do OpenDSS para simulações QSTS, assume-se que o conversor de potência é capaz de encontrar o ponto de máxima potência (MPPT) e já está acoplado a rede de distribuição. Esse fato simplifica a modelagem e permite análises temporais mais longas com menor custo computacional.

Na tabela 30 são apresentados os parâmetros mais importantes para se definir o elemento gerador fotovoltaico no OpenDSS.

Tabela 30 – Parâmetros para modelagem das usinas fotovoltaicas.

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>kV</i>	Tensão de linha nominal	<i>kV</i>
<i>bus1</i>	Nome da barra que será conectado o seu terminal	–
<i>kVA</i>	Potência nominal do inversor	<i>kVA</i>
<i>PF</i>	Fator de potência	%
<i>irrad</i>	Irradiação nominal, irradiância(Base)	<i>kW/m²</i>
<i>Pmp</i>	Potência nominal no ponto de máxima potência, Pmp	<i>kW</i>
Temperature	Temperatura nominal	<i>C</i>
effcurve	Curva de eficiência por potência	–
P-tcurve	Potência por temperatura, Pmp	<i>p.u.</i>
Daily	Irradiância diária, irradiância	<i>p.u.</i>
Tdaily	Temperatura diária	<i>C</i>

Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

O OpenDSS requer a informação das curvas de irradiação e de temperatura para a realização de análises de fluxo de potência temporais. Essas curvas são inseridas através dos objetos *loadshape* e *tshape* respectivamente.

B.5 Sistemas de armazenagem

O OpenDSS também permite a modelagem do sistema de armazenamento de energia à bateria (SAEB). De forma semelhante ao gerador fotovoltaico, o modelo do

SAEB é integrado ao conversor de potência, englobando todas as características de perdas internas do sistema.

Para realizar o controle do sistema é possível definir modos de trabalho, denominados *dutycycles*, no qual são definidos os momentos do dia no qual o SAEB irá carregar ou descarregar na rede de distribuição. Os principais parâmetros para sua modelagem são apresentados na tabela 31.

Tabela 31 – Parâmetros para modelagem dos sistemas de armazenagem.

Parâmetro	Definição	Unidade
kV	Tensão de linha nominal	kV
$bus1$	Nome da barra que é conectado o seu terminal	–
$kWrated$	Potência nominal do sistema	kW
$kWhrated$	Capacidade de armazenamento	kWh
$dispmode$	Modo de despacho	–
$Daily$	Curva que descreve o armazenamento e fornecimento	–

Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

Normalmente o SAEB é utilizado em simulações diárias no qual existe a modelagem de uma curva de carga do alimentador e de possíveis geradores ao longo do dia. Nesses casos, o OpenDSS permite uma análise adequada do comportamento geral da interação do armazenador de energia com a rede, permitindo simulações com espaço de tempo de poucos segundos até várias horas.

B.6 Fluxo de potência

O OpenDSS classifica os seus elementos em duas categorias para a realização do fluxo de potência:

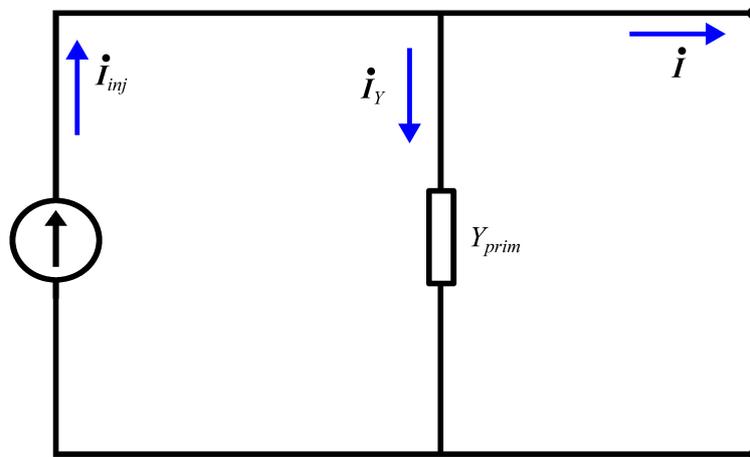
- PC, do inglês *power conversion* (PC), são elementos capazes de "converter" energia, ou seja cargas e geradores.
- PD, do inglês *power delivery* (PC), são elementos capazes de "entregar" energia, ou seja linhas e transformadores.

No modelo realizado no OpenDSS, os elementos PD fazem parte da construção da rede, logo compõem a matriz primitiva de impedância.

Os elementos PC interagem com a rede, injetando ou absorvendo corrente e são representados através de uma matriz de admitância constante Y_{prim} e uma corrente de compensação I_{inj} .

A corrente de compensação tem o objetivo de incluir a não linearidade das cargas na composição da matriz de admitâncias. Esse arranjo pode ser traduzido por meio de circuitos equivalentes de Norton, conforme mostrado na figura 66.

Figura 66 – Modelo do OpenDSS para os elementos de conversão de potência.



Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

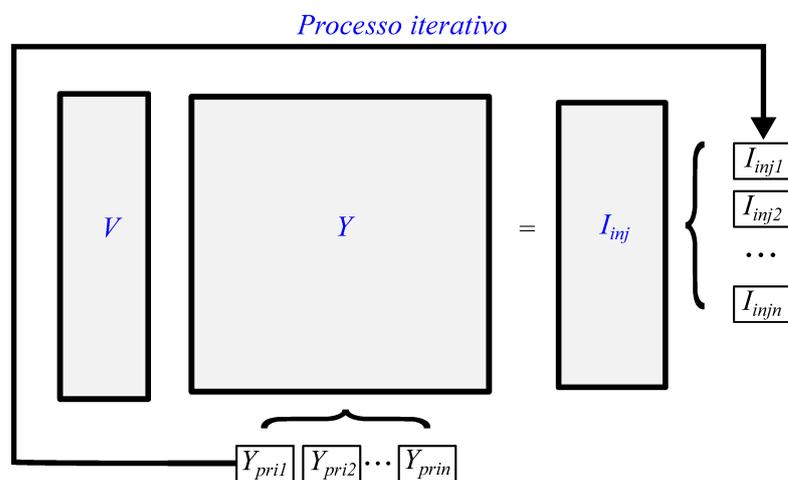
Após a modelagem da rede e composição da matriz de admitância, o OpenDSS procede com o cálculo de fluxo de potência *Normal*, que é um método baseado em ponto fixo iterativo, considerado robusto o suficiente para lidar com redes de distribuição radiais [Dugan, 2016].

O algoritmo segue os seguintes passos:

1. Separação de todos os elementos PC da rede e cálculo do valor inicial da tensão dos nós para iteração com a matriz de admitância da rede, computando-se apenas as correntes injetadas por fontes;
2. Soma de todos os elementos PC à rede e cálculo da corrente de compensação \dot{I}_{inj} de cada elemento com sua matriz de admitância, obtendo-se tensão e potência por nó e organizando todas as correntes em um vetor \dot{I} ;
3. Utilização das correntes de compensação de cada elemento PC para formar uma nova matriz de compensação de corrente.
4. As tensões em cada nó são recalculadas, através da matriz de corrente de compensação e da matriz de admitância anterior.
5. O OpenDSS realiza o teste de convergência, ou seja, verifica se a diferença entre as tensões especuladas no item 1 e as tensões recalculadas em 3 são menores que a tolerância utilizada.

A rotina apresentada repete-se para fluxo de potência executado até que o software encontre a convergência para a solução, conforme mostrado na figura 67.

Figura 67 – Princípio de cálculo do OpenDSS.



Fonte: Adaptado de Dugan [2016]

Apêndice C

Memória de cálculo da aplicação das matrizes *payoff*

Devido ao elevado número de funções objetivo e alternativas de solução do problema resolvido no estudo de caso do capítulo 7, o processo de aplicação das matrizes *payoff* foi omitido no texto da tese. Esses cálculos computacionais são apresentados a seguir em sua totalidade.

Critérios :

p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
548.06	-3.53	0.03	3	24.10	685117.12	12.01	571374.02	138223.27	2
548.80	-3.20	0.03	3	23.81	725834.02	9.66	530657.12	97506.37	2
551.61	-3.63	0.02	3	40.87	780952.02	7.10	475539.12	42388.37	3
548.11	-3.29	0.02	3	35.71	815497.02	5.76	440994.12	7843.37	3
550.96	-2.68	0.02	3	38.45	850042.02	4.56	406449.12	-26701.63	5
545.50	-3.38	0.02	3	43.21	888701.62	3.37	367789.52	-65361.23	5
550.12	-3.44	0.02	5	42.26	934517.10	2.13	324407.06	-111176.71	6
552.89	-3.52	0.02	4	44.45	986057.16	0.86	271650.49	-162716.77	6
550.57	-3.13	0.02	4	42.55	1030888.66	-0.12	226818.99	-207548.27	7
550.86	-3.29	0.02	5	45.04	1072097.55	-0.94	186826.61	-248757.16	7

p1=Autonomia (km)

p3=Elevacao de tensao (p.u.)

p5=Consumo de energia (MMh/ano)

p7=TIR (%)

p9=ICO comparativo (R\$)

p2=Perdas Eletricas (kW)

p4=Modulos Bateria

p6=Custo Inicial (R\$)

p8=VPL (R\$)

p10=Payback (anos)

Alternativas de solucao:

x1	13									
x2	50	100								
x3	11	44	77							
x4	25	50	75	100						
x5	1	21	41	61	81					
x6	5	22	39	56	73	90				
x7	7	21	35	49	63	77	91			
x8	12	25	38	51	64	77	90	3		
x9	1	12	23	34	45	56	67	78	89	
x10	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96

C.1 Definição das matrizes *payoff*

Conforme mostrado no capítulo 5, a construção dos cenários é o primeiro passo para a solução do problema de tomada de decisão em condições de incerteza [Ekel et al., 2011]. Como o estudo aprofundado de métodos para a construção dos cenários não é um objetivo deste trabalho, cinco cenários foram construídos usando o método proposto em (Sobol', 1979) e posteriormente foram construídas as matrizes *payoff* para cada função objetivo, conforme mostrado abaixo.

p1_payoff =

537.1517	542.5912	548.0581	553.5524	559.0741
537.8766	543.3235	548.7977	554.2994	559.8285
540.6373	546.1120	551.6144	557.1443	562.7018
537.2052	542.6452	548.1127	553.6075	559.1297
539.9992	545.4675	550.9634	556.4868	562.0377
534.6444	540.0585	545.4998	550.9685	556.4644
539.1733	544.6333	550.1207	555.6357	561.1781
541.8923	547.3797	552.8949	558.4376	564.0080
539.6098	545.0742	550.5661	556.0855	561.6324
539.8970	545.3643	550.8591	556.3815	561.9314

p2_payoff =

-3.4584	-3.4934	-3.5286	-3.5640	-3.5995
-3.1333	-3.1650	-3.1969	-3.2290	-3.2612
-3.5544	-3.5904	-3.6266	-3.6630	-3.6995
-3.2268	-3.2595	-3.2924	-3.3254	-3.3585
-2.6261	-2.6527	-2.6794	-2.7063	-2.7333
-3.3150	-3.3486	-3.3823	-3.4162	-3.4503
-3.3739	-3.4081	-3.4424	-3.4769	-3.5116
-3.4511	-3.4860	-3.5211	-3.5564	-3.5919
-3.0721	-3.1032	-3.1344	-3.1659	-3.1974
-3.2292	-3.2619	-3.2947	-3.3278	-3.3610

p3_payoff =

0.0333	0.0337	0.0340	0.0343	0.0347
0.0253	0.0255	0.0258	0.0261	0.0263
0.0225	0.0228	0.0230	0.0232	0.0235
0.0186	0.0188	0.0190	0.0192	0.0194
0.0157	0.0158	0.0160	0.0162	0.0163
0.0184	0.0186	0.0188	0.0190	0.0192
0.0176	0.0178	0.0180	0.0182	0.0184
0.0157	0.0158	0.0160	0.0162	0.0163
0.0187	0.0189	0.0191	0.0193	0.0195

0.0164 0.0165 0.0167 0.0169 0.0170

p4_payoff =

2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005

p5_payoff =

23.6167	23.8559	24.0962	24.3378	24.5806
23.3342	23.5705	23.8080	24.0467	24.2865
40.0519	40.4575	40.8651	41.2748	41.6865
35.0013	35.3558	35.7120	36.0700	36.4298
37.6835	38.0651	38.4486	38.8341	39.2214
42.3465	42.7753	43.2063	43.6394	44.0747
41.4210	41.8404	42.2620	42.6857	43.1115
43.5635	44.0046	44.4480	44.8936	45.3414
41.7012	42.1234	42.5479	42.9744	43.4031
44.1483	44.5953	45.0446	45.4962	45.9500

p6_payoff =

1.0e+06 *

0.6715	0.6783	0.6851	0.6920	0.6989
0.7114	0.7186	0.7258	0.7331	0.7404
0.7654	0.7732	0.7810	0.7888	0.7966
0.7993	0.8074	0.8155	0.8237	0.8319
0.8331	0.8416	0.8500	0.8586	0.8671
0.8710	0.8798	0.8887	0.8976	0.9066
0.9159	0.9252	0.9345	0.9439	0.9533
0.9664	0.9762	0.9861	0.9959	1.0059
1.0104	1.0206	1.0309	1.0412	1.0516
1.0508	1.0614	1.0721	1.0828	1.0936

p7_payoff =

11.7756	11.8949	12.0147	12.1352	12.2562
9.4675	9.5634	9.6597	9.7565	9.8539
6.9615	7.0320	7.1028	7.1740	7.2456
5.6445	5.7017	5.7591	5.8168	5.8749
4.4731	4.5184	4.5640	4.6097	4.6557
3.3008	3.3343	3.3679	3.4016	3.4355
2.0874	2.1086	2.1298	2.1512	2.1726
0.8416	0.8502	0.8587	0.8673	0.8760
-0.1217	-0.1230	-0.1242	-0.1254	-0.1267
-0.9216	-0.9309	-0.9403	-0.9497	-0.9592

p8_payoff =

1.0e+05 *

5.6000	5.6567	5.7137	5.7710	5.8286
5.2010	5.2536	5.3066	5.3598	5.4132
4.6608	4.7080	4.7554	4.8031	4.8510
4.3222	4.3660	4.4099	4.4542	4.4986
3.9836	4.0239	4.0645	4.1052	4.1462
3.6047	3.6412	3.6779	3.7148	3.7518

3.1795	3.2117	3.2441	3.2766	3.3093
2.6624	2.6894	2.7165	2.7437	2.7711
2.2231	2.2456	2.2682	2.2909	2.3138
1.8311	1.8496	1.8683	1.8870	1.9058

p9_payoff =

1.0e+05 *

1.3547	1.3684	1.3822	1.3961	1.4100
0.9557	0.9653	0.9751	0.9848	0.9947
0.4154	0.4197	0.4239	0.4281	0.4324
0.0769	0.0777	0.0784	0.0792	0.0800
-0.2617	-0.2644	-0.2670	-0.2697	-0.2724
-0.6406	-0.6471	-0.6536	-0.6602	-0.6667
-1.0896	-1.1007	-1.1118	-1.1229	-1.1341
-1.5948	-1.6109	-1.6272	-1.6435	-1.6599
-2.0342	-2.0548	-2.0755	-2.0963	-2.1172
-2.4381	-2.4628	-2.4876	-2.5125	-2.5376

p10_payoff =

1.9602	1.9801	2.0000	2.0200	2.0402
1.9602	1.9801	2.0000	2.0200	2.0402
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005
5.8806	5.9402	6.0000	6.0601	6.1206
5.8806	5.9402	6.0000	6.0601	6.1206
6.8607	6.9302	7.0000	7.0702	7.1407
6.8607	6.9302	7.0000	7.0702	7.1407

C.2 Matrizes de risco

A matriz de risco apresenta o custo do risco da diferença dos valores da função objetivo escolhida X_k , comparando-se com a escolha da alternativa de solução que seria localmente ótima para o estado de natureza Y_s . As matrizes abaixo são apresentadas abaixo para todos os objetivos.

matrix_risco_p1 =

2.5073	2.5327	2.5582	2.5839	2.6097
3.2322	3.2650	3.2979	3.3309	3.3642
5.9929	6.0535	6.1145	6.1758	6.2374
2.5608	2.5868	2.6128	2.6390	2.6653
5.3548	5.4090	5.4635	5.5183	5.5733
0	0	0	0	0
4.5289	4.5748	4.6209	4.6672	4.7138
7.2479	7.3213	7.3950	7.4692	7.5437
4.9654	5.0157	5.0662	5.1170	5.1680
5.2526	5.3058	5.3593	5.4130	5.4670

matrix_risco_p2 =

0.0960	0.0970	0.0980	0.0990	0.1000
0.4211	0.4254	0.4297	0.4340	0.4383
0	0	0	0	0

0.3276	0.3309	0.3342	0.3376	0.3410
0.9284	0.9378	0.9472	0.9567	0.9662
0.2394	0.2418	0.2443	0.2467	0.2492
0.1805	0.1823	0.1842	0.1860	0.1879
0.1034	0.1044	0.1055	0.1065	0.1076
0.4824	0.4873	0.4922	0.4971	0.5021
0.3253	0.3286	0.3319	0.3352	0.3385

matrix_risco_p3 =

0.0176	0.0178	0.0180	0.0182	0.0184
0.0096	0.0097	0.0098	0.0099	0.0100
0.0069	0.0069	0.0070	0.0071	0.0071
0.0029	0.0030	0.0030	0.0030	0.0031
0	0	0	0	0
0.0027	0.0028	0.0028	0.0028	0.0029
0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
0	0	0	0	0
0.0030	0.0031	0.0031	0.0031	0.0032
0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007

matrix_risco_p4 =

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1.9602	1.9800	2.0000	2.0200	2.0402
0.9801	0.9900	1.0000	1.0100	1.0201
0.9801	0.9900	1.0000	1.0100	1.0201
1.9602	1.9800	2.0000	2.0200	2.0402

matrix_risco_p5 =

0.2825	0.2854	0.2882	0.2911	0.2940
0	0	0	0	0
16.7177	16.8870	17.0571	17.2281	17.4000
11.6671	11.7853	11.9040	12.0233	12.1433
14.3493	14.4946	14.6406	14.7874	14.9349
19.0123	19.2048	19.3983	19.5928	19.7882
18.0868	18.2699	18.4540	18.6390	18.8249
20.2293	20.4341	20.6400	20.8469	21.0549
18.3669	18.5529	18.7399	18.9277	19.1165
20.8140	21.0248	21.2366	21.4495	21.6635

matrix_risco_p6 =

1.0e+05	*			
0	0	0	0	0
0.3991	0.4031	0.4072	0.4113	0.4154
0.9393	0.9488	0.9583	0.9680	0.9776
1.2779	1.2908	1.3038	1.3169	1.3300
1.6164	1.6328	1.6492	1.6658	1.6824
1.9953	2.0155	2.0358	2.0563	2.0768
2.4444	2.4691	2.4940	2.5190	2.5441
2.9495	2.9794	3.0094	3.0396	3.0699
3.3889	3.4232	3.4577	3.4924	3.5272
3.7928	3.8312	3.8698	3.9086	3.9476

matrix_risco_p7 =

12.6972	12.8258	12.9550	13.0849	13.2154
10.3891	10.4943	10.6000	10.7063	10.8131

7.8831	7.9629	8.0431	8.1238	8.2048
6.5661	6.6326	6.6994	6.7666	6.8341
5.3947	5.4494	5.5043	5.5595	5.6149
4.2224	4.2652	4.3082	4.3513	4.3947
3.0090	3.0395	3.0701	3.1009	3.1318
1.7632	1.7811	1.7990	1.8171	1.8352
0.7999	0.8080	0.8161	0.8243	0.8325
0	0	0	0	0

matrix_risco_p8 =

1.0e+05 *

3.7689	3.8071	3.8455	3.8840	3.9228
3.3699	3.4040	3.4383	3.4728	3.5074
2.8297	2.8583	2.8871	2.9161	2.9452
2.4911	2.5163	2.5417	2.5672	2.5928
2.1525	2.1743	2.1962	2.2182	2.2404
1.7736	1.7916	1.8096	1.8278	1.8460
1.3484	1.3621	1.3758	1.3896	1.4035
0.8314	0.8398	0.8482	0.8567	0.8653
0.3920	0.3959	0.3999	0.4039	0.4080
0	0	0	0	0

matrix_risco_p10 =

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0.9801	0.9900	1.0000	1.0100	1.0201
0.9801	0.9900	1.0000	1.0100	1.0201
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005

C.3 Cálculo das estimativas características

Na sequência, são apresentadas as estimativas características de nível máximo, mínimo e médio da função objetivo, bem como o nível máximo de risco, obtidas por meio da aplicação das equações (5.6)-(5.9). Tais estimativas servirão como base para aplicação dos critérios de escolha de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz e são apresentadas nas matrizes a seguir.

Est_Caract_p1 =

537.1517	542.5912	548.0581	553.5524	559.0741	559.0741	537.1517	548.0855	2.6097
537.8766	543.3235	548.7977	554.2994	559.8285	559.8285	537.8766	548.8251	3.3642
540.6373	546.1120	551.6144	557.1443	562.7018	562.7018	540.6373	551.6420	6.2374
537.2052	542.6452	548.1127	553.6075	559.1297	559.1297	537.2052	548.1401	2.6653
539.9992	545.4675	550.9634	556.4868	562.0377	562.0377	539.9992	550.9909	5.5733
534.6444	540.0585	545.4998	550.9685	556.4644	556.4644	534.6444	545.5271	0
539.1733	544.6333	550.1207	555.6357	561.1781	561.1781	539.1733	550.1482	4.7138
541.8923	547.3797	552.8949	558.4376	564.0080	564.0080	541.8923	552.9225	7.5437
539.6098	545.0742	550.5661	556.0855	561.6324	561.6324	539.6098	550.5936	5.1680
539.8970	545.3643	550.8591	556.3815	561.9314	561.9314	539.8970	550.8866	5.4670
534.6444	540.0585	545.4998	550.9685	556.4644	0	0	0	0

Est_Caract_p2 =

-3.4584	-3.4934	-3.5286	-3.5640	-3.5995	-3.4584	-3.5995	-3.5288	0.1000
-3.1333	-3.1650	-3.1969	-3.2290	-3.2612	-3.1333	-3.2612	-3.1971	0.4383
-3.5544	-3.5904	-3.6266	-3.6630	-3.6995	-3.5544	-3.6995	-3.6268	0
-3.2268	-3.2595	-3.2924	-3.3254	-3.3585	-3.2268	-3.3585	-3.2925	0.3410
-2.6261	-2.6527	-2.6794	-2.7063	-2.7333	-2.6261	-2.7333	-2.6795	0.9662
-3.3150	-3.3486	-3.3823	-3.4162	-3.4503	-3.3150	-3.4503	-3.3825	0.2492
-3.3739	-3.4081	-3.4424	-3.4769	-3.5116	-3.3739	-3.5116	-3.4426	0.1879
-3.4511	-3.4860	-3.5211	-3.5564	-3.5919	-3.4511	-3.5919	-3.5213	0.1076
-3.0721	-3.1032	-3.1344	-3.1659	-3.1974	-3.0721	-3.1974	-3.1346	0.5021
-3.2292	-3.2619	-3.2947	-3.3278	-3.3610	-3.2292	-3.3610	-3.2949	0.3385
-3.5544	-3.5904	-3.6266	-3.6630	-3.6995	0	0	0	0

Est_Caract_p3 =

0.0333	0.0337	0.0340	0.0343	0.0347	0.0347	0.0333	0.0340	0.0184
0.0253	0.0255	0.0258	0.0261	0.0263	0.0263	0.0253	0.0258	0.0100
0.0225	0.0228	0.0230	0.0232	0.0235	0.0235	0.0225	0.0230	0.0071
0.0186	0.0188	0.0190	0.0192	0.0194	0.0194	0.0186	0.0190	0.0031
0.0157	0.0158	0.0160	0.0162	0.0163	0.0163	0.0157	0.0160	0
0.0184	0.0186	0.0188	0.0190	0.0192	0.0192	0.0184	0.0188	0.0029
0.0176	0.0178	0.0180	0.0182	0.0184	0.0184	0.0176	0.0180	0.0020
0.0157	0.0158	0.0160	0.0162	0.0163	0.0163	0.0157	0.0160	0
0.0187	0.0189	0.0191	0.0193	0.0195	0.0195	0.0187	0.0191	0.0032
0.0164	0.0165	0.0167	0.0169	0.0170	0.0170	0.0164	0.0167	0.0007
0.0157	0.0158	0.0160	0.0162	0.0163	0	0	0	0

Est_Caract_p4 =

2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	0
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	0
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	0
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	0
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	0
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005	5.1005	4.9005	5.0002	2.0402
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804	4.0804	3.9204	4.0002	1.0201
3.9204	3.9601	4.0000	4.0401	4.0804	4.0804	3.9204	4.0002	1.0201
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005	5.1005	4.9005	5.0002	2.0402
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	0	0	0	0

Est_Caract_p5 =

23.6167	23.8559	24.0962	24.3378	24.5806	24.5806	23.6167	24.0974	0.2940
23.3342	23.5705	23.8080	24.0467	24.2865	24.2865	23.3342	23.8092	0
40.0519	40.4575	40.8651	41.2748	41.6865	41.6865	40.0519	40.8672	17.4000
35.0013	35.3558	35.7120	36.0700	36.4298	36.4298	35.0013	35.7138	12.1433
37.6835	38.0651	38.4486	38.8341	39.2214	39.2214	37.6835	38.4505	14.9349
42.3465	42.7753	43.2063	43.6394	44.0747	44.0747	42.3465	43.2084	19.7882
41.4210	41.8404	42.2620	42.6857	43.1115	43.1115	41.4210	42.2641	18.8249
43.5635	44.0046	44.4480	44.8936	45.3414	45.3414	43.5635	44.4502	21.0549
41.7012	42.1234	42.5479	42.9744	43.4031	43.4031	41.7012	42.5500	19.1165
44.1483	44.5953	45.0446	45.4962	45.9500	45.9500	44.1483	45.0469	21.6635
23.3342	23.5705	23.8080	24.0467	24.2865	0	0	0	0

Est_Caract_p6 =

1.0e+06 *								
0.6715	0.6783	0.6851	0.6920	0.6989	0.6989	0.6715	0.6852	0
0.7114	0.7186	0.7258	0.7331	0.7404	0.7404	0.7114	0.7259	0.0415
0.7654	0.7732	0.7810	0.7888	0.7966	0.7966	0.7654	0.7810	0.0978
0.7993	0.8074	0.8155	0.8237	0.8319	0.8319	0.7993	0.8155	0.1330
0.8331	0.8416	0.8500	0.8586	0.8671	0.8671	0.8331	0.8501	0.1682
0.8710	0.8798	0.8887	0.8976	0.9066	0.9066	0.8710	0.8887	0.2077
0.9159	0.9252	0.9345	0.9439	0.9533	0.9533	0.9159	0.9346	0.2544

0.9664	0.9762	0.9861	0.9959	1.0059	1.0059	0.9664	0.9861	0.3070
1.0104	1.0206	1.0309	1.0412	1.0516	1.0516	1.0104	1.0309	0.3527
1.0508	1.0614	1.0721	1.0828	1.0936	1.0936	1.0508	1.0722	0.3948
0.6715	0.6783	0.6851	0.6920	0.6989	0	0	0	0

Est_Caract_p7 =

11.7756	11.8949	12.0147	12.1352	12.2562	12.2562	11.7756	12.0153	13.2154
9.4675	9.5634	9.6597	9.7565	9.8539	9.8539	9.4675	9.6602	10.8131
6.9615	7.0320	7.1028	7.1740	7.2456	7.2456	6.9615	7.1032	8.2048
5.6445	5.7017	5.7591	5.8168	5.8749	5.8749	5.6445	5.7594	6.8341
4.4731	4.5184	4.5640	4.6097	4.6557	4.6557	4.4731	4.5642	5.6149
3.3008	3.3343	3.3679	3.4016	3.4355	3.4355	3.3008	3.3680	4.3947
2.0874	2.1086	2.1298	2.1512	2.1726	2.1726	2.0874	2.1299	3.1318
0.8416	0.8502	0.8587	0.8673	0.8760	0.8760	0.8416	0.8588	1.8352
-0.1217	-0.1230	-0.1242	-0.1254	-0.1267	-0.1217	-0.1267	-0.1242	0.8325
-0.9216	-0.9309	-0.9403	-0.9497	-0.9592	-0.9216	-0.9592	-0.9403	0
-0.9216	-0.9309	-0.9403	-0.9497	-0.9592	0	0	0	0

Est_Caract_p8 =

1.0e+05 *

5.6000	5.6567	5.7137	5.7710	5.8286	5.8286	5.6000	5.7140	3.9228
5.2010	5.2536	5.3066	5.3598	5.4132	5.4132	5.2010	5.3068	3.5074
4.6608	4.7080	4.7554	4.8031	4.8510	4.8510	4.6608	4.7556	2.9452
4.3222	4.3660	4.4099	4.4542	4.4986	4.4986	4.3222	4.4102	2.5928
3.9836	4.0239	4.0645	4.1052	4.1462	4.1462	3.9836	4.0647	2.2404
3.6047	3.6412	3.6779	3.7148	3.7518	3.7518	3.6047	3.6781	1.8460
3.1795	3.2117	3.2441	3.2766	3.3093	3.3093	3.1795	3.2442	1.4035
2.6624	2.6894	2.7165	2.7437	2.7711	2.7711	2.6624	2.7166	0.8653
2.2231	2.2456	2.2682	2.2909	2.3138	2.3138	2.2231	2.2683	0.4080
1.8311	1.8496	1.8683	1.8870	1.9058	1.9058	1.8311	1.8684	0
1.8311	1.8496	1.8683	1.8870	1.9058	0	0	0	0

Est_Caract_p9 =

1.0e+05 *

1.3547	1.3684	1.3822	1.3961	1.4100	1.4100	1.3547	1.3823	3.9476
0.9557	0.9653	0.9751	0.9848	0.9947	0.9947	0.9557	0.9751	3.5322
0.4154	0.4197	0.4239	0.4281	0.4324	0.4324	0.4154	0.4239	2.9700
0.0769	0.0777	0.0784	0.0792	0.0800	0.0800	0.0769	0.0784	2.6176
-0.2617	-0.2644	-0.2670	-0.2697	-0.2724	-0.2617	-0.2724	-0.2670	2.2652
-0.6406	-0.6471	-0.6536	-0.6602	-0.6667	-0.6406	-0.6667	-0.6536	1.8708
-1.0896	-1.1007	-1.1118	-1.1229	-1.1341	-1.0896	-1.1341	-1.1118	1.4035
-1.5948	-1.6109	-1.6272	-1.6435	-1.6599	-1.5948	-1.6599	-1.6272	0.8777
-2.0342	-2.0548	-2.0755	-2.0963	-2.1172	-2.0342	-2.1172	-2.0756	0.4204
-2.4381	-2.4628	-2.4876	-2.5125	-2.5376	-2.4381	-2.5376	-2.4877	0
-2.4381	-2.4628	-2.4876	-2.5125	-2.5376	0	0	0	0

Est_Caract_p10 =

1.9602	1.9801	2.0000	2.0200	2.0402	2.0402	1.9602	2.0001	0
1.9602	1.9801	2.0000	2.0200	2.0402	2.0402	1.9602	2.0001	0
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	1.0201
2.9403	2.9701	3.0000	3.0301	3.0603	3.0603	2.9403	3.0001	1.0201
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005	5.1005	4.9005	5.0002	3.0603
4.9005	4.9501	5.0000	5.0501	5.1005	5.1005	4.9005	5.0002	3.0603
5.8806	5.9402	6.0000	6.0601	6.1206	6.1206	5.8806	6.0003	4.0804
5.8806	5.9402	6.0000	6.0601	6.1206	6.1206	5.8806	6.0003	4.0804
6.8607	6.9302	7.0000	7.0702	7.1407	7.1407	6.8607	7.0004	5.1005
6.8607	6.9302	7.0000	7.0702	7.1407	7.1407	6.8607	7.0004	5.1005
1.9602	1.9801	2.0000	2.0200	2.0402	0	0	0	0

C.4 Critérios de escolha

É necessário se aplicar as equações (5.14)-(5.17) para realizar a construção das novas estimativas característica $\mu_D^{max}(X_k)$, $\mu_D^{min}(X_k)$, $\bar{\mu}_D(X_k)$ e $r(X_k, Y_s)$, que servem como base para os critérios que devem ser usados na generalização da abordagem clássica para a tomada de decisões multicritério e são apresentadas nas matrizes abaixo.

Crit_Esc_p1 =

559.0741	548.0855	2.6097	542.6323
559.8285	548.8251	3.3642	543.3646
562.7018	551.6420	6.2374	546.1534
559.1297	548.1401	2.6653	542.6863
562.0377	550.9909	5.5733	545.5088
556.4644	545.5271	0	540.0994
561.1781	550.1482	4.7138	544.6745
564.0080	552.9225	7.5437	547.4212
561.6324	550.5936	5.1680	545.1155
561.9314	550.8866	5.4670	545.4056
556.4644	545.5271	0	540.0994
564.0080	552.9225	7.5437	547.4212

Crit_Esc_p2 =

-3.4584	-3.5288	0.1000	-3.5643
-3.1333	-3.1971	0.4383	-3.2292
-3.5544	-3.6268	0	-3.6632
-3.2268	-3.2925	0.3410	-3.3256
-2.6261	-2.6795	0.9662	-2.7065
-3.3150	-3.3825	0.2492	-3.4165
-3.3739	-3.4426	0.1879	-3.4772
-3.4511	-3.5213	0.1076	-3.5567
-3.0721	-3.1346	0.5021	-3.1661
-3.2292	-3.2949	0.3385	-3.3280
-3.5544	-3.6268	0	-3.6632
-2.6261	-2.6795	0.9662	-2.7065

Crit_Esc_p3 =

0.0347	0.0340	0.0184	0.0337
0.0263	0.0258	0.0100	0.0255
0.0235	0.0230	0.0071	0.0228
0.0194	0.0190	0.0031	0.0188
0.0163	0.0160	0	0.0158
0.0192	0.0188	0.0029	0.0186
0.0184	0.0180	0.0020	0.0178
0.0163	0.0160	0	0.0158
0.0195	0.0191	0.0032	0.0189
0.0170	0.0167	0.0007	0.0165
0.0163	0.0160	0	0.0158
0.0347	0.0340	0.0184	0.0337

Crit_Esc_p4 =

3.0603	3.0001	0	2.9703
3.0603	3.0001	0	2.9703
3.0603	3.0001	0	2.9703
3.0603	3.0001	0	2.9703
3.0603	3.0001	0	2.9703
3.0603	3.0001	0	2.9703
5.1005	5.0002	2.0402	4.9505
4.0804	4.0002	1.0201	3.9604

4.0804	4.0002	1.0201	3.9604
5.1005	5.0002	2.0402	4.9505
3.0603	3.0001	0	2.9703
5.1005	5.0002	2.0402	4.9505

Crit_Esc_p5 =

24.5806	24.0974	0.2940	23.8577
24.2865	23.8092	0	23.5723
41.6865	40.8672	17.4000	40.4606
36.4298	35.7138	12.1433	35.3585
39.2214	38.4505	14.9349	38.0680
44.0747	43.2084	19.7882	42.7785
43.1115	42.2641	18.8249	41.8436
45.3414	44.4502	21.0549	44.0080
43.4031	42.5500	19.1165	42.1266
45.9500	45.0469	21.6635	44.5987
24.2865	23.8092	0	23.5723
45.9500	45.0469	21.6635	44.5987

Crit_Esc_p6 =

1.0e+06 *

0.6989	0.6852	0	0.6783
0.7404	0.7259	0.0415	0.7186
0.7966	0.7810	0.0978	0.7732
0.8319	0.8155	0.1330	0.8074
0.8671	0.8501	0.1682	0.8416
0.9066	0.8887	0.2077	0.8799
0.9533	0.9346	0.2544	0.9253
1.0059	0.9861	0.3070	0.9763
1.0516	1.0309	0.3527	1.0207
1.0936	1.0722	0.3948	1.0615
0.6989	0.6852	0	0.6783
1.0936	1.0722	0.3948	1.0615

Crit_Esc_p7 =

12.2562	12.0153	13.2154	11.8958
9.8539	9.6602	10.8131	9.5641
7.2456	7.1032	8.2048	7.0325
5.8749	5.7594	6.8341	5.7021
4.6557	4.5642	5.6149	4.5188
3.4355	3.3680	4.3947	3.3345
2.1726	2.1299	3.1318	2.1087
0.8760	0.8588	1.8352	0.8502
-0.1217	-0.1242	0.8325	-0.1254
-0.9216	-0.9403	0	-0.9498
-0.9216	-0.9403	0	-0.9498
12.2562	12.0153	13.2154	11.8958

Crit_Esc_p8 =

1.0e+05 *

5.8286	5.7140	3.9228	5.6572
5.4132	5.3068	3.5074	5.2540
4.8510	4.7556	2.9452	4.7083
4.4986	4.4102	2.5928	4.3663
4.1462	4.0647	2.2404	4.0243
3.7518	3.6781	1.8460	3.6415
3.3093	3.2442	1.4035	3.2120
2.7711	2.7166	0.8653	2.6896
2.3138	2.2683	0.4080	2.2457
1.9058	1.8684	0	1.8498
1.9058	1.8684	0	1.8498

5.8286 5.7140 3.9228 5.6572

Crit_Esc_p9 =

1.0e+05 *

1.4100	1.3823	3.9476	1.3685
0.9947	0.9751	3.5322	0.9654
0.4324	0.4239	2.9700	0.4197
0.0800	0.0784	2.6176	0.0777
-0.2617	-0.2670	2.2652	-0.2697
-0.6406	-0.6536	1.8708	-0.6602
-1.0896	-1.1118	1.4035	-1.1230
-1.5948	-1.6272	0.8777	-1.6436
-2.0342	-2.0756	0.4204	-2.0964
-2.4381	-2.4877	0	-2.5127
-2.4381	-2.4877	0	-2.5127
1.4100	1.3823	3.9476	1.3685

Crit_Esc_p10 =

2.0402	2.0001	0	1.9802
2.0402	2.0001	0	1.9802
3.0603	3.0001	1.0201	2.9703
3.0603	3.0001	1.0201	2.9703
5.1005	5.0002	3.0603	4.9505
5.1005	5.0002	3.0603	4.9505
6.1206	6.0003	4.0804	5.9406
6.1206	6.0003	4.0804	5.9406
7.1407	7.0004	5.1005	6.9307
7.1407	7.0004	5.1005	6.9307
2.0402	2.0001	0	1.9802
7.1407	7.0004	5.1005	6.9307

C.5 Matriz de critérios agregada

Finalmente, realiza-se a agregação das matrizes de critério de escolhas modificadas, por meio da minimização dos objetivos. Os resultados são apresentados a seguir:

Magr1 =

0.6541	0.6541	0.6541	0.6541
0.5540	0.5540	0.5540	0.5540
0.1732	0.1732	0.1732	0.1732
0.6467	0.6467	0.6467	0.6467
0.2612	0.2612	0.2612	0.2612
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.3751	0.3751	0.3751	0.3751
0	0	0	0
0.3149	0.3149	0.3149	0.3149
0.2753	0.2753	0.2753	0.2753

Magr2 =

0.8965	0.8965	0.8965	0.8965
0.5464	0.5464	0.5464	0.5464
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.6471	0.6471	0.6471	0.6471

0	0	0	0
0.7421	0.7421	0.7421	0.7421
0.8056	0.8056	0.8056	0.8056
0.8887	0.8887	0.8887	0.8887
0.4804	0.4804	0.4804	0.4804
0.6496	0.6496	0.6496	0.6496

Magr3 =

0	0.0000	0.0000	0
0.4556	0.4556	0.4556	0.4556
0.6111	0.6111	0.6111	0.6111
0.8333	0.8333	0.8333	0.8333
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8444	0.8444	0.8444	0.8444
0.8889	0.8889	0.8889	0.8889
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8278	0.8278	0.8278	0.8278
0.9611	0.9611	0.9611	0.9611

Magr4 =

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0	0	0	0
0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
0	0	0	0

Magr5 =

0.9864	0.9864	0.9864	0.9864
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.1968	0.1968	0.1968	0.1968
0.4395	0.4395	0.4395	0.4395
0.3106	0.3106	0.3106	0.3106
0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
0.1310	0.1310	0.1310	0.1310
0.0281	0.0281	0.0281	0.0281
0.1176	0.1176	0.1176	0.1176
0.0000	0.0000	0	0

Magr6 =

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8948	0.8948	0.8948	0.8948
0.7524	0.7524	0.7524	0.7524
0.6631	0.6631	0.6631	0.6631
0.5738	0.5738	0.5738	0.5738
0.4739	0.4739	0.4739	0.4739
0.3555	0.3555	0.3555	0.3555
0.2223	0.2223	0.2223	0.2223
0.1065	0.1065	0.1065	0.1065
0	0.0000	0	0.0000

Magr7 =

0	0	0	0
0.1823	0.1818	0.1818	0.1815
0.3802	0.3791	0.3791	0.3786
0.4843	0.4829	0.4829	0.4822
0.5768	0.5751	0.5751	0.5743

0.6694	0.6675	0.6675	0.6665
0.7652	0.7630	0.7630	0.7619
0.8636	0.8611	0.8611	0.8599
0.9393	0.9370	0.9370	0.9358
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Magr8 =

0.0000	0	0.0000	0.0000
0.1059	0.1059	0.1059	0.1059
0.2492	0.2492	0.2492	0.2492
0.3390	0.3390	0.3390	0.3390
0.4289	0.4289	0.4289	0.4289
0.5294	0.5294	0.5294	0.5294
0.6422	0.6422	0.6422	0.6422
0.7794	0.7794	0.7794	0.7794
0.8960	0.8960	0.8960	0.8960
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Magr9 =

0	0.0000	0.0000	0
0.1079	0.1052	0.1052	0.1039
0.2541	0.2476	0.2476	0.2445
0.3456	0.3369	0.3369	0.3326
0.4344	0.4262	0.4262	0.4221
0.5329	0.5261	0.5261	0.5227
0.6496	0.6445	0.6445	0.6419
0.7809	0.7777	0.7777	0.7761
0.8950	0.8935	0.8935	0.8928
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Magr10 =

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8000	0.8000	0.8000	0.8000
0.8000	0.8000	0.8000	0.8000
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
0	0	0	0
0	0	0	0

MagrAgr =

0	0	0	0
0.1059	0.1052	0.1052	0.1039
0.1732	0.1732	0.1732	0.1732
0.3390	0.3369	0.3369	0.3326
0	0	0	0
0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Analisando-se a matriz de critérios de escolha agregados, é possível encontrar a solução multiobjetivo para os critérios de Wald, Laplace, Savage e Hurwitz. Ambos apontam para a variável X_4 , indicando a necessidade de 4 estações de recarga, alocadas nas posições (25), (50), (75) e (100).

Processamento de matrizes Payoff:

Criterio de Wald-> 4
Criterio de Laplace-> 4
Criterio de Savage-> 4
Criterio de Hurwitz-> 4

Final eCaRR Decision Making Results - Solucao Robusta

Alternativa Vencedora:
Recommended locations for installing charging stations in BhTec circuit: 25 50 75 100