UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

MÉTODOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO PARA DESPACHO ECONÔMICO E ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS E ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

VITÓRIA

2021

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

MÉTODOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO PARA DESPACHO ECONÔMICO E ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS E ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

da Silva, Felipe, 1994-
D111m Métodos híbridos de otimização para despacho econômico e alocação de geradores distribuídos e estações de carregamento de veículos elétricos / Felipe da Silva. - 2021.
137 f. : il.

Orientador: Augusto Rueda-Medina.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Programação não-linear. 2. Algorítmos genéticos. 3. Geração distribuida de energia elétrica. 4. Veículos elétricos. 5. Programação heurística. 6. Serviços de eletricidade - Custos. I. Rueda-Medina, Augusto. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

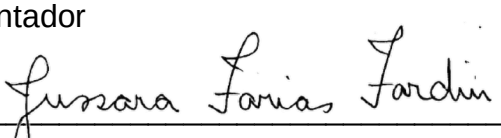
MÉTODOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO PARA DESPACHO ECONÔMICO E ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS E ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

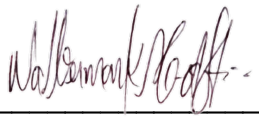
Aprovado em 18 de outubro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dr. Carlos Francisco Sabillón Antúnez
Universidad Loyola Andalucía, LUA, Espanha
Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por ter me dado saúde, força e perseverança para alcançar mais uma etapa acadêmica.

Minha gratidão aos meus queridos pais, Rogério e Tânia, que, com todo amor, dedicação e incentivo, sempre acreditaram em meu potencial.

À minha irmã, Bárbara, por toda a cumplicidade e por sempre estar ao meu lado, disposta a me ajudar em todos os momentos.

Meus sinceros agradecimentos ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFES, em especial ao meu orientador, professor Dr. Augusto César Rueda Medina, por todo o auxílio, compreensão e paciência para a concretização desta pesquisa científica.

À Universidade Federal do Espírito Santo, por me proporcionar uma educação de qualidade e fornecer diversas oportunidades para agregar conhecimento.

À CAPES, pelo suporte financeiro, o que tornou possível a conclusão do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma ao longo de minha trajetória acadêmica.

RESUMO

A maior demanda por um consumo de energia eficiente, menos poluente e sustentável fomentou a busca por veículos elétricos como forma de mitigar a poluição intrínseca ao sistema de transporte atual, alto consumidor de combustíveis fósseis. Não obstante, o aumento do número de veículos elétricos resultará em uma elevação na demanda do sistema de distribuição de mesma proporção. Assim, faz-se necessário investimentos em sistemas de geração renováveis, implementados através de geração distribuída, para lidar com estas cargas pois, caso contrário, estar-se-ia somente alterando a fonte poluidora. A inserção de geradores distribuídos somada às cargas de veículos elétricos, de caráter extremamente estocástico, impacta a dinâmica da rede e exige a aplicação de técnicas de otimização para garantir o melhor emprego desses ativos. Dessa forma, no presente trabalho, propõe-se a utilização de dois métodos híbridos de otimização: o Método de Algoritmos Genéticos - Pontos Interiores e o Método de Lobos Cinzentos - Pontos Interiores; duas técnicas que combinam métodos metaheurísticos, que possuem a função de realizar a alocação de estações de carregamento de veículos elétricos e geradores distribuídos na rede, com um método clássico, o qual possui a função de definir o despacho econômico dos geradores, visando a minimização do custo operacional do sistema. Os métodos híbridos propostos se destacam como uma alternativa para a solução de problemas que não seriam factíveis somente por métodos clássicos ao garantir sua factibilidade e o ótimo global de parte da solução. Ambos os métodos se mostraram eficazes com resultados semelhantes, reduzindo o custo operacional em, aproximadamente, 13,10% e 13,11%, respectivamente, em comparação ao custo do sistema original.

Palavras-chave: Programação Não Linear; Algoritmos Genéticos; Despacho Econômico; Lobos Cinzentos; Geração Distribuída; Veículos Elétricos.

ABSTRACT

The greater yearn for a less polluting, sustainable and efficient energy consumption has fostered the search for electric vehicles as a mean to mitigate the intrinsic pollution of the actual transport system, which is a high consumer of fossil fuels. Nonetheless, the increase in the number of electric vehicles will ensue on an equivalent increase in the distribution system power demand. Thus, investments in renewable generation systems, implemented through distributed generation, are necessary to deal with these loads, otherwise, it would only alter the polluting source. The insertion of distributed generators in concomitance with electric vehicles loads, which are extremely stochastic, have an impact on the network dynamics and requires the application of optimization techniques to ensure that these assets are used to their best benefit. Therefore, in the present work, is proposed an application of two hybrid optimization methods: the Genetic Algorithms-Interior Points Method and the Grey Wolves-Interior Points Method; two techniques that combine metaheuristic methods, that possess the function of realizing the allocation of electric vehicle charging stations and distributed generators on the grid, with a classic method, that possess the function of defining the economic dispatch of the generators, aiming at minimizing the system operational cost. The proposed methods stand out as an alternative for the solution of problems that are not feasible solely through classic methods by ensuring its feasibility and the global optimum of part of the solution. Both methods proved to be effective showing similar results, reducing the operational cost by, approximately, 13.10% and 13.11%, respectively, when compared to the original system cost.

Keywords: Nonlinear Programming; Genetic Algorithms; Economic Dispatch; Grey Wolf; Distributed Generation; Electrical Vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões Globais de CO_2 Provenientes do Transporte em 2018..... 22
Figura 2 – Tipos de VEs..... 32
Figura 3 – Estrutura Típica Residencial de um Sistema de Geração Distribuída. 37
Figura 4 – Monitor de Questões Energéticas Mundiais – Global..... 38
Figura 5 – Monitor de Questões Energéticas Mundiais – Brasil..... 39
Figura 6 – Fluxo de Corrente em um Alimentador Radial com e sem GD..... 41
Figura 7 – Diagrama do Processo de Otimização dos Algoritmos Genéticos..... 45
Figura 8 – Estrutura Hierárquica dos Lobos Cinzentos..... 49
Figura 9 – Vetores de Posição em 2D e 3D das Possíveis Próximas Localizações de um Lobo..... 50
Figura 10 – Atualização do Posicionamento no Método de Lobos Cinzentos..... 52
Figura 11 – Diagrama do Processo de Otimização dos Lobos Cinzentos..... 52
Figura 12 – Representação Gráfica do Processo de Busca do Método de Pontos Interiores Primal-Dual..... 57
Figura 13 – FDP e FDA de uma Variável Aleatória Gaussiana Contínua..... 59
Figura 14 – Diagrama do Processo de Otimização do Método Híbrido..... 61
Figura 15 – Aplicação do Método da Roleta..... 62
Figura 16 – Codificação de um Indivíduo Solução para os Métodos Metaheurísticos..... 63
Figura 17 – Diagrama do Alimentador de 37 Barras..... 76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estoque Global de Carros Elétricos (2010 - 2019)..... 33
Gráfico 2 – Estoque global de VEs no Cenário de Políticas Declaradas (2019 - 2030)..... 33
Gráfico 3 – Estoque global de VEs no Cenário de Desenvolvimento Sustentável (2019 e 2030)..... 34
Gráfico 4 – Curva de Carregamento de uma Bateria de Íon Lítio..... 36
Gráfico 5 – Curva de Capacidade de Geração de um Gerador Síncrono..... 43
Gráfico 6 – Curva de Capacidade de Geração de um Gerador Síncrono Linearizada..... 68
Gráfico 7 – Função Massa de Probabilidade do Tráfego de Veículos em Translado..... 77
Gráfico 8 – Função Distribuição Acumulada do Estado de Carga Inicial para PHEV e BEV..... 78
Gráfico 9 – Função Massa de Probabilidade do Estado de Carga Inicial para PHEV e BEV..... 79
Gráfico 10 – Comparação entre Curva de Carregamento Real e Simulada para VE em 30% de SOC Inicial para t'=1..... 82
Gráfico 11 – Comparação entre Curva de Carregamento Real e Simulada para VE em 30% de SOC Inicial para t'=0,55861..... 82
Gráfico 12 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Algoritmos Genéticos - Pontos Interiores (t'=1)..... 88
Gráfico 13 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Algoritmos Genéticos - Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 88
Gráfico 14 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)..... 93
Gráfico 15 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 94
Gráfico 16 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)..... 97

Gráfico 17 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)..... 97
Gráfico 18 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 98
Gráfico 19 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 98
Gráfico 20 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)..... 100
Gráfico 21 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)..... 101
Gráfico 22 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 101
Gráfico 23 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 102
Gráfico 24 – Custo Operacional para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)..... 104
Gráfico 25 – Perdas para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)..... 104
Gráfico 26 – Custo Operacional para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)..... 105
Gráfico 27 – Perdas para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)..... 105
Gráfico A.1 – Curva de Convergência do Método AG-PI (t'=1)..... 116
Gráfico A.2 – Curva de Convergência do Método AG-PI (t'=0,5586)..... 116
Gráfico A.3 – Curva de Convergência do Método LC-PI (t'=1)..... 117
Gráfico A.4 – Curva de Convergência do Método LC-PI (t'=0,5586)..... 117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de Geração Distribuída..... 40
Tabela 2 – Parâmetros do Problema da Mochila..... 46
Tabela 3 – Inicialização do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila..... 46
Tabela 4 – Iterações 1 e 2 do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila..... 47
Tabela 5 – Iterações 3 e 4 do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila..... 47
Tabela 6 – Inicialização do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila..... 53
Tabela 7 – Iterações 1 e 2 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila..... 53
Tabela 8 – Iterações 3 e 4 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila..... 53
Tabela 9 – Cálculo dos Parâmetros para o Lobo 2 na Iteração 1 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila..... 54
Tabela 10 – Exemplo de um Indivíduo Solução para os Métodos Metaheurísticos..... 63
Tabela 11 – Demanda do Alimentador (parte 1 de 2)..... 75
Tabela 12 – Demanda do Alimentador (parte 2 de 2)..... 76
Tabela 13 – Base de Dados de VEs (parte 1 de 2)..... 80
Tabela 14 – Base de Dados de VEs (parte 2 de 2)..... 81
Tabela 15 – Custo Operacional (R$/kW) Horário dos Geradores Distribuídos.... 83
Tabela 16 – Fator de Carga e Custo Operacional da Subestação..... 84
Tabela 17 – Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)..... 84
Tabela 18 – Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 84
Tabela 19 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1) 85

Tabela 20 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)..... 86
Tabela 21 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861) (parte 1 de 2)..... 86
Tabela 22 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861) (parte 2 de 2)..... 87
Tabela 23 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 87
Tabela 24 – Comparativo de Sistemas para o Método AG-PI (t'=1)..... 89
Tabela 25 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método AG-PI (t'=1)..... 89
Tabela 26 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método AG-PI (t'=1)..... 89
Tabela 27 – Comparativo de Sistemas para o Método AG-PI (t'=0,55861)..... 89
Tabela 28 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método AG-PI (t'=0,55861)..... 90
Tabela 29 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método AG-PI (t'=0,55861)..... 90
Tabela 30 – Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1).. 90
Tabela 31 – Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 90
Tabela 32 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)..... 91
Tabela 33 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1) (parte 1 de 2)..... 91
Tabela 34 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1) (parte 2 de 2)..... 92
Tabela 35 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 92
Tabela 36 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)..... 93
Tabela 37 – Comparativo de Sistemas para o Método LC-PI (t'=1)..... 94

Tabela 38 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método LC-PI (t'=1)..... 94
Tabela 39 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método LC-PI (t'=1)..... 95
Tabela 40 – Comparativo de Sistemas para o Método LC-PI (t'=0,55861)..... 95
Tabela 41 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método LC-PI (t'=0,55861)..... 95
Tabela 42 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método LC-PI (t'=0,55861)..... 95
Tabela 43 – Comparativo do Sistema Otimizado para os Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)..... 103
Tabela 44 – Comparativo do Sistema Otimizado para os Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)..... 103
Tabela A.1 – Demanda Horária das Estações de Carregamento de VEs..... 118
Tabela A.2 – Níveis de Tensão Horário de cada Barra para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 119
Tabela A.3 – Níveis de Tensão Horário de cada Barra para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 120
Tabela A.4 – Corrente Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 121
Tabela A.5 – Corrente Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 122
Tabela A.6 – Fluxo de Potência Ativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 123
Tabela A.7 – Fluxo de Potência Ativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 124
Tabela A.8 – Fluxo de Potência Reativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 125
Tabela A.9 – Fluxo de Potência Reativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 126
Tabela A.10 – Níveis de Tensão Horário de cada Barra para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 127

Tabela A.11 – Níveis de Tensão Horário de cada Barra para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 128
Tabela A.12 – Corrente Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 129
Tabela A.13 – Corrente Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 130
Tabela A.14 – Fluxo de Potência Ativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 131
Tabela A.15 – Fluxo de Potência Ativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 132
Tabela A.16 – Fluxo de Potência Reativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)..... 133
Tabela A.17 – Fluxo de Potência Reativa Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)..... 134
Tabela A.18 – Parâmetros Físicos do Alimentador..... 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos Genéticos
AG-PI	Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores
AMPL	*A Mathematical Programming Language*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV	*Battery Electric Vehicles*
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil
GD	Gerador Distribuído
GEE	Gases do Efeito Estufa
ECVE	Estações de Carregamento de Veículos Elétricos
EP	Enxame de Partículas
E-REV	*Extended Range Electric Vehicle*
FCEV	*Fuel Cell Electric Vehicle*
FDA	Função de Distribuição Acumulada
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FMP	Função Massa de Probabilidade
HEV	*Hibrid Electric Vehicle*
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IPOPT	*Interior Point Optimizer*
LC	Lobos Cinzentos
LC-PI	Lobos Cinzentos – Pontos Interiores
MATLAB	*Matrix Laboratory*

PI	Pontos Interiores
PHEV	*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RPEV	*Road Powered Electric Vehicle*
SOC	*State of Charge*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VE	Veículo Elétrico
VER	Veículos Eletricamente Recarregáveis
PLDV	*Passenger Light-duty Vehicle*
LCV	*Light Commercial Vehicle*

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Instante de Tempo - (h)
T	Nº Total de Horas Considerado - (h)
B	Nº de Barras
B_i	Barra Emissora
B_j	Barra Receptora
G	Nº de GDs
E	Nº de ECVEs
N	Nº de VEs
Δt	Período de Tempo entre dois Instantes Consecutivos - (h)
Cs	Custo de Geração da Subestação - (R$/kW)
Ps	Potência Ativa Fornecida pela Subestação - (kW)
Qs	Potência Reativa Fornecida pela Subestação - (kvar)
Cg	Custo de Geração do GD - (R$/kW)
d	Estado de Conexão do GD
Pg	Geração de Potência Ativa do GD - (kW)
Pgn	Geração de Potência Ativa do GD de número 'n' - (kW)
Qg	Geração de Potência Reativa do GD - (kvar)
Qgn	Geração de Potência Reativa do GD de número 'n'- (kvar)
Pg_M	Potência Ativa Máxima Fornecida pelo GD - (kW)
Qg_m	Potência Reativa Mínima Fornecida pelo GD - (kvar)
Qg_M	Potência Reativa Máxima Fornecida pelo GD - (kvar)
Pg_n	Capacidade de Fornecimento de Potência Ativa do GD no Ponto de Nº 'n' - (kW)
Qg_n	Capacidade de Fornecimento de Potência Reativa do GD no Ponto de Nº 'n' - (kvar)
ΔPg_d	Máximo Decrescimento de Geração de Potência Ativa em Δt - (kW/h)
ΔPg_c	Máximo Crescimento de Geração de Potência Ativa em Δt - (kW/h)
P	Potência Ativa Fluindo no Ramo - (kW)
Q	Potência Reativa Fluindo no Ramo - (kvar)
P_j	Demanda de Potência Ativa da Barra Receptora - (kW)

Q_j	Demanda de Potência Reativa da Barra Receptora - (kvar)
R	Resistência do Ramo – (Ω)
X	Reatância do Ramo – (Ω)
Z	Impedância do Ramo – (Ω)
V	Tensão na Barra - (kV)
I	Corrente no Ramo - (A)
I_M	Capacidade de Corrente do Ramo - (A)
V_m	Tensão Mínima na Barra - (kV)
V_M	Tensão Máxima na Barra - (kV)
fp_m	Fator de Potência Capacitivo Mínimo da Subestação
fp_M	Fator de Potência Indutivo Mínimo da Subestação
ce	Estado de Conexão das ECVEs
cv	Estado de Conexão do VE
Pv	Potência de Carregamento do VE - (kW)
Pv_M	Máxima Potência de Carregamento do VE - (kW)
ΔPv	Máxima Variação da Potência de Carregamento do VE em Δt - (kW/h)
Pen	Demanda de Potência da ECVE de Nº 'n' - (kW)
Ev	Carga do VE - (kWh)
Ev_n	Carga Nominal do VE - (kWh)
S_i	Estado de Carga Inicial do VE - (%)
S_f	Estado de Carga Final Mínimo do VE - (%)
fc	Fator de Carga - (%)
η	Eficiência de Carregamento da ECVE - (%)
te	Instante de Tempo de Conexão do VE - (h)
ts	Instante de Tempo de Desconexão do VE - (h)
t'	Atraso na Segunda Etapa da Curva de Carregamento do VE - (h)
$\overrightarrow{X_p}(m)$	Localização da Presa na iteração ‘m’
$\vec{X}(m)$	Localização do Lobo na iteração ‘m’
$\vec{a}$	Valor aleatório decrescente entre [2,0]
$\overrightarrow{r_1}$ $\overrightarrow{r_2}$	Valores aleatórios entre [1,0]
$\overrightarrow{X_\alpha}(m)$	Localização do Lobo Alfa
$\overrightarrow{X_\beta}(m)$	Localização do Lobo Beta

$\overrightarrow{X_\delta}(m)$	Localização do Lobo Delta
z	Vetor de Variáveis pertencente ao espaço R^n
b	Vetor de Parâmetros pertencente ao espaço R^m
c	Vetor de Parâmetros pertencente ao espaço R^n
A	Matriz de Parâmetros pertencente ao espaço R^{mxn}
s	Vetor de Variáveis pertencente ao espaço R^m
μ	Parâmetro da Barreira
Z	Matriz Diagonal com as componentes do Vetor de Variáveis z
I_n	Vetor Unitário de 'n' dimensões
R^n	Espaço Coordenado Real de 'n' dimensões
R^m	Espaço Coordenado Real de 'm' dimensões
R^{mxn}	Espaço Coordenado Real de 'mxn' dimensões
$Pr(Y = y)$	Probabilidade da Variável Aleatória *Y* ser igual a *y*
$P_Y(y)$	Função Massa de Probabilidade da Variável Aleatória *Y*
$f_Y(y)$	Função Densidade de Probabilidade da Variável Aleatória *Y*
$F_Y(y)$	Função de Distribuição Acumulada da Variável Aleatória *Y*
$P_I(t)$	Potência de Carregamento do Primeiro Período de uma Bateria Li-Ion
P_{M}	Potência Máxima de Carregamento para um VE
E_I	Energia Fornecida no Primeiro Período de Carregamento da Bateria
$P_{II}(t)$	Potência de Carregamento do Segundo Período de uma Bateria Li-Ion
E_{II}	Energia Fornecida no Segundo Período de Carregamento da Bateria
t_a	Tempo de Término do Primeiro Período de Carregamento da Bateria
t_b	Tempo de Término do Segundo Período de Carregamento da Bateria
P_c	Potência de Carregamento da Bateria de Li-Ion em t_b

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 21
1.1 OBJETIVO GERAL..... 23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 23

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 26

3 CONCEITUALIZAÇÃO..... 30
3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS..... 30
3.1.1 Bateria de Íon-Lítio..... 34
3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... 36
3.2.1 Efeitos da Geração Distribuída..... 40
3.2.2 Gerador Síncrono..... 42
3.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO..... 43
3.3.1 Algoritmos Genéticos..... 44
3.3.2 Lobos Cinzentos..... 48
3.3.3 Método de Pontos Interiores Primal-Dual..... 55
3.4 VARIÁVEIS ESTOCÁSTICAS..... 57
3.4.1 Variável Discreta..... 57
3.4.2 Variável Contínua..... 58

4 METODOLOGIA..... 60
4.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA..... 60
4.2 TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS ESTOCÁSTICAS..... 61
4.3 MODELO DE SOLUÇÃO DOS MÉTODOS METAHEURÍSTICOS..... 62
4.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA..... 63
4.4.1 Função Objetivo..... 63
4.4.2 Restrições do Balanço de Potência..... 64
4.4.3 Restrições do Fornecimento de Potência da Subestação..... 67
4.4.4 Restrições de Fornecimento de Potência dos Geradores Distribuídos..... 68

4.4.5 Restrições da Demanda das Estações de Carregamento de Veículos Elétricos e de Estado de Carga do Veículo Elétrico..... 70

5 RESULTADOS..... 75
5.1 ALIMENTADOR..... 75
5.2 ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS..... 77
5.3 GERADORES DISTRIBUÍDOS..... 83
5.4 MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS – PONTOS INTERIORES..... 84
5.5 MÉTODO DE LOBOS CINZENTOS – PONTOS INTERIORES..... 90

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 96
6.1 MÉTODO HÍBRIDO ALGORITMOS GENÉTICOS-PONTOS INTERIORES..... 96
6.2 MÉTODO HÍBRIDO LOBOS CINZENTOS-PONTOS INTERIORES..... 99
6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS HÍBRIDOS..... 103

7 CONCLUSÃO..... 106

REFERÊNCIAS..... 109

APÊNDICES..... 115
APÊNDICE 1 – CURVAS DE CONVERGÊNCIA..... 116
APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DO ALIMENTADOR..... 118
APÊNDICE 3 – VARIÁVEIS PARA A SOLUÇÃO DO MÉTODO AG-PI..... 119
APÊNDICE 4 – VARIÁVEIS PARA A SOLUÇÃO DO MÉTODO LC-PI..... 127

ANEXOS..... 135
ANEXO 1 – PARÂMETROS DO ALIMENTADOR..... 136

1 INTRODUÇÃO

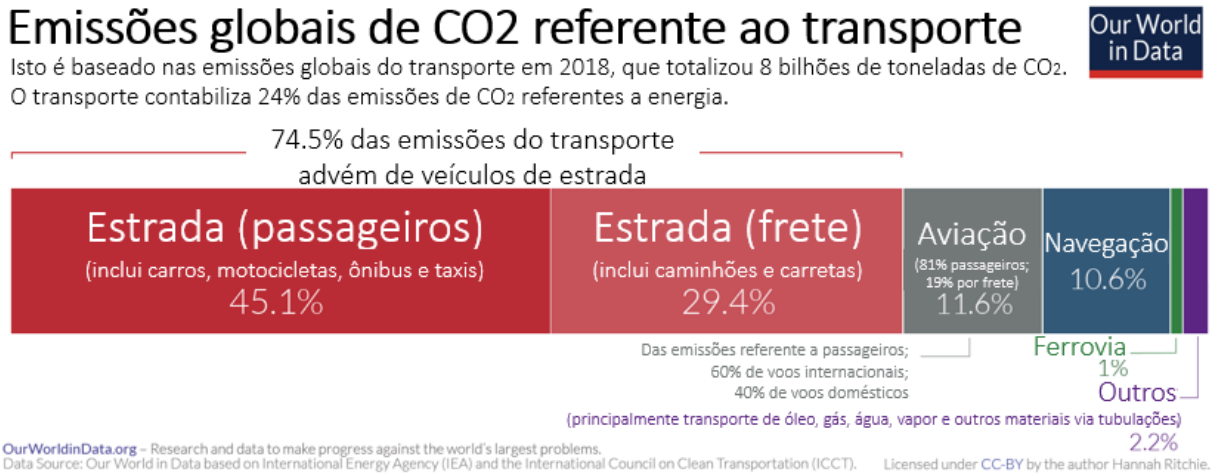
Na contemporaneidade, a busca pelo desenvolvimento sustentável se tornou um dos maiores desafios globais para se tentar preservar o meio ambiente, visando minimizar os impactos gerados pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas no decorrer dos anos (JACOBI; SULAIMA, 2017). Nesse sentido, há uma preocupação por parte dos governos e da sociedade a nível internacional em adotar políticas ecologicamente sustentáveis, com o objetivo de buscar fontes alternativas de energias limpas e renováveis na matriz energética global.

Durante décadas, a expansão da indústria automobilística afetou diretamente a poluição atmosférica ao redor do globo, sobretudo, em decorrência da ampla emissão de gases causadores do efeito estufa provenientes de motores cujo funcionamento é baseado no consumo de combustíveis fósseis. Consoante Meireles (2020), a emissão de gases poluentes advém "[...] da intensa queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão mineral) para o uso industrial, transporte urbano e geração de energia elétrica, por atividades agrícolas e pelo desmatamento de florestas tropicais".

Conforme Ritchie (2020), a emissão de CO_2 proveniente do setor de energia foi de 33,5 bilhões de toneladas, no ano de 2018. Desse total, o transporte foi responsável por 24%, o que corresponde a 8 bilhões de toneladas de CO_2. Outro dado relevante é que uma parcela significativa das emissões de transportes advém de veículos rodoviários (74,5%), conforme Figura 1.

Neste contexto, 195 países firmaram, em dezembro de 2015, o Acordo de Paris, por meio do qual foram estabelecidas metas para combater a crise climática e reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE). Dentre as metas previstas pela Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas destaca-se a implementação, até 2030, de transportes sustentáveis que reduzam a exploração desenfreada de combustíveis provenientes de fontes não renováveis, bem como a diminuição da emissão de gás carbônico, contribuindo, assim, para a melhoria da qualidade do ar atmosférico (PUC-SP, 2016).

Figura 1 – Emissões Globais de CO_2 Provenientes do Transporte em 2018



Fonte: RITCHIE, 2020.

No caso do Brasil, o país se comprometeu a reduzir, até o ano de 2025, 37% da emissão dos gases do efeito estufa, ampliando para uma meta de 43% até 2030 (MEIRELES, 2020). Para que seja possível alcançar os resultados desejados, é necessário investir na melhoria da infraestrutura dos transportes, bem como implementar ações de reestruturação nos "[...] sistemas de mobilidade urbana e priorizar o planejamento para reduzir o uso de combustível de base fóssil no transporte, entre outras iniciativas". (PUC-SP, 2016).

Dentre as alternativas que vêm sendo adotadas por vários países com o escopo de melhorar a mobilidade, reduzir o tráfego e, por conseguinte, mitigar a poluição ocasionada pelos automóveis, é possível destacar o incentivo pela maior utilização de transportes coletivos, bem como a adoção de meios de transporte menos poluentes, tais como bicicletas e veículos elétricos, reduzindo, assim, o impacto dos transportes sobre o meio ambiente e a saúde pública de uma maneira geral (PUC-SP, 2016).

Nesse sentido, conforme Castro e Ferreira (2010), fatores como as preocupações com o meio ambiente, a segurança energética dos países e a volatilidade do mercado de petróleo fizeram com que os veículos elétricos se tornassem uma alternativa com menor impacto ambiental e mais eficiência, visando substituir os veículos a combustão. Atrelado a isso, é também de extrema relevância o investimento em alternativas renováveis de geração de energia (LOCH; HENKES, 2014), uma vez que, na hipótese de adesão em ampla escala dos veículos elétricos, consequentemente

haverá um aumento da demanda por energia, sendo necessário investir em infraestrutura na geração e distribuição de energia elétrica mediante o emprego de fontes sustentáveis e não poluentes, “[...] pois do contrário os ganhos ambientais na troca da combustão pela eletrificação, não serão expressivos” (THEOTONIO, 2018).

Assim sendo, faz-se necessário convergir a implementação de energia renovável à concepção de geração distribuída, como uma forma de mitigar os efeitos gerados pela elevada emissão de gases poluentes intrínsecos ao sistema de geração convencional, cujo funcionamento é, na maioria das vezes, dependente de recursos naturais não renováveis [(WANG *et al,* 2018) (POUDINEH; JAMASB, 2014) (RABIEE *et al* 2016)].

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O principal objetivo do presente estudo é, portanto, propor um método de otimização com a função de realizar a alocação, em uma rede de distribuição de energia elétrica, de Estações de Carregamento de Veículos Elétricos (ECVEs) e Geradores Distribuídos (GDs) conectados à rede através de geradores síncronos, bem como efetuar o despacho econômico ótimo desses GDs, a fim de minimizar o custo operacional do sistema.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dessa forma, para realizar a alocação dos GDs e das ECVEs, em consonância com o objetivo geral do trabalho, tem-se como objetivos específicos: propor o emprego de dois métodos híbridos, o Método de Algoritmos Genéticos-Pontos Interiores (AG-PI), que corresponde a uma combinação entre o Método de Algoritmos Genéticos (AG) e o Método de Pontos Interiores Primal-Dual (PI) e o método de Lobos Cinzentos-Pontos Interiores (LC-PI), que associa o Método de Lobos Cinzentos (LC) com o método PI; analisar a eficiência dos referidos métodos na solução do problema em questão; identificar e comparar a qualidade de seus resultados, bem como seus tempos de processamento.

A aplicação de ambos os métodos será análoga, onde o método metaheurístico utilizado executará a alocação dos geradores e estações de carregamento, cujo retorno é um resultado de qualidade excelente na vizinhança da solução ótima global, enquanto o despacho econômico dos GDs e da subestação de energia será realizado pelo método PI, um método analítico, que retorna a solução ótima global para um perfil específico de alocação.

O perfil de alocação otimizado é determinado pelo método metaheurístico correspondente através do programa “MATLAB” (*Matrix Laboratory*) (MATLAB, 2021), enquanto o despacho ótimo dos geradores e da subestação é realizado através do AMPL (*A Mathematical Programming Language*) (AMPL, 2021) utilizando solver “*Interior Point Optimizer*” (ipopt), o qual emprega o método PI como forma de solucionar problemas de programação linear e não linear.

Embora seja possível utilizar outros métodos para alcançar a solução desse problema, os métodos híbridos propostos se destacam por usufruir tanto das características dos métodos clássicos, quanto das características dos métodos metaheurísticos de maneira a permitir a otimização de problemas não convexos para uma solução somente por método clássico, para alimentadores com um maior número de barras, bem como com um menor número de variáveis e tempo de processamento, alcançando a otimalidade de parte da solução. A partir de simulações realizadas é possível constatar que, conforme a permissão das condições de convexidade no espaço de busca e das características do problema formulado, caso fosse empregado apenas o método clássico, seria possível obter o resultado ótimo de todo o problema, todavia, o tempo de processamento e o número de variáveis poderiam se tornar inviáveis.

Referido tema é dotado de relevância acadêmica, política, econômica e socioambiental. Em relação à contribuição acadêmica, visa propor duas metodologias híbridas, a partir de métodos já conhecidos, que combinará técnicas clássicas e metaheurísticas para a solução de problemas de otimização, garantindo a convexidade do espaço de busca que, por sua vez, não seria garantido caso fosse resolvido totalmente por um método clássico, mantendo a otimalidade global de parte

da solução. No que tange à relevância política, tem por objetivo contribuir com uma ferramenta de tomada de decisão de políticas de incentivo das concessionárias locais no que diz respeito à alocação de GDs e ECVEs, além do despacho de potência dos geradores. Com relação à relevância econômica, este estudo tem por justificativa reduzir o custo operacional do sistema de energia utilizado para o carregamento desses automóveis. Por fim, a contribuição socioambiental está relacionada ao incentivo pela implementação e difusão desses meios de transporte, os quais, em junção com a geração distribuída, empregam tecnologias limpas e sustentáveis e, consequentemente, reduzem a emissão de gases poluentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No que diz respeito aos métodos de otimização aplicados para solucionar problemas relacionados a sistemas de potência, são empregadas tanto técnicas metaheurísticas, quanto clássicas em diferentes aplicações. Neste sentido, Zhang e outros (2017) fazem uso do método PI para coordenar o carregamento de Veículos Elétricos (VEs) a fim de minimizar perdas da distribuição em um sistema desbalanceado, tomando como restrições a demanda de carregamento e limites de tensão e corrente. A aplicação se mostrou eficiente na redução das perdas mesmo para uma otimização de larga escala.

Menezes, Soriano e Aquino (2021) também aplicam o método PI na solução do agendamento operacional diário e preço marginal locacional de um sistema de distribuição na presença de geração hídrica, térmica, eólica e solar, além de um sistema de armazenamento de energia com o objetivo de reduzir os impactos causados pela restrição de geração de sistemas eólica. A técnica se mostrou efetiva, fornecendo uma curva de preço marginal locacional e causando a redução dos custos operacionais e das restrições de geração do sistema eólico.

O método AG que se baseia na teoria da evolução de Charles Darwin foi abordado em Wang e outros (2018), que implementaram o gerenciamento otimizado em uma microrrede inteligente composta por geradores fotovoltaicos. Além disso, empregaram sistemas combinados de potência, aquecimento e resfriamento, bem como sistemas de armazenamento e resposta à demanda, com o objetivo de estudar a estratégia de agendamento ótimo dessas unidades e reduzir o custo operacional. Os autores validaram seu modelo e sua praticabilidade pelo método AG verificando que a microrrede inteligente é mais diversa com uma maior inteligência de sistema e capacidade de autorregulação do que o sistema tradicional, concluindo, assim, a importância que a resposta a demanda e outras técnicas de ajuste ao mercado possuem nestes tipos de redes.

Uma aplicação do método LC, que simula o processo de caça dos lobos cinzentos, foi empregado no trabalho de Sultana e outros (2016). Por sua vez, Ali, Abd-Elazim e

Abdelaziz (2018) implementaram uma nova técnica conhecida como Método de Formiga Leão, a qual imita o comportamento das formigas leões no aprisionamento de formigas comuns. Ambas as técnicas foram empregadas objetivando otimizar a alocação e dimensionamento de GDs visando a redução das perdas de potência reativa e a melhoria do perfil de tensão (SULTANA *et al*, 2016) e a redução das perdas de potência ativa (ALI; ABD-ELAZIM; ABDELAZIZ, 2018). Quando comparado com outros métodos, os dois algoritmos se mostraram superiores na solução do problema de seus respectivos trabalhos.

O método LC é novamente empregado por Shabbar, Kasasbeh e Ahmed (2021) para realizar a alocação de ECVEs modeladas estocasticamente e realizar o planejamento de infraestrutura. A alocação das ECVEs é realizada visando maximizar o lucro tendo como restrições as despesas e o roteamento. O modelo foi capaz de simular um cenário realístico fornecendo uma estimação precisa do lucro do sistema.

O Método de Enxame de Partículas (EP) é empregado em Rabiee e outros (2016) visando realizar um modelo de programação de VEs e cargas responsivas, cargas variáveis que podem ter seu estado de operação alterado ou serem conectadas e desconectas de acordo com a demanda atual do alimentador, em uma microrrede composta por geração fotovoltaica e eólica desejando a redução da emissão de gases e dos custos operacionais. Nesta metodologia, o autor propõe fazer uso das baterias dos VEs conectados à rede para alterar a curva de carga e ceifar os picos de demanda, enquanto as cargas responsivas são utilizadas como reserva de energia para contrabalancear as incertezas intrínsecas às gerações eólicas e fotovoltaica. As simulações se mostraram positivas ao confirmar os benefícios da técnica em reduzir o custo operacional e emissões ao realizar a programação dos VEs e cargas responsivas.

O método EP também é utilizado por Jamian, Mustafa, Mokhlis (2015), onde é combinado com o Método de Programação Evolutiva criando um método híbrido denominado Enxame de Partículas Evolutivo Ranqueado para acelerar a velocidade da busca do método EP convencional. A nova técnica é empregada para a realização do despacho econômico ótimo dos GDs na rede visando a minimização das perdas

do sistema. O novo método foi comparado com outras variações do EP, aonde retornou resultados semelhantes, mas com um menor desvio padrão, com menos iterações e um menor tempo de processamento que as demais.

A combinação de dois métodos objetivando melhores resultados, como realizado acima, são comumente empregados em problemas de otimização em sistemas de potência. Em Ahmadian e outros (2016), o método EP é combinado com o Método da Busca Tabu para realizar o planejamento de um sistema de geração distribuída eólica pautado em uma geração flexível de potência ativa e reativa em uma rede com a presença de cargas de VEs para contornar problemas relacionados à regulação de tensão. O novo método foi comparado com o método EP original, o que comprovou sua maior eficiência.

Por fim, em Cailian e outros (2015), o Método de Colônia de Formigas é combinado com o Método AG para alocar e definir a capacidade do GD no fornecimento de potência reativa para melhorar o perfil de tensão de um alimentador. As simulações concluíram que o método híbrido se mostrou mais eficiente na solução do problema em comparação aos métodos originais no quesito velocidade de busca e performance.

Tendo em vista as literaturas apresentadas, foi observado que o método PI apresenta ótimos resultados em problemas relacionados a GDs e ECVEs, garantindo soluções ótimas para o problema. Contudo, possui a limitação de exigir uma modelagem matemática do problema mais complexa, como o balanceamento de potência, a correlação das diversas variáveis presentes no sistema, além do comportamento da dinâmica de cada gerador e carga. Além disso, possui a limitação de ser aplicada somente quando a convexidade do espaço de busca é garantida.

Em relação aos métodos metaheurísticos, destaca-se a sua modelagem matemática mais simples, além de possuir uma maior aplicabilidade nestes tipos de problema e, por conseguinte, estar mais presente na literatura, principalmente no que diz respeito a métodos mais consagrados como os AG e EP. Entretanto, a não garantia de uma solução ótima global é a principal desvantagem de tais métodos.

Métodos metaheurísticos mais recentes como o LC e Formiga Leão começaram a ser empregados em diversos problemas e comparados com outros métodos de otimização já consagrados, apresentando, normalmente, bons resultados. Por exemplo, o método LC demonstra conseguir lidar melhor com problemas de grande porte, o que, normalmente, é uma dificuldade para o método AG convencional.

Ademais, destaca-se a utilização de metodologias híbridas com o objetivo de alcançar um melhor resultado ou uma melhoria relevante no processo ao combinar características de métodos diferentes visando compensar suas fraquezas. Um exemplo disso, é a combinação do método de Colônia de Formigas, que possui como característica uma maior velocidade de busca nas últimas iterações, com o método AG, que tem como característica o oposto, com o objetivo de gerar um método com uma boa velocidade de busca no decorrer de todo o processo.

Contudo, nenhuma das bibliografias apresentou um método híbrido que combinasse métodos de otimização pertencentes a diferentes classes (clássico e metaheurístico). Dessa forma, no presente trabalho, optou-se por utilizar a combinação de métodos de ambas as classes com o intuito de contribuir para a solução de problemas de otimização que não são factíveis através de um método clássico que, combinado com um método metaheurístico, visa garantir a convexidade do espaço de busca, mantendo a otimalidade global de parte da solução.

3 CONCEITUALIZAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os conceitos teóricos relevantes para o referido trabalho.

3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

De modo geral, os VEs constituem em automóveis caracterizados pela ausência de emissão de gases poluentes, uma vez que não utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia de propulsão (SANTOS, 2020). Nas palavras de Denton (2018), “veículos elétricos (VEs) ou veículos eletricamente recarregáveis (VERs) geralmente se referem a qualquer veículo que é alimentado, parcialmente ou por completo, por uma bateria que pode ser ligada diretamente à rede de energia elétrica”.

Os VEs são categorizados em quatro tipos (ACCENTURE, 2017): VEs puros (BEVs - *Battery Electric Vehicles*), VEs híbridos, VEs movidos a célula de hidrogênio (FCEVs - *Fuel Cell Electric Vehicle*) e os VEs alimentados por cabos externos (RPEVs – *Road Powered Electric Vehicle*).

Os BEVs são constituídos por motor elétrico e bateria de íons de lítio com grande capacidade, cuja fonte de energia é externa ao veículo, normalmente a rede de distribuição de energia elétrica (ACCENTURE, 2017). A máquina elétrica que caracteriza o motor utilizado para propelir o veículo, também, pode ser utilizada como gerador ao recuperar energia para a bateria pelo processo de frenagem (SANTOS, 2020). Devido ao grande custo com bateria, boa parte destes veículos a preços mais acessíveis possuem autonomia elétrica pequena a média em comparação aos veículos convencionais a combustão interna (ACCENTURE, 2017).

Por sua vez, os VEs híbridos têm um princípio operacional semelhante aos BEVs, mas com a utilização de um motor a combustão interna em conjunto com o motor elétrico. Este motor a combustão pode ser aplicado em série, onde é utilizado para fornecer

energia ao motor elétrico que possui a função de mover o veículo, ou pode ser aplicado em paralelo, onde ambos são utilizados para movimentar o veículo.

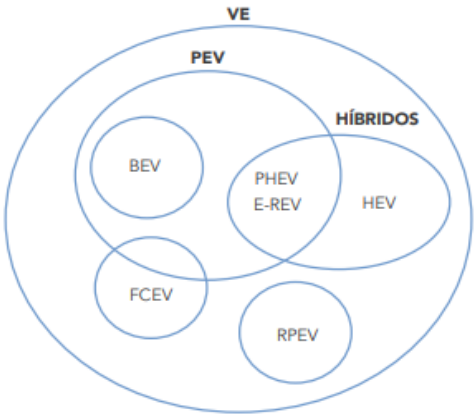
O referido tipo de VE é dividido em três subcategorias (ACCENTURE, 2017). Em primeiro lugar, tem o VE híbrido puro (HEV – *Hibrid Electric Vehicle*), o qual se caracteriza pela aplicação do motor a combustão em paralelo, sendo este o motor principal, enquanto o motor elétrico possui a função de melhorar a eficiência do motor a combustão permitindo que ele opere no seu ponto mais eficiente. O motor elétrico possui como única fonte de energia o sistema de frenagem regenerativa do veículo (ACCENTURE, 2017). Em segundo lugar, tem o VE híbrido *plug-in* (PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), o qual opera de maneira análoga ao HEV com o acréscimo da possibilidade de o motor elétrico receber energia diretamente de uma fonte externa (ACCENTURE, 2017). Por último, tem-se o VE híbrido de longo alcance (E-REV – *Extended Range Electric Vehicle*), cujos motores estão dispostos em série, sendo que o motor elétrico (principal) recebe energia de uma fonte externa, enquanto o motor a combustão tem como função o fornecimento de energia, visando garantir um nível mínimo de carga na bateria para a operação estendida do veículo (ACCENTURE, 2017).

Quanto aos FCEVs, estes utilizam como fonte geradora de energia elétrica a célula a combustível, em que os agentes químicos são fornecidos e consumidos de maneira contínua, combinando oxigênio e hidrogênio para viabilizar o funcionamento do motor (SANTOS, 2020). Com relação aos RPEVs estes têm como principal aspecto a utilização de cabos externos conectados de maneira direta para fornecer energia ao veículo (ACCENTURE, 2017).

No que tange às vantagens da utilização dos VEs, é possível destacar a baixa emissão de gases poluentes, gerando um menor impacto ambiental; a redução da poluição sonora; o baixo custo de manutenção; além de proporcionar um melhor desempenho e maior eficiência do motor (THEOTONIO, 2018). Na Figura 2 é ilustrado um esquema relacionando todos os tipos de VEs.

Apesar dos benefícios apontados, os modelos elétricos possuem algumas desvantagens, tais como o elevado preço de aquisição; a carência de infraestrutura de recarga; o alto custo das baterias, bem como o elevado tempo para o seu carregamento; fatores estes que inibem a implantação desses veículos em ampla escala (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015).

Figura 2 – Tipos de VEs



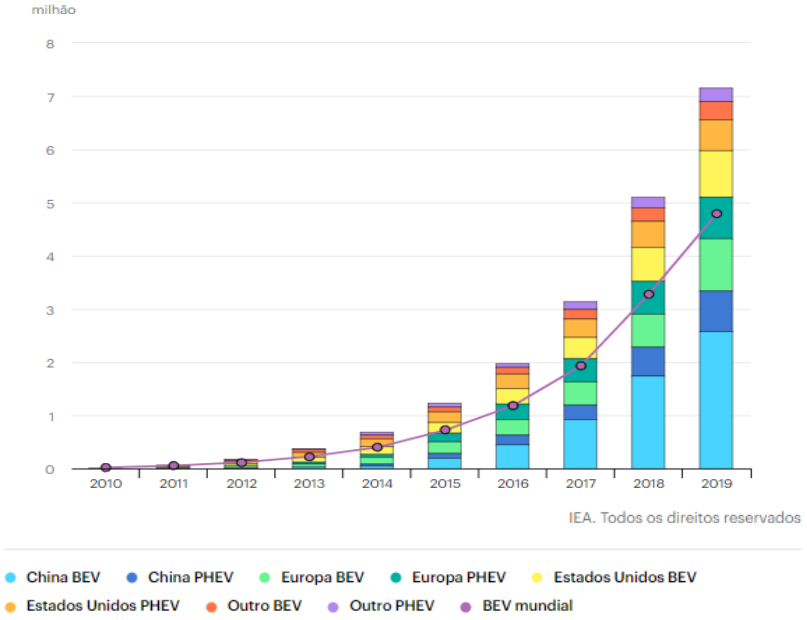
Fonte: ACCENTURE, 2017.

Outros aspectos que merecem atenção são os desafios relacionados à adoção desses tipos de veículos. Dentre os principais pontos, é interessante destacar a questão relacionada à origem da matriz energética, isso porque, para que os VEs atinjam o benefício ambiental almejado, é necessário a utilização de matrizes de geração de energia limpa (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015). Além disso, deve-se levar em consideração a necessidade de ampliar a oferta de energia em razão do aumento da demanda advinda da difusão desses automóveis, sendo de suma importância aumentar o "investimento em infraestrutura na geração e distribuição" de energia elétrica (THEOTONIO, 2018). Por fim, considera-se relevante tornar a logística de produção mais eficiente, incluindo nesse processo o barateamento dos insumos utilizados para a fabricação desses veículos (THEOTONIO, 2018).

Não obstante, o estoque global de VEs vem aumentando exponencialmente na última década, como observado no Gráfico 1, onde atualmente a quantidade de carros no mundo supera a marca de 7,17 milhões. Mais impressionante é a expectativa para a próxima década apresentada nos Gráficos 2 e 3, onde a quantidade de VEs, no ano 2030, é estimada em 138,5 milhões para o cenário de políticas declaradas (aumento

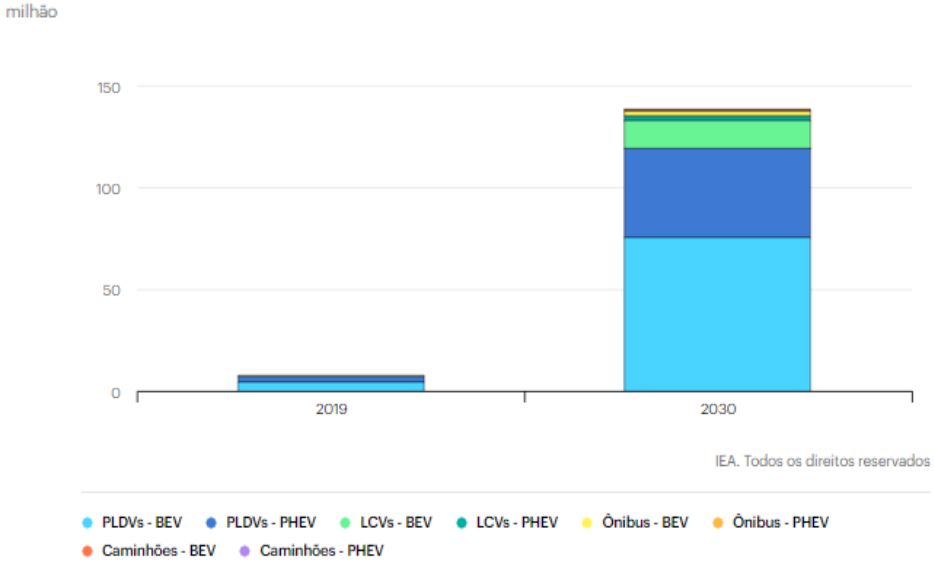
de aproximadamente 1831%) e em 244,6 milhões para o cenário de desenvolvimento sustentável (aumento de aproximadamente 3311%), estes veículos são classificados em veículos leves de passageiros (PLDVs – *Passenger Light-duty Vehicles*), veículos leves comerciais (LCVs – *Light Commercial Vehicles*), ônibus e caminhões. Ademais, consoante Haidar, Muttaqi e Sutanto (2014), os PHEVs, dentre todos os tipos de VEs, foram os que se tornaram uma das melhores opções de modelo de VE, uma vez que tem o potencial de ser mais eficiente, por possuir uma maior economia de combustível.

Gráfico 1 – Estoque Global de Carros Elétricos (2010 - 2019)



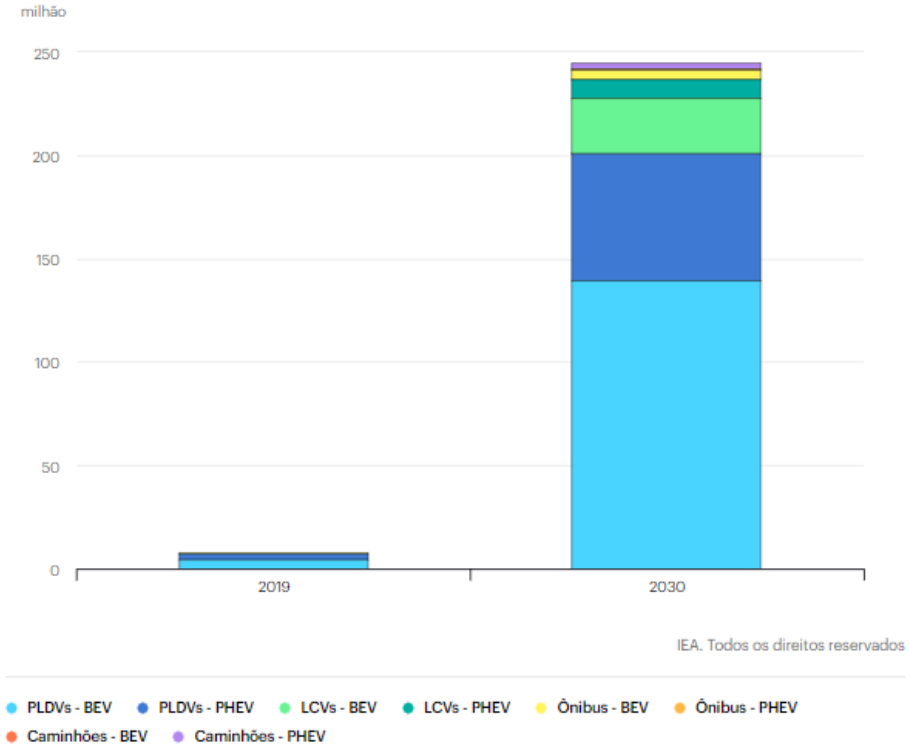
Fonte: IEA, 2020.

Gráfico 2 – Estoque global de VEs no Cenário de Políticas Declaradas (2019 - 2030)



Fonte: IEA, 2020.

Gráfico 3 – Estoque global de VEs no Cenário de Desenvolvimento Sustentável (2019 - 2030)



Fonte: IEA, 2020.

3.1.1 Bateria de Íon-Lítio

Uma das baterias comumente utilizadas em VEs é a bateria de Íon-Lítio (Li-Ion) que utiliza os íons de lítio como base para sua dinâmica eletroquímica. Essa bateria se destaca pela sua alta densidade de energia, baixa taxa de autodescarga e capacidade de fornecimento de potência, além de não possuir o efeito memória, comum a outros tipos de baterias como a Níquel-Cádmio (NiCd) e Hidreto Metálico de Níquel (NiMh). Por outro lado, essa bateria possui tendência de sobreaquecimento; a necessidade de mecanismos de proteção que aumentam seu peso e diminuem sua performance; a perda de capacidade com seu envelhecimento; e seu preço, cerca de 40% superior à bateria NiCd (CEI, acesso em 04 set. 2021).

A curva de carregamento de uma bateria Li-Ion é separada em dois períodos ou etapas, o primeiro onde é fornecido uma potência constante de carregamento e um segundo onde essa potência passa por um decaimento exponencial. As equações do

primeiro período são apresentadas em (1) e (2), e as do segundo estão em (3), (4), (5), (6) e (7) (OLIVELLA-ROSELL, 2015).

Primeiro período de carregamento:

$$P_I(t) = P_{\mathrm{M}} \tag{1}$$

$$E_I = \int_0^{t_a} P_{\mathrm{M}}\, dt \tag{2}$$

Onde $P_I(t)$ representa a potência de carregamento no primeiro período do carregamento para um instante de tempo t; P_{M} é a potência máxima de carregamento para um VE; E_I é a energia fornecida à bateria do VE na primeira etapa e t_a indica o instante de tempo em que o primeiro período de carregamento termina.

Segundo período de carregamento:

$$P_{II}(t) = k\ e^{-\lambda t}; \tag{3}$$

$$E_{II} = \int_{t_a}^{t_b} k\ e^{-\lambda t}\, dt; \tag{4}$$

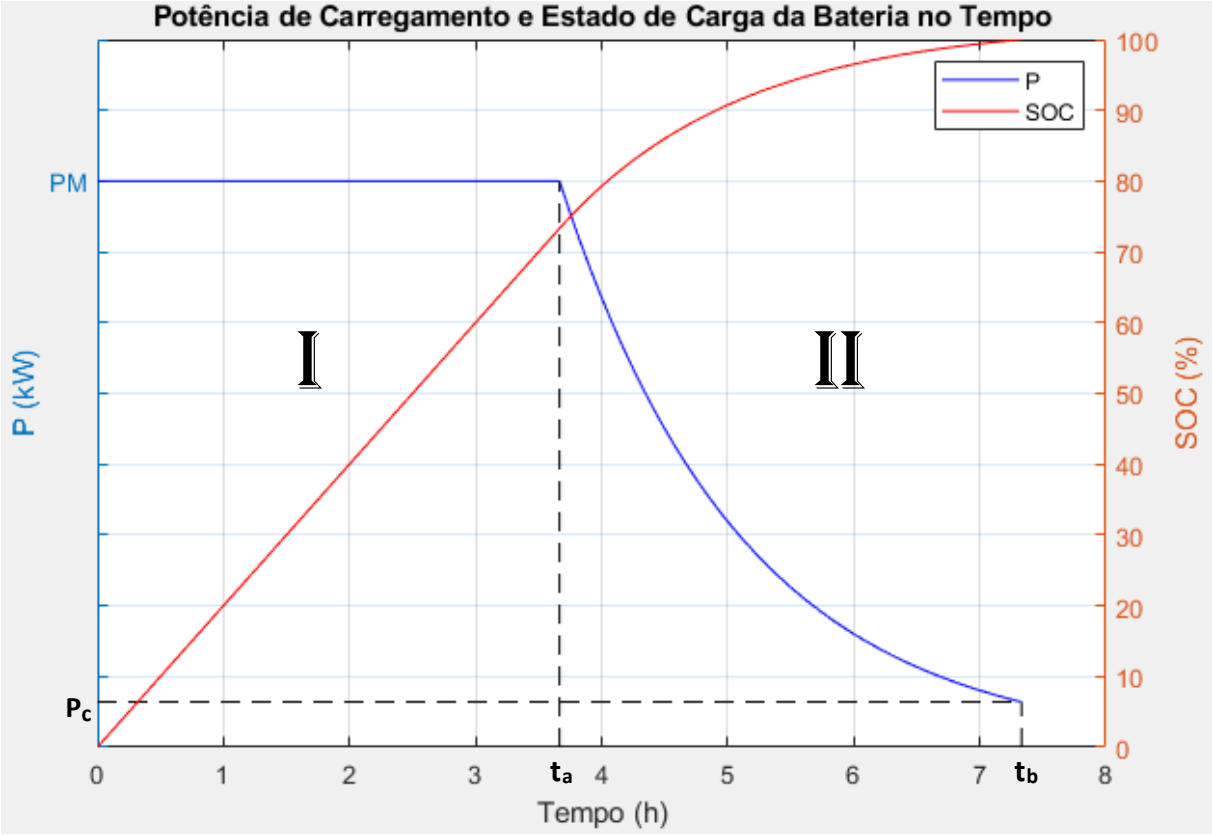
$$\lambda = \frac{-ln(0.08)}{t_a}; \tag{5}$$

$$k = \frac{P_{\mathrm{M}}}{0.08}; \tag{6}$$

$$P_c = 0.08\ P_M; \tag{7}$$

Sendo $P_{II}(t)$ a potência de carregamento no segundo período de carga para um instante de tempo t; E_{II} representando a energia fornecida à bateria do VE nesta etapa do processo de carga; λ e k são as constantes da equação exponencial que define $P_{II}(t)$; t_b é o instante de tempo final do segundo período de carga; e P_c é a potência de carregamento quando t é igual a t_b. A curva de carregamento geral de uma bateria de Li-Ion é observada no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Curva de Carregamento de uma Bateria de Íon Lítio



Fonte: Produção do próprio autor.

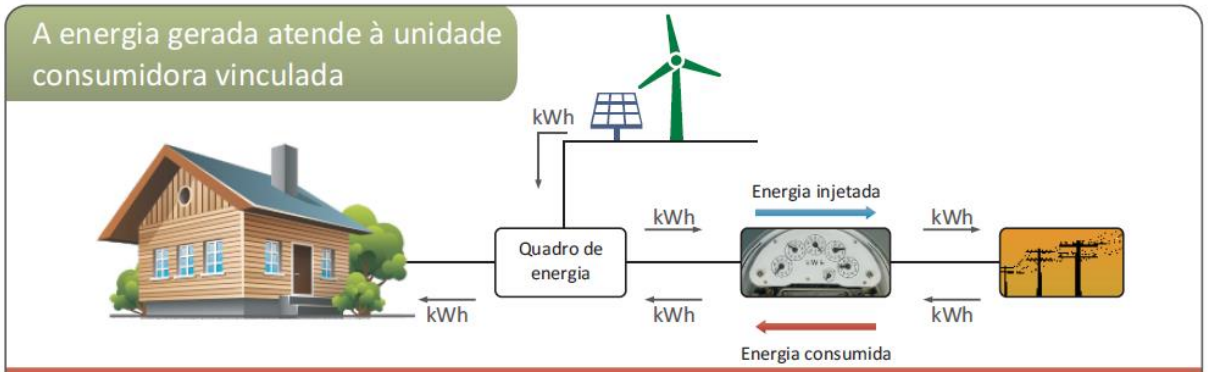
3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída consiste em diversas tecnologias de geração de energia elétrica aplicadas nas cercanias dos diversos centros de consumo espalhados pela rede de distribuição. Esse método de geração atende tanto estruturas simples, como domicílios e negócios, quanto estruturas maiores com rede de distribuição próprias, como grandes indústrias e universidades (EPA, acesso em 04 set. 2021).

No Brasil, a geração distribuída é definida como unidades geradoras de energia elétrica alocadas diretamente ao sistema elétrico de distribuição ou através de uma instalação consumidora previamente existente. Essas instalações não possuem restrição de potência ou fonte de energia, sendo possível operar tanto conectadas à rede, quanto de forma isolada, além disso podem ser ou não despachadas pela ONS

(ANEEL, 2016b). Na Figura 3 é ilustrada uma estrutura típica residencial de um sistema de geração distribuída.

Figura 3 – Estrutura Típica Residencial de um Sistema de Geração Distribuída



Fonte: ANEEL, 2016a, p. 16.

O Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) classifica os sistemas de geração de energia em duas categorias denominadas mini e microgeração conforme apresentado:

> 2.278 - microgeração distribuída: Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
> [...]
> 2.280 - minigeração distribuída: Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2016b)

O país, atualmente, aplica o conceito de Sistema de Compensação de Energia, onde a energia excedente do sistema de geração distribuída é contabilizada e injetada na rede de distribuição que terá o papel de armazenador desta energia. O consumidor, por sua vez, receberá um crédito em energia que poderá ser utilizado para abater de seu consumo futuro num prazo de até 60 meses (ANEEL, 2016a).

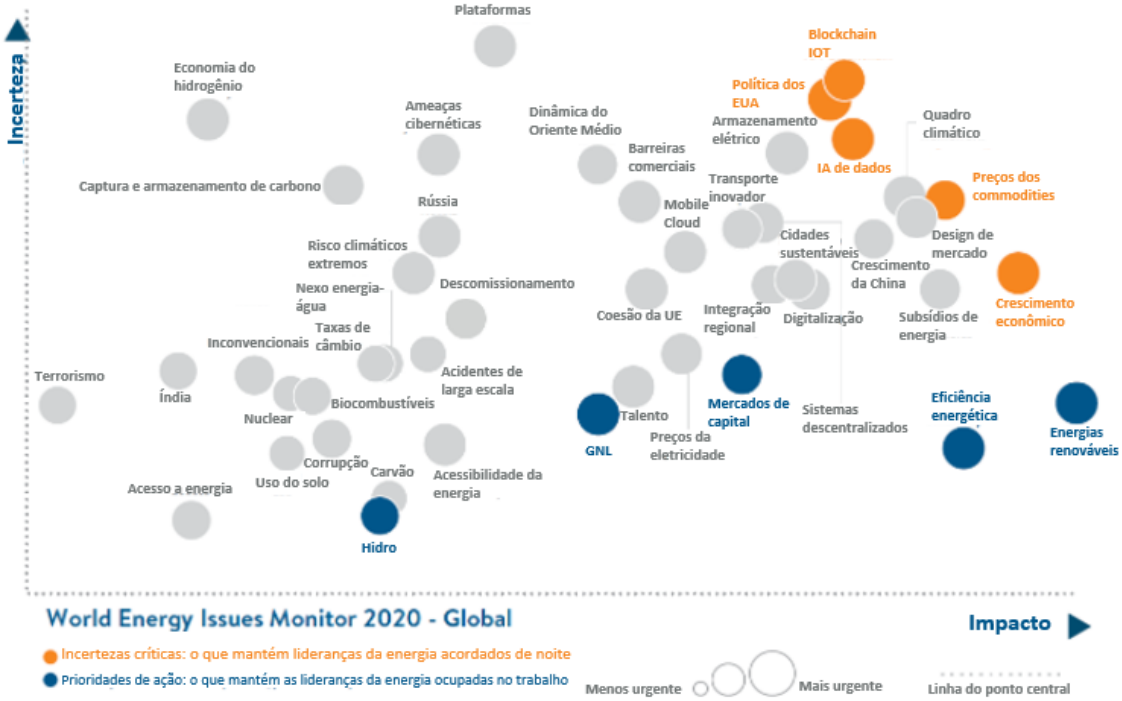
A geração distribuída, nos últimos anos, vem sendo aplicada de maneira crescente, principalmente por sua capacidade de ser alocada próximo aos centros de consumo, de fornecer uma energia limpa e confiável, quando aplicada em conjunto com fontes

renováveis de energia, além de diminuir as perdas na rede de distribuição e transmissão, e de ser econômica para muitos proprietários de casas e negócios (EPA, acesso em 04 set. 2021).

Ademais, a geração distribuída pode fornecer aos operadores um sistema mais confiável contra situações extremas como perda de fornecimento, além de também poder reduzir os custos operacionais do sistema ao prevenir o uso de usinas economicamente custosas para atender a demanda de energia e retardar ou substituir investimentos em infraestrutura da rede (EPE, 2018).

De acordo com World Energy Council 2020, a terceira década do século 21 será marcada pela descentralização, digitalização e descarbonização dos sistemas de geração de energia. Além do mais, o quadro climático é o principal foco de preocupação mundial sendo as energias renováveis consideradas não só como fator prioritário de ações, mas também como o de maior impacto dentre as outras questões energéticas do portfólio (Figura 4), de modo que muitos países estão comprometidos a garantir que este segmento de energia corresponda a 20% da participação do consumo energético global até 2040.

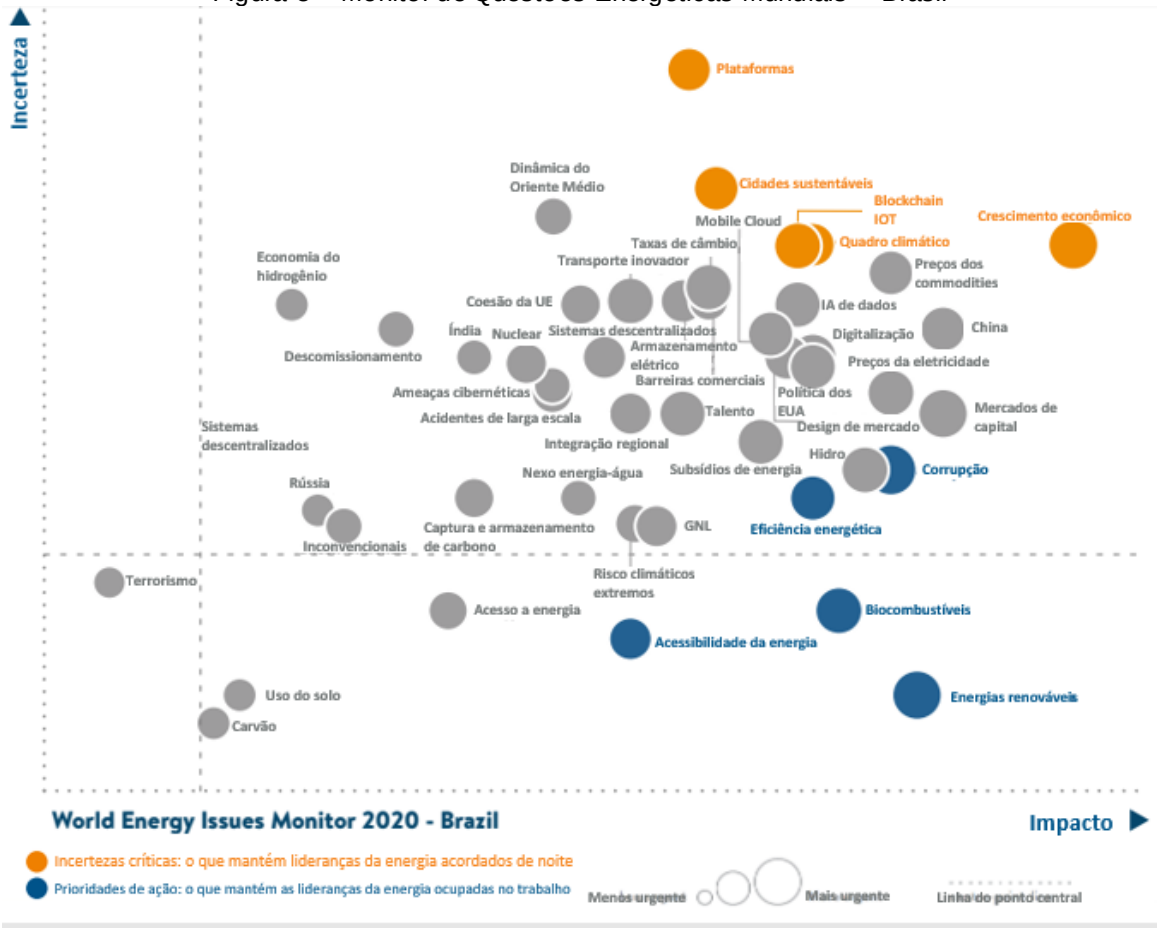
Figura 4 – Monitor de Questões Energéticas Mundiais – Global



Fonte: WORLD ENERGY COUNCIL, 2020.

Em relação ao Brasil (Figura 5), o escopo não diverge muito das perspectivas globais, tendo o país como objetivo reduzir suas emissões, em relação ao ano de 2005, em 43% até 2030 e atingir 20% de participação de energia renovável no consumo global de energia até 2027. Investimentos em energia solar e eólica e substituição do uso de combustíveis derivados do petróleo já ocorrem e são preponderantes para que o país atinja tais objetivos (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020).

Figura 5 – Monitor de Questões Energéticas Mundiais – Brasil



Fonte: WORLD ENERGY COUNCIL, 2020.

Na Tabela 1, são elencadas as principais tecnologias renováveis aplicadas em geração distribuídas:

Tabela 1 – Tecnologias de Geração Distribuída

Tecnologias de Geração Distribuída	Combustíveis
Motor a Pistão	Gasolina/Diesel Gás Natural Biocombustível
Turbina a Gás	Gás Natural Biogás
Microturbina	Gás Natural Biogás
Célula a Combustível	Hidrogênio Gás Natural
Pequena Central Hidrelétrica	Renovável
Micro Central Hidrelétrica	Renovável
Solar Fotovoltaica	Renovável
Eólica	Renovável
Gaseificação de Biomassa	Renovável
Geotérmica	Renovável
Energia Marítima	Renovável

Fonte: PEREIRA; SILVA, 2017, adaptado pelo autor.

Neste trabalho, os GDs constituem-se de geradores síncronos acionados por um biocombustível, esta decisão tem como base a maior aplicabilidade destes geradores nas diferentes tecnologias apresentadas na Tabela 1, por exemplo, motores a pistão, turbina a gás, microturbina, pequena e micro centrais hidrelétricas, eólicas, entre outras.

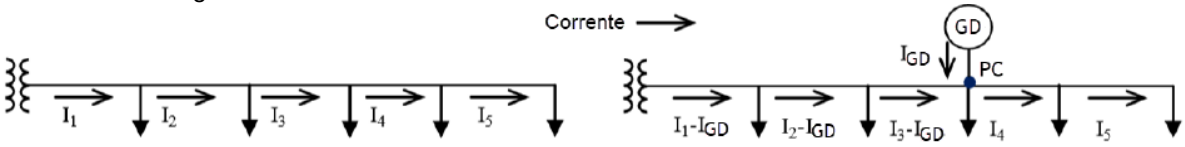
3.2.1 Efeitos da Geração Distribuída

A geração distribuída altera a dinâmica de funcionamento das redes de distribuição originalmente idealizadas para operarem em um sistema de geração centralizado e que devem ser analisados com cuidado para garantir que o sistema consiga lidar com essas novas fontes de geração.

Dentre os possíveis impactos de um sistema de geração distribuída na rede, destacam-se a inversão do fluxo de potência; impacto na proteção unidirecional; impacto na regulação de tensão; impacto nas perdas de potência ativa; sobrecorrente; e o ilhamento não-intencional (AL-SABOUNCHI, 2011). De todos estes, a inversão do

fluxo de potência, conforme ilustrado na Figura 6, é o principal efeito causado em um sistema com geração distribuída, sendo todos os demais derivados do mesmo.

Figura 6 – Fluxo de Corrente em um Alimentador Radial com e sem GD



Fonte: AL-SABOUNCHI, 2011.

Esta reversão do fluxo de potência em um alimentador ocorre quando a quantidade de potência injetada por um GD é superior à demanda da barra onde está conectado, causando o fluxo desta potência excedente pelos demais ramos da rede radial de distribuição em direção à subestação. Normalmente, em níveis mais baixos de potência, os impactos da reversão do fluxo de potência sobre o sistema são menores e, em sua maioria, positivos. Contudo, quando tratamos de grandes geradores distribuídos este princípio pode alterar os valores das correntes de falta ao ponto de desestabilizar a coordenação dos relés de proteção; pode deturpar a operação dos reguladores de tensão comuns ao aumentar os níveis de tensão a jusante do regulador para valores superiores aos valores a montante; pode aumentar o fluxo de corrente em um alimentador para valores superiores a sua capacidade; pode alterar a dinâmica de demanda do sistema aumentado as perdas do alimentador; e pode manter parte do alimentador energizado em ilhamento mesmo após a desconexão da geração central (AL-SABOUNCHI, 2011).

Dessa forma, é preponderante o uso de técnicas de otimização ao realizar a conexão de GDs em uma rede de distribuição para que tais impactos sejam minimizados ou até contornados, garantindo que todos os benefícios que um sistema de distribuição pode usufruir com a implementação da geração distribuída sejam superiores aos malefícios operacionais causados sobre o mesmo.

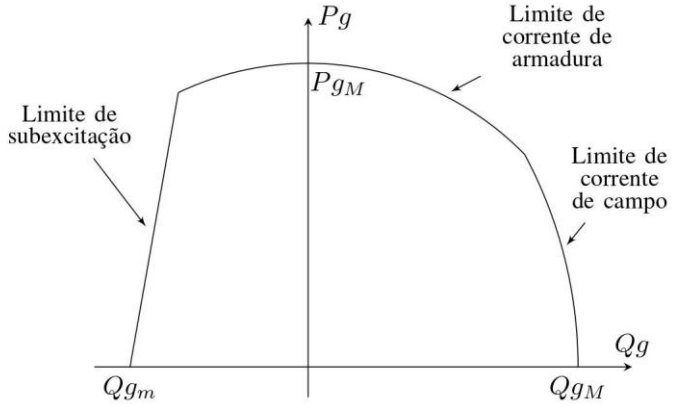
3.2.2 Gerador Síncrono

O funcionamento de um gerador síncrono se baseia na aplicação de uma corrente contínua no enrolamento do rotor que, por sua vez, é rotacionado por uma máquina primária resultando em um campo magnético girante na mesma velocidade do rotor que induz uma tensão em seu estator. A corrente no estator, por sua vez, induz um segundo campo magnético que cria um conjugado que interage com o do campo do rotor e altera a tensão nos terminais do gerador. Este conjugado é definido pelo ângulo entre a corrente do estator e a tensão induzida pelo campo do rotor e rege as características de geração da máquina síncrona. A variação deste ângulo determina se a operação do gerador síncrono está em sobreexcitação, excitação normal e subexcitação, ou seja, se ele está, respectivamente, fornecendo potência ativa e reativa, só fornecendo potência ativa ou fornecendo potência ativa e consumindo a reativa (CHAPMAN, 2005).

Geradores síncronos são comumente aplicados em geração distribuída, principalmente em turbinas eólicas, sistemas de cogeração baseados em biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (RUEDA-MEDINA *et al*, 2013).

A curva de capabilidade de um gerador síncrono é limitada por, principalmente, três fatores: os limites da corrente de armadura, os limites da corrente de campo e os limites de aquecimento do enrolamento. Dessa forma a curva de capabilidade é definida pelas interseções dessas três curvas de forma que, nas proximidades da excitação normal, a geração é delimitada pelos limites da corrente de armadura; a região de sobreexcitação é restringida pelos limites de corrente de campo; e a de subexcitação pelos limites de aquecimento do enrolamento, também referido como limite de subexcitação (UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, 2015). Uma curva de capabilidade geral para um gerador síncrono é explicitada no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Curva de Capacidade de Geração de um Gerador Síncrono



Fonte: RUEDA-MEDINA *et al*, 2013.

3.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

A otimização é geralmente definida como processo utilizado para se chegar à solução ótima de um problema, dentre uma gama de resultados possíveis, com base em critérios específicos e possui grande importância e aplicabilidade na engenharia. A formulação de um problema de otimização é definida como a busca de uma ou mais variáveis visando maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo (ZALDIVAR *et al*, 2019).

Os métodos utilizados para este procedimento são classificados em métodos de otimização clássicos e metaheurísticos. Em que o primeiro, geralmente, se baseia no uso do gradiente da função objetivo para a realização da busca da solução ótima e o último faz uso de regras heurísticas, muitas vezes baseadas em fenômenos da natureza e sociais, para nortear o processo de busca (ZALDIVAR *et al*, 2019).

Ambos os métodos possuem suas vantagens e desvantagens. Embora os métodos clássicos, considerando as características do problema formulado e condições de convexidade no espaço de busca, possam garantir a solução ótima, eles dependem de uma maior informação dos parâmetros do problema para se realizar a formulação matemática do mesmo correlacionando suas diversas variáveis, além de exigir um maior processamento computacional e, por conseguinte, ser mais lento. Já os métodos metaheurísticos não necessitam de uma formulação completa do problema

e nem de operações matemáticas complexas para se chegar a seu resultado, o que os tornam mais céleres, contudo, se abdica da garantia da solução ótima por uma de excelente qualidade.

Neste trabalho, se faz uso de dois métodos metaheurísticos, conhecidos como método AG e método LC, e de um método clássico, conhecido como método PI.

3.3.1 Algoritmos Genéticos

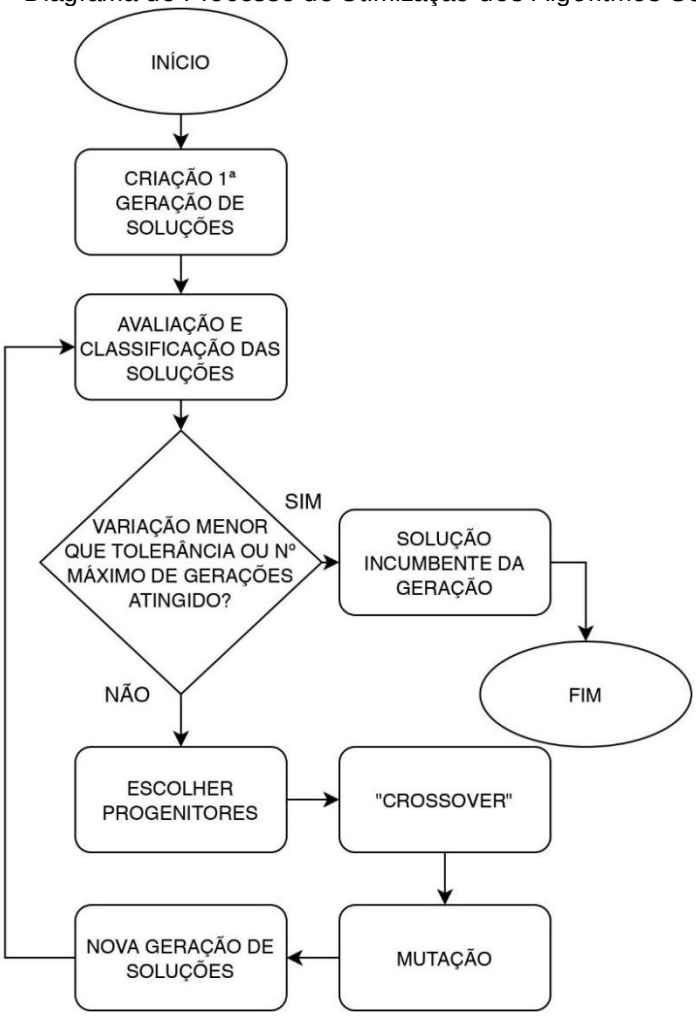
Os AG consistem em um método proposto por John H. Holland que se baseia na teoria da evolução de Charles Darwin e se destaca pela sua organização, adaptabilidade e capacidade de aprendizado. Fazendo uso de funções de avaliação (*fitness*), o método AG realiza a busca de informações a partir das características evolucionárias da população de soluções e, ao realizar o processo de cruzamento (*crossover*) entre os resultados mais bem avaliados, seguido pelo de mutação nas soluções resultantes do processo anterior, ele faz uso das regras de probabilidade para guiar sua busca (WANG *et al*, 2018).

Em suma, o processo se inicia com uma população de indivíduos solução gerados aleatoriamente. Em seguida, esses indivíduos são avaliados e classificados pela função *fitness* de forma que as soluções que retornaram os melhores resultados para a resolução do problema passam a ter maior relevância do que as que não os tiveram. Em tendência aos mais bens qualificados, dois são selecionados para passar pelo processo de cruzamento e gerar dois novos indivíduos que poderão herdar as características genéticas, das soluções que os originaram, consideradas relevantes para resolver o problema. Durante este processo, parte dos novos indivíduos criados podem passar pelo procedimento de mutação, alterações aleatórias nos genes que compõem o indivíduo para maior diferenciá-los dos que o originaram e aumentar a variabilidade da população; por fim, esta etapa é repetida até que uma nova geração de indivíduos seja criada [(SANCHO CAPARRINI, 2018) (HOLLAND, 2012)].

Assim, uma nova geração composta pelos melhores indivíduos da geração anterior e seus descendentes é definida e todo o processo se repetirá sempre criando uma geração de indivíduos solução com características genéticas superiores aos da anterior para resolver o problema de otimização. Este processo continuará até que um dos critérios seja alcançado, a variabilidade das soluções seja inferior à tolerância ou o número de gerações atinja seu limite máximo (SANCHO CAPARRINI, 2018).

No diagrama apresentado na Figura 7 é descrito o processo do método AG para solução de problemas de otimização. Informações adicionais sobre este método podem ser averiguadas em Sancho Caparrini (2018) e Holland (2012).

Figura 7 – Diagrama do Processo de Otimização dos Algoritmos Genéticos



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a melhor compreensão do funcionamento do método e da aplicação de suas etapas, é valido apresentar o seu processo de solução para um problema de

otimização simples, como o Problema da Mochila. Este problema consiste no agrupamento de diferentes itens com pesos e valores diversos dentro de uma mochila objetivando maximizar a somatória dos valores dos itens nela contida sem que se ultrapasse a capacidade de peso máxima da mesma.

Para este caso específico foi utilizado o Problema da Mochila 0-1 que consiste em uma versão do problema onde o item é adicionado à mochila (valor 1) ou o item é removido da mochila (valor 0), além disso, foi considerado que não se pode adicionar o mesmo item mais de uma vez à mochila. A capacidade máxima da mochila é de 15kg e os itens disponíveis para serem adicionados são cinco e seus parâmetros estão apresentados na Tabela 2. Vale ressaltar de antemão que a solução ótima deste problema é dada ao inserir na mochila os itens 1, 4 e 5 com valor de R$ 44,00 e peso de 15kg.

Tabela 2 – Parâmetros do Problema da Mochila

Item	Valor (R$)	Peso (kg)
1	9	2
2	2	10
3	5	4
4	18	6
5	17	7

Fonte: Produção do próprio autor.

A inicialização do processo de solução do problema pelo método AG é apresentado na Tabela 3. Ademais o processamento das duas primeiras iterações é explicitado na Tabela 4 e o das iterações 3 e 4 na Tabela 5.

Tabela 3 – Inicialização do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila

Peso (kg)	Valor (R$)	Cromossomo	Item				
			1	2	3	4	5
23	1,111	1	1	1	1	0	1
21	1,333	2	0	1	1	0	1
20	1,444	3	0	1	1	1	0
18	1,667	4	1	1	0	1	0
10	2	5	0	1	0	0	0
6	18	6	0	0	0	1	0
12	11	7	1	1	0	0	0
9	26	8	1	0	0	0	1
19	1,556	9	1	1	0	0	1
19	1,556	10	1	1	0	0	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 – Iterações 1 e 2 do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila

Iteração 1								Iteração 2							
Peso (kg)	Valor (R$)	Cromossomo	Item					Peso (kg)	Valor (R$)	Cromossomo	Item				
			1	2	3	4	5				1	2	3	4	5
9	26	1	1	0	0	0	1	9	26	1	1	0	0	0	1
6	18	2	0	0	0	1	0	6	18	2	0	0	0	1	0
12	11	3	1	1	0	0	0	12	11	3	1	1	0	0	0
16	-0,067	4	0	1	0	1	0	16	-0,067	4	0	1	0	1	0
10	2	5	0	1	0	0	0	12	11	5	1	1	0	0	0
10	2	6	0	1	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
18	-0,2	7	1	1	0	1	0	0	0	7	0	0	0	0	0
0	0	8	0	0	0	0	0	6	18	8	0	0	0	1	0
0	0	9	0	0	0	0	0	9	26	9	1	0	0	0	1
19	-0,267	10	1	1	0	0	1	0	0	10	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 5 – Iterações 3 e 4 do Método Algoritmos Genéticos para o Problema da Mochila

Iteração 3								Iteração 4							
Peso (kg)	Valor (R$)	Cromossomo	Item					Peso (kg)	Valor (R$)	Cromossomo	Item				
			1	2	3	4	5				1	2	3	4	5
9	26	1	1	0	0	0	1	8	27	1	1	0	0	1	0
9	26	2	1	0	0	0	1	9	26	2	1	0	0	0	1
6	18	3	0	0	0	1	0	9	26	3	1	0	0	0	1
8	27	4	1	0	0	1	0	13	35	4	0	0	0	1	1
6	18	5	0	0	0	1	0	6	18	5	0	0	0	1	0
9	26	6	1	0	0	0	1	9	26	6	1	0	0	0	1
2	9	7	1	0	0	0	0	15	44	7	1	0	0	1	1
0	0	8	0	0	0	0	0	7	17	8	0	0	0	0	1
7	17	9	0	0	0	0	1	6	18	9	0	0	0	1	0
6	18	10	0	0	0	1	0	9	26	10	1	0	0	0	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se, ao analisar a população de indivíduos solução ou população de cromossomos original gerada aleatoriamente na inicialização do processo, que existem soluções cujos valores são números racionais ao invés de inteiros, como seria o esperado. Este fato é devido a um valor de penalidade racional que é subtraído do valor original da solução quando está não respeita o limite máximo de peso da mochila.

Além disso, quando comparamos a população gerada na primeira iteração com a população original, é possível verificar que quatro soluções, destacadas em verde em ambas as Tabelas 3 e 4, são consideradas as melhores daquela geração e se mantém na geração seguinte, sendo as demais substituídas por combinações de cruzamentos entre as soluções de melhor qualidade da geração original, sofrendo ou não o processo de mutação.

Um exemplo do processo de cruzamento é dado pela junção dos genes referentes ao item 1 e 2 do cromossomo 5 e os referentes ao item 3, 4 e 5 do cromossomo 7 na geração original que resulta no cromossomo 6 da geração criada na primeira iteração, todos destacados em amarelo em suas respectivas tabelas. Este processo ocorre na expectativa de, ao combinar duas soluções classificadas como boas, gerar uma outra que pode obter uma qualidade superior as que existiam originalmente e que foi o caso nesta iteração.

O processo de mutação ocorre quando, após o cruzamento, a nova solução apresenta uma alteração em algum gene que não era existente em seus progenitores, por exemplo, os genes dos itens 3, 4 e 5 do cromossomo 5 foram combinados com os genes do item 1 e 2 do cromossomo 7 na geração original para, em seguida, ocorrer uma mutação no gene referente ao item 5 desta nova solução, criando o cromossomo 10 da população da primeira iteração, todos estes destacados em vermelho em suas respectivas tabelas, estando o gene mutado destacado em rosa. O objetivo desta mutação é dar variabilidade e diversificar a qualidade das soluções, uma mutação não necessariamente trará uma melhoria na qualidade das soluções, o que também foi o caso deste exemplo, onde a solução gerada por mutação não foi uma de melhor qualidade.

Este processo vai se repetir em cada iteração criando novas gerações com soluções cada vez melhores. Na Tabela 5 é mostrado que a geração da quarta iteração já apresentou a solução ótima no cromossomo 7, destacada em verde. O processo não terminará por aí, mais iterações continuarão, mas sempre manterá esta melhor solução, eventualmente a falta de variação neste resultado fará o processo terminar e o cromossomo [10011] com valor de R$ 44,00 e peso de 15kg será retornado como resultado do processo.

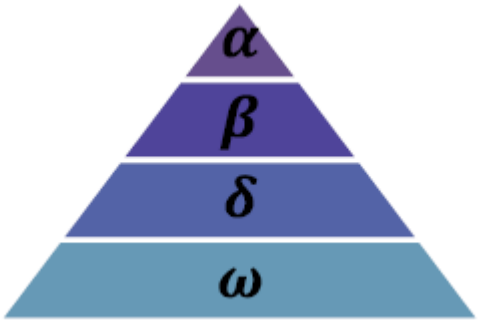
3.3.2 Lobos Cinzentos

O método LC foi criado por Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili e Andrew Lewis (2014). O método se baseia no comportamento e estratégia de caça a presas

dos lobos cinzentos (*Canis Lupus*), que consiste em três etapas: a primeira consiste no rastreio, busca e aproximação da presa; a segunda etapa é a perseguição, cerceamento e assédio à presa até que pare de se movimentar; e por fim, o ataque direto a mesma (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

Os lobos são divididos em quatro níveis hierárquicos: o *alfa* (*α*), o líder, responsável pela tomada de decisão e direcionamento da alcateia; os *betas* (*β*), responsáveis por auxiliar os alfas em sua tomada de decisão e organização da alcateia; os *deltas* (*δ*), são os principais responsáveis pelas atividades e ações do grupo; e os *ômegas* (*ω*), que são os servos da alcateia e responsáveis por auxiliar em provê-la e pela manutenção da estrutura hierárquica. Na Figura 8 é apresentado a estrutura hierárquica dos lobos cinzentos (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

Figura 8 – Estrutura Hierárquica dos Lobos Cinzentos



Fonte: MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014.

A modelação matemática do processo de caça dos lobos cinzentos é definida pelas equações (8), (9), (10) e (11), conforme apresentado em SONG e outros (2015).

$$\vec{D} = \left|\vec{C}\,.\overrightarrow{X_p}(m) \;-\; \vec{X}(m)\right| \tag{8}$$

$$\vec{X}(m+1) = \overrightarrow{X_p}(m) \;-\; \vec{A}.\vec{D} \tag{9}$$

$$\vec{A} \;=\; 2.\vec{a}\,\overrightarrow{r_1} \;-\; \vec{a} \tag{10}$$

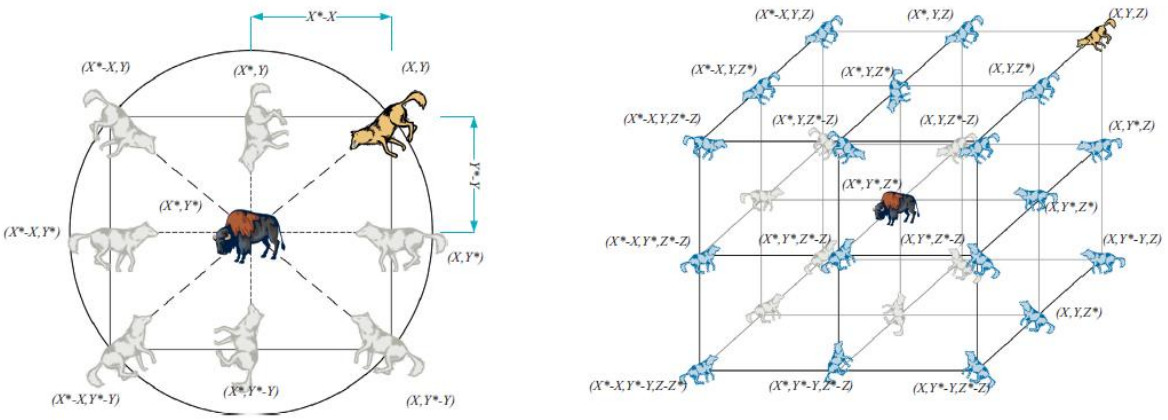
$$\vec{C} \;=\; 2\,\overrightarrow{r_2} \tag{11}$$

Onde m indica a iteração atual, $\overrightarrow{X_p}(m)$ indica a posição da presa; $\vec{X}$ representa a posição de um lobo cinzento; $\vec{D}$ corresponde à distância de um lobo cinzento em relação a um ponto ao redor da presa; e $\vec{A}$ e $\vec{C}$ são coeficientes calculados pelas equações (10) e (11), sendo $\vec{a}$ um valor que decresce linearmente com o passar das iterações entre [2,0] e a única variável de decisão do método; e $\overrightarrow{r_1}$ e $\overrightarrow{r_2}$ são valores aleatórios entre [0,1], o que determina que $\vec{A}$ e $\vec{C}$ sejam valores aleatórios, respectivamente, entre [-$\vec{a}$, $\vec{a}$] e [2, 0].

O coeficiente $\vec{A}$ é preponderante para definir o processo de busca pela presa que no caso seria a solução ótima para o problema de otimização. Quando o seu módulo é igual ou superior a um, é fomentada a exploração, onde prevalece a divergência dos lobos em relação a uma presa para fomentar a busca de uma de melhor qualidade. Por outro lado, quando seu módulo é inferior a um, se incentiva o ataque, onde se percebe uma convergência dos lobos em direção a uma presa específica. Como o valor de $\vec{a}$ decresce de acordo com o número de iterações, em suma o algoritmo favorece uma maior busca por soluções ótimas durante o início e, aos poucos, garante a convergência em uma solução específica.

O coeficiente $\vec{C}$ realiza uma ponderação aleatória das presas (soluções) encontradas de forma a, estocasticamente, enfatizar (para $\vec{C}$ maior ou igual a 1) ou desenfatizar (para $\vec{C}$ menor que 1) a relevância de uma presa na definição da movimentação dos lobos. Na Figura 9 é ilustrado o processo de caça dos lobos cinzentos.

Figura 9 – Vetores de Posição em 2D e 3D das Possíveis Próximas Localizações de um Lobo



Fonte: MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014

Para simular o processo de caça dos lobos cinzentos, o algoritmo inicialmente gera uma alcateia inicial de lobos cinzentos aleatórios em que os três que representam as melhores soluções são classificados, respectivamente, como lobos *alfa*, *beta* e *delta* e regerão os demais lobos na "caça" pelo melhor resultado. Assim, todos os demais lobos se deslocarão conforme a posição desses três principais, conforme as equações apresentadas em (12), (13) e (14).

$$\overrightarrow{D_\alpha} = \left|\overrightarrow{C_1}\ \overrightarrow{X_\alpha}(m) - \vec{X}(m)\right|;\ \overrightarrow{D_\beta} = \left|\overrightarrow{C_2}\ \overrightarrow{X_\beta}(m) - \vec{X}(m)\right|;\ \overrightarrow{D_\delta} = \left|\overrightarrow{C_3}\ \overrightarrow{X_\delta}(m) - \vec{X}(m)\right| \quad (12)$$

$$\overrightarrow{X_1} = \overrightarrow{X_\alpha}(m) - \overrightarrow{A_1}\ \overrightarrow{D_\alpha};\ \overrightarrow{X_2} = \overrightarrow{X_\beta}(m) - \overrightarrow{A_2}\ \overrightarrow{D_\beta};\ \overrightarrow{X_3}(m) = \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3}\ \overrightarrow{D_\delta} \quad (13)$$

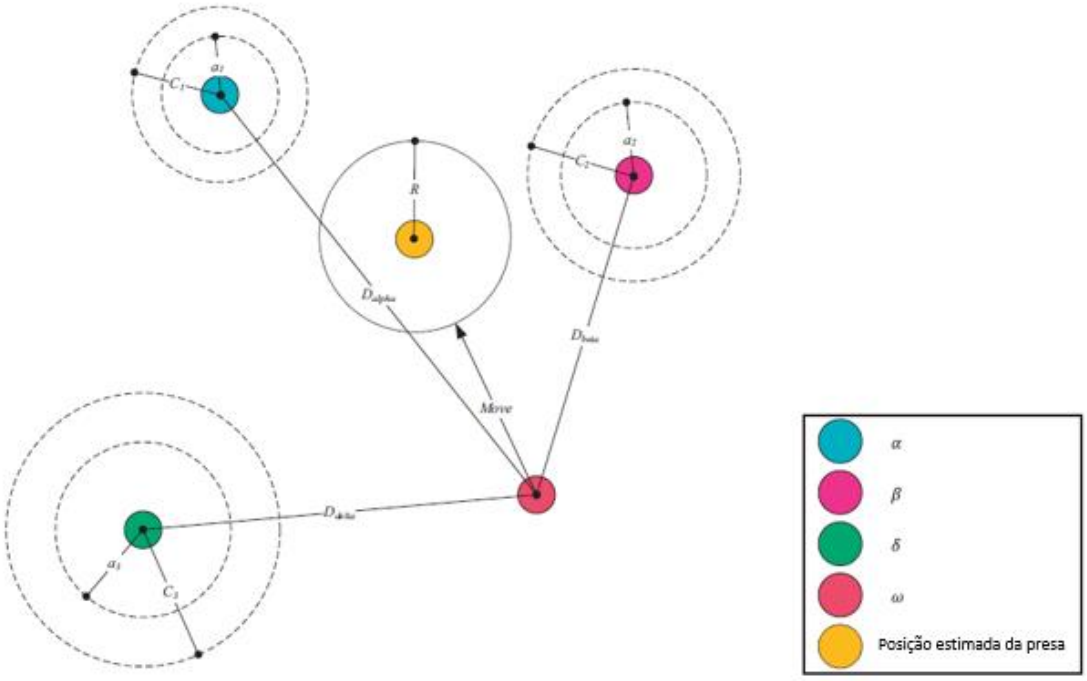
$$\vec{X}(m+1) = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \quad (14)$$

Onde $\overrightarrow{X_\alpha}(m)$, $\overrightarrow{X_\beta}(m)$ e $\overrightarrow{X_\delta}(m)$ referem-se, respectivamente, à posição do lobo *alfa*, *beta* e *delta* na iteração m; e os coeficiente 1, 2 e 3 nos parâmetros $\vec{X}$, $\vec{A}$, $\vec{C}$ e $\vec{D}$ indicam se os parâmetros foram calculados em referenciamento ao lobo *alfa*, *beta* e *delta*, respectivamente.

Assim, para cada lobo, as equações apresentadas em (8), (9), (10) e (11) são aplicadas em paralelo para definir para qual posição um componente da alcateia deveria se deslocar em relação ao lobo *alfa* ($\overrightarrow{X_1}$), ao *beta* ($\overrightarrow{X_2}$) e ao *delta* ($\overrightarrow{X_3}$), independentemente, e, por fim, a média destes três valores é feita para definir o posicionamento real do lobo na iteração seguinte ($\vec{X}(m+1)$). O processo é feito para todos os lobos da alcateia até que todos tenham se deslocado, quando é então recomeçado.

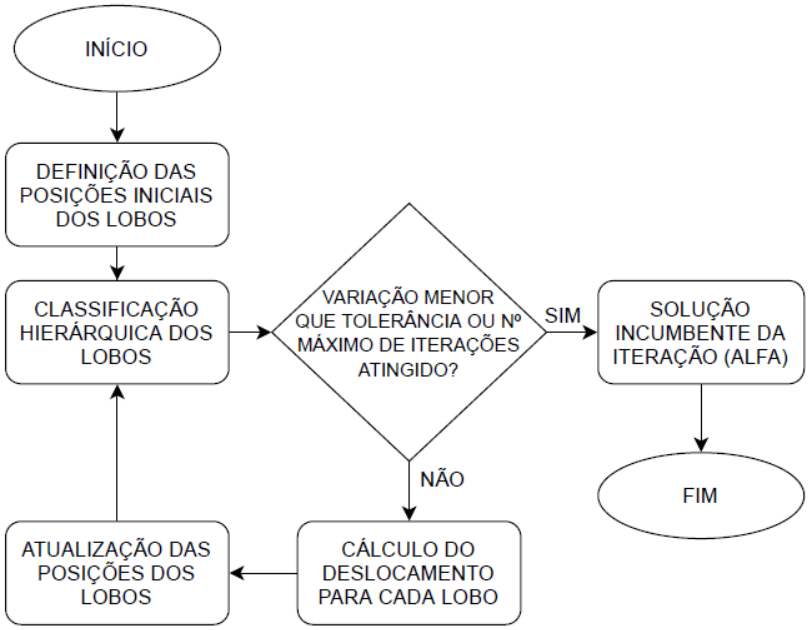
O método de lobos cinzentos termina quando o critério de término é atendido, podendo ser esse o número máximo de iterações ou variação da solução do problema inferior à tolerância. Na Figura 10 é explicitada a movimentação dos lobos a partir das equações (12), (13) e (14). Além disso, na Figura 11 é descrito o processo do método LC para solução de problemas de otimização.

Figura 10 – Atualização do Posicionamento no Método de Lobos Cinzentos



Fonte: MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014

Figura 11 – Diagrama do Processo de Otimização dos Lobos Cinzentos



Fonte: Produção do próprio autor.

O mesmo exemplo do Problema da Mochila feito para o método AG foi aplicado para o método LC. Dessa forma, a inicialização do processo de solução do problema é apresentada na Tabela 6, o processamento das duas primeiras iterações é explicitado na Tabela 7 e o das iterações 3 e 4 na Tabela 8.

Tabela 6 – Inicialização do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila

Peso (kg)	Valor (R$)	Lobo	Item				
			1	2	3	4	5
14	7	1	0	1	1	0	0
21	0	2	0	1	1	0	1
19	0	3	1	0	1	1	1
29	0	4	1	1	1	1	1
18	0	5	1	1	0	1	0
6	18	6	0	0	0	1	0
19	0	7	1	0	1	1	1
13	31	8	1	0	1	0	1
19	0	9	1	1	0	0	1
14	7	10	0	1	1	0	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 – Iterações 1 e 2 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila

Iteração 1								Iteração 2							
Peso (kg)	Valor (R$)	Lobo	Item					Peso (kg)	Valor (R$)	Lobo	Item				
			1	2	3	4	5				1	2	3	4	5
21	0	1	0	1	1	0	1	4	5	1	0	0	1	0	0
11	22	2	0	0	1	0	1	13	31	2	1	0	1	0	1
2	9	3	1	0	0	0	0	9	26	3	1	0	0	0	1
27	0	4	0	1	1	1	1	4	5	4	0	0	1	0	0
16	0	5	1	1	1	0	0	17	0	5	0	0	1	1	1
0	0	6	0	0	0	0	0	19	0	6	1	0	1	1	1
12	32	7	1	0	1	1	0	11	22	7	0	0	1	0	1
13	31	8	1	0	1	0	1	19	0	8	1	0	1	1	1
4	5	9	0	0	1	0	0	13	31	9	1	0	1	0	1
11	22	10	0	0	1	0	1	9	26	10	1	0	0	0	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 8 – Iterações 3 e 4 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila

Iteração 3								Iteração 4							
Peso (kg)	Valor (R$)	Lobo	Item					Peso (kg)	Valor (R$)	Lobo	Item				
			1	2	3	4	5				1	2	3	4	5
6	14	1	1	0	1	0	0	9	26	1	1	0	0	0	1
13	31	2	1	0	1	0	1	9	26	2	1	0	0	0	1
13	31	3	1	0	1	0	1	13	31	3	1	0	1	0	1
9	26	4	1	0	0	0	1	13	31	4	1	0	1	0	1
15	44	5	1	0	0	1	1	9	26	5	1	0	0	0	1
6	14	6	1	0	1	0	0	2	9	6	1	0	0	0	0
11	22	7	0	0	1	0	1	7	17	7	0	0	0	0	1
2	9	8	1	0	0	0	0	15	44	8	1	0	0	1	1
9	26	9	1	0	0	0	1	9	26	9	1	0	0	0	1
6	14	10	1	0	1	0	0	13	31	10	1	0	1	0	1

Fonte: Produção do próprio autor.

O posicionamento inicial dos lobos, apresentado na Tabela 6, explicita algumas soluções com valores iguais a zero que, neste caso, são soluções que não respeitam a capacidade de peso máxima da mochila e, portanto, tiveram seus valores desconsiderados ou são soluções que não alocaram nenhum item na mochila. Além

disso, após definidos os posicionamentos iniciais aleatórios, os três melhores resultados são definidos como lobo *alfa*, *beta* e *delta*, respectivamente destacados em verde, amarelo e azul. Vale salientar que os lobos *alfa*, *beta* e *delta* não participam diretamente do processo de "caça" à solução, eles só assumem as três melhores posições encontradas pelos lobos *ômegas*, os que de fato fazem a caça, para servirem de direcionamento para estes lobos em sua busca pela melhor solução. Desta forma, todos as dez soluções apresentadas nas tabelas supracitadas consistem em lobos *ômegas*.

Após definidas as soluções que vão representar os lobos *alfa*, *beta* e *delta*, as equações (12) a (14) são aplicadas para reposicionar cada um dos dez lobos *ômegas*. Um exemplo deste cálculo para o lobo 2 na primeira iteração é explicitado na Tabela 9, vale ressaltar que neste algoritmo estes cálculos são realizados de maneira individual para cada posição referente a um dos cinco itens. Ademais, como se trata da primeira iteração o valor de $\vec{a}$ é 2.

Tabela 9 – Cálculo dos Parâmetros para o Lobo 2 na Iteração 1 do Método Lobos Cinzentos para o Problema da Mochila

Parâmetro	Item				
	1	2	3	4	5
$\overrightarrow{A_1}$	0,679	1,299	-1,505	0,909	-1,860
$\overrightarrow{C_1}$	0,363	0,044	0,242	1,930	0,487
$\overrightarrow{X_1}$	0,754	-1,299	2,142	0,000	1,955
$\overrightarrow{A_2}$	1,472	0,401	0,681	-1,259	-0,259
$\overrightarrow{C_2}$	0,317	0,893	1,299	0,962	1,111
$\overrightarrow{X_2}$	0,000	0,957	0,797	0,000	0,259
$\overrightarrow{A_3}$	0,626	-0,240	0,203	0,138	-1,004
$\overrightarrow{C_3}$	1,408	1,262	1,148	0,313	1,106
$\overrightarrow{X_3}$	0,000	0,240	-0,203	0,000	1,004

Fonte: Produção do próprio autor.

Para cada uma das posições referentes a um item é feita a média aritmética dos reposicionamentos referentes aos lobos *alfa*, *beta* e *delta*. Desta forma, a nova posição do lobo 2 na primeira iteração foi [0,251 0,034 0,912 0,000 1,073], contudo como se trata de uma solução com variáveis inteiras, esta posição é arredondada para [00101] que é a posição de fato do lobo 2 na primeira iteração. Este processo é realizado de forma análoga para todos os lobos em todas a iterações enquanto os

lobos *alfa*, *beta* e *delta* realizam seu reposicionamento toda vez que um lobo *ômega* encontrar uma posição mais favorável.

Destacado em verde na Tabela 8 é explicitada a solução ótima, [10011] com valor de R$ 44,00 e peso de 15kg, encontrada na terceira iteração, mesmo assim, o processo continuará até que o número máximo de iterações ocorra, mas a posição do lobo alfa permanecerá a mesma, de forma que no final esta será a solução retornada. Por fim, vale salientar que, neste exemplo, o número máximo de iterações foi dez, logo, a partir da quinta iteração o valor de $\vec{a}$ passa a ser 1, fomentando a convergência dos lobos para uma solução específica, e decai até atingir o valor 0 na décima iteração, quando, de acordo com as equações (13) e (14), todos os dez lobos se convergirão para a exata mesma posição, que é a média aritmética da posição atual dos lobos *alfa*, *beta* e *delta*. Portanto, a não ser que estes três lobos se encontrem na mesma posição, dificilmente algum lobo estará na melhor solução na última iteração e isto não é algo relevante, pois, o importante é que, em algum momento durante o processo de caça, algum lobo tenha encontrado esta solução e que o *alfa* tenha se posicionado nela, pois é ele quem define qual o resultado retornado pelo método.

3.3.3 Método de Pontos Interiores Primal-Dual

Os pontos interiores constituem um dos métodos que mais revolucionaram e impactaram a área de otimização desde a criação do método simplex e alterou permanentemente a teoria de programação matemática fomentando diversos estudos para aperfeiçoá-lo (POTRA; WRIGHT, 2000).

O método PI consiste em uma técnica para solucionar problemas de programação linear e não-linear (quando a função objetivo ou suas restrições possuem, pelo menos, uma expressão não-linear) e que possui como suas maiores vantagens a sua velocidade, sendo o número de iterações necessárias proporcional à raiz quadrada da quantidade de variáveis e à quantidade de restrições; e a garantia da solução ótima, desde que o problema cumpra com as condições de otimalidade (LESAJA, 2009).

O método PI, cujas informações mais detalhadas podem ser encontradas nos trabalhos de Potra e Wright (2000), bem como no de Lesaja (2009), possui como princípio básico a conversão de um problema de otimização restrito em um irrestrito ao incluir suas restrições como parte da função objetivo nos moldes da equação de Lagrange, conforme explicitado em (15) e (16).

$$\begin{gathered} Min\ \ c^T\, z \\ s.t.\ \ Az = b;\ z \geq 0 \\ \forall\, z \in R^n;\ \forall\, b \in R^m;\ \forall\, c \in R^n;\ \forall\, A \in R^{mxn} \end{gathered} \tag{15}$$

$$L(x,y)\ = c^T z\ -\ \mu \sum_{i=1}^{n} ln\ z_i\ -\ s^T\ (Az\ -\ b) \tag{16}$$

$$\forall\, z \in R^n;\ \forall\, b \in R^m;\ \forall\, c \in R^n;\ \forall\, A \in R^{mxn};\ \forall\, s \in R^m;\ \forall\, \mu\ >\ 0$$

Onde z é um vetor das variáveis do problema em R^n, c representa um vetor em R^n com os parâmetros do problema a ser minimizado, A e b são, respectivamente, uma matriz em R^{mxn} e um vetor em R^m com os parâmetros de restrições; μ é conhecido como parâmetro da barreira e deve ser minimizado e s corresponde a uma variável *dual* que é utilizada como base para a definição de uma variável *slack* que possui como papel a conversão de uma restrição de desigualdade em uma de igualdade.

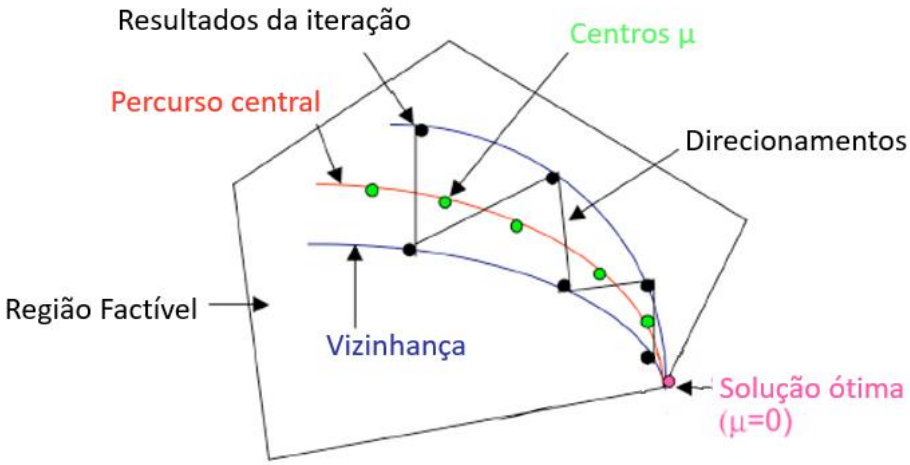
Destarte, o método se resolve ao calcular os valores das variáveis de forma a garantir que o gradiente da equação de Lagrange seja zero, conforme apresentado em (17), pois, assim, a solução desta equação será equivalente à da equação (15). Para resolver o sistema supracitado, o método PI aplica o método de Newton amortecido, o qual constitui em uma modificação do método de Newton original. Este método geralmente não garantiria a convergência global do problema, contudo, o seu emprego em conjunto com a técnica apresentada a garante.

$$\begin{gathered} \nabla_x L(x,y) = c - \mu\, Z^{-1} I_n - A^T s = 0 \\ \nabla_y L(x,y) = b - Az = 0 \end{gathered} \tag{17}$$

$$\forall\, z \in R^n;\ \forall\, b \in R^m;\ \forall\, c \in R^n;\ \forall\, A \in R^{mxn};\ \forall\, s \in R^m;\ \forall\, \mu\ >\ 0;\ \forall\, Z \in R^{mxn};\ \forall\, I_n \in R^n$$

Onde Z representa a matriz diagonal com os componentes do vetor z e I_n um vetor unitário em R^n. Dessa forma, ao ser aplicado, o método parte de um ponto qualquer interno à região factível do problema e realiza a busca da solução ótima global dentro da zona de restrição, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação Gráfica do Processo de Busca do Método de Pontos Interiores Primal-Dual



Fonte: LESAJA, 2009.

3.4 VARIÁVEIS ESTOCÁSTICAS

Em probabilidade, um processo estocástico é definido por um conjunto de variáveis de caráter aleatório, ou seja, variáveis não determinísticas e que não podem ser modeladas analiticamente através de parâmetros conhecidos, como senóides, por exemplo. Dessa forma, para trabalhar com tais variáveis é necessário conhecer a probabilidade de ocorrência de seus possíveis resultados. Como a probabilidade é atribuída a uma variável aleatória dependerá de sua categorização como variável discreta ou contínua (MILLER; CHILDERS, 2012).

3.4.1 Variável Discreta

Para uma variável discreta a probabilidade é tratada através da função massa de probabilidade (FMP) que, em suma, atribui uma probabilidade para cada valor discreto possível de uma variável Y ($Pr(Y = y)$). A FMP de Y ($P_Y(y)$) é definida em (18) e suas

propriedades apresentadas em (19) e (20), onde seu valor para um possível resultado de Y deve sempre estar entre [0;1] e a somatória de todos seus valores no espaço amostral deve ser igual a um.

$$P_Y(y) = Pr(Y = y) \tag{18}$$

$$0 \leq P_Y(y) \leq 1 \tag{19}$$

$$\sum_{Y} P_Y(y) = 1 \tag{20}$$

Dado um valor y da variável Y, se tomamos a somatória de cada valor de FMP de Y para valores menores ou igual a y, temos a definição da função de distribuição acumulada (FDA) para uma variável aleatória discreta, que é explicitada em (21).

$$F_Y(y) = \sum_{-\infty}^{y} P_Y(y) \tag{21}$$

Exemplos de uma FMP e FDA discreta podem ser observadas, respectivamente, nos Gráficos 7 e 8 no tópico 5.2.

3.4.2 Variável Contínua

Diferentemente da variável discreta, na qual é possível definir um valor específico de probabilidade para cada resultado possível da variável, para uma variável contínua, devido a suas características, normalmente, a probabilidade de ela tomar um valor específico é zero. Dessa forma, a atribuição da probabilidade é dada, primeiramente, através de sua FDA que, assim como no caso discreto, é definida como a probabilidade de Y tomar um valor que seja inferior ou igual a y. Em (21), (22) e (23), temos, respectivamente, a definição da FDA contínua de Y e suas propriedades, onde ela deve sempre estar entre [0,1] e deve ser igual a zero em menos infinito e igual a um em mais infinito.

$$F_Y(y) = Pr(Y \leq y) \tag{22}$$

$$F_Y(-\infty) = 0, F_Y(\infty) = 1 \tag{23}$$

$$0 \leq F_Y(y) \leq 1 \tag{24}$$

Contudo, a operação com uma FDA é complexa, além de não fornecer muitas informações sobre as propriedades estatísticas da variável, assim é definida a função densidade de probabilidade (FDP) que consiste na derivada de sua FDA contínua, como explicitado em (25), (26) e (27) em conjunto com sua propriedade de ser sempre positiva.

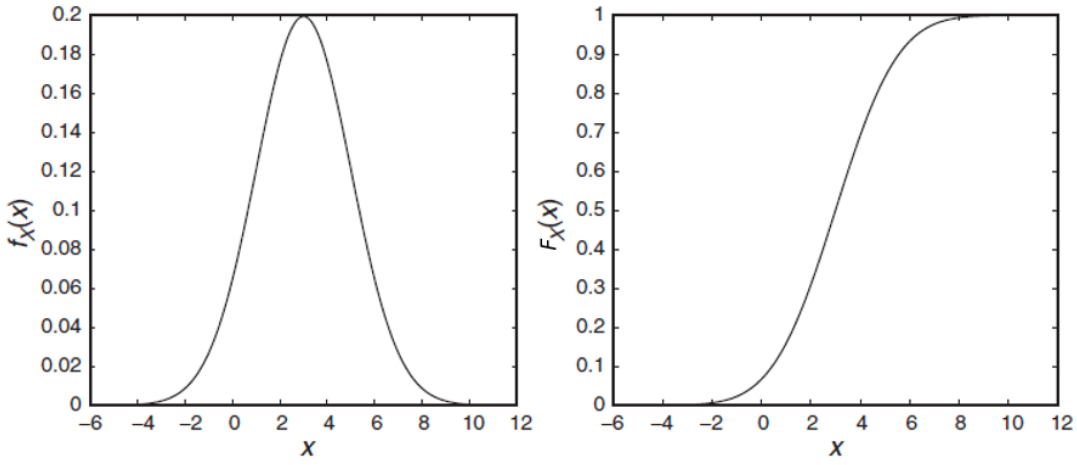
$$f_Y(y) = \frac{dF_Y(y)}{dy} \tag{25}$$

$$F_Y(y) = \int_{-\infty}^{y} f_Y(y)\, dy \tag{26}$$

$$f_Y(y) \geq 0 \tag{27}$$

Na Figura 13 é explicitado um exemplo de FDP e FDA de uma variável aleatória contínua, o exemplo trata de uma variável aleatória gaussiana.

Figura 13 – FDP e FDA de uma Variável Aleatória Gaussiana Contínua



Fonte: MILLER; CHILDERS, 2012.

Informações mais detalhadas sobre variáveis aleatórias e processos estocásticos podem ser averiguadas em Miller e Childers (2012).

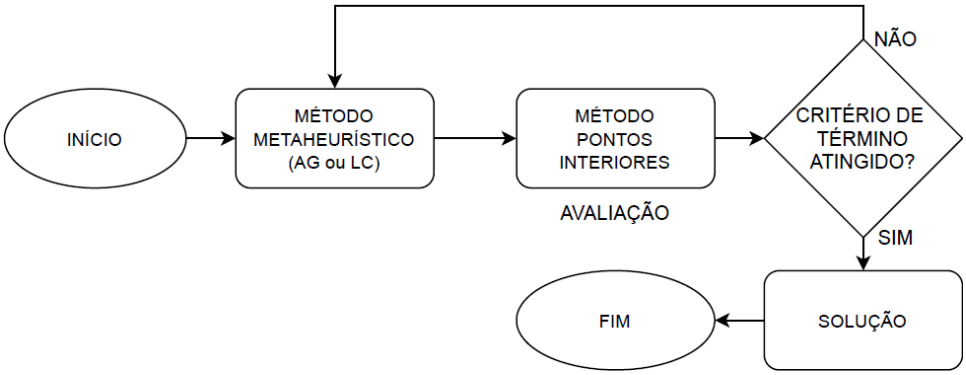
4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da referida pesquisa, é necessário, primeiramente, definir as considerações do problema, seguidas do tratamento das variáveis estocásticas. Depois, seguem-se a definição do modelo matemático de solução da etapa do processo de otimização referente aos métodos meta-heurísticos (AG e LC) e, por fim, a formulação matemática (função objetivo e restrições do problema) utilizada na etapa do processo de otimização referente ao método PI.

4.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA

- O sistema de distribuição é um sistema equilibrado, sendo a otimização realizada em seu equivalente monofásico. Esta decisão tem como base a simplificação do problema para garantir a convexidade de seu espaço de busca;
- Nenhum GD e ECVE poderá ser alocado na mesma barra que outro elemento semelhante;
- Embora seja uma situação rara, é considerado que o detentor da operação do alimentador também seja o detentor dos GDs e ECVEs, tendo liberdade de instalá-los em qualquer região do alimentador. O resultado obtido, tendo em vista tal consideração, poderá servir como base para a implementação de políticas de incentivo à instalação de GDs e ECVEs por parte do detentor da operação do alimentador;
- No método de otimização híbrido, a função de avaliação (função *fitness*) da etapa metaheurística de otimização consiste na função objetivo do método clássico, o custo operacional, o qual deve ser minimizado de acordo com o perfil de alocação retornado como solução desta etapa, conforme explicitado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama do Processo de Otimização do Método Híbrido



Fonte: Produção do próprio autor.

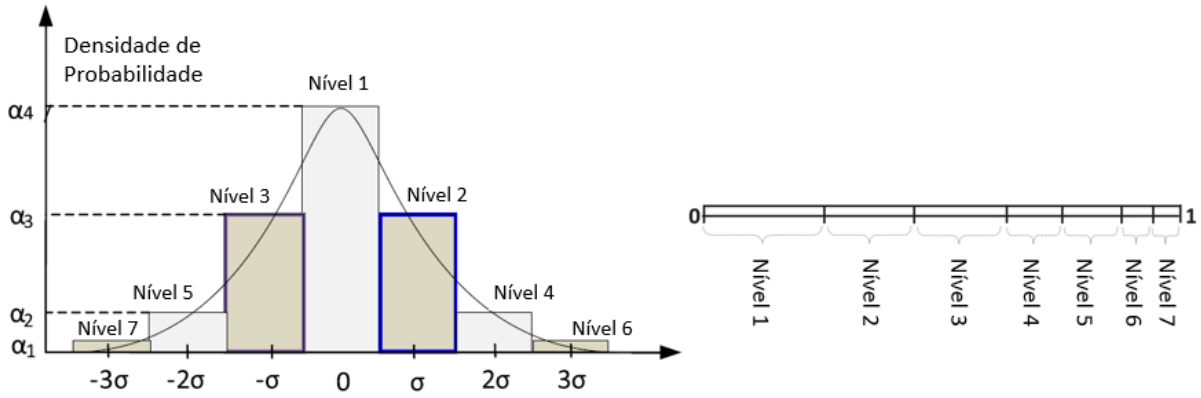
4.2 TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS ESTOCÁSTICAS

Quando se opera com VEs, se opera com uma carga com características estocásticas no que diz respeito à demanda e ao período de conexão à rede de distribuição. Portanto, como mencionado no tópico 3.4, para uma operação com esses tipos de variáveis é necessário encontrar a FDP ou a FMP.

No problema em questão, a demanda foi analisada considerando como variável o estado de carga (SOC - *State Of Charge*) inicial da bateria do veículo, enquanto o período de conexão à rede de distribuição foi analisado considerando a intensidade de tráfego de veículos durante as horas do dia, especificamente no translado entre casa-trabalho e trabalho-casa.

Neste trabalho, as FDPs e FMPs não foram empregadas na simulação do método, mas sim na geração da base de dados utilizada no problema. Para tal, foi aplicado o método da roleta, apresentado em Mohammadi, Soleymani e Mozafari (2014), que consiste, primeiramente, em dividir cada possível valor da variável estocástica em níveis de probabilidade equivalentes à sua FDP ou FMP, conforme demonstrado na Figura 15. Em seguida, ocorre a geração de um número aleatório entre [0,1] e, de acordo com o valor gerado, será selecionado um nível e definido o valor da variável estocástica (MOHAMMADI; SOLEYMANI; MOZAFARI, 2014). Para o caso de uma FMP que já corresponde à probabilidade de uma variável discreta tomar cada valor possível, os níveis de probabilidade correspondem à própria FMP.

Figura 15 – Aplicação do Método da Roleta



Fonte: MOHAMMADI; SOLEYMANI; MOZAFARI *et al*, 2014

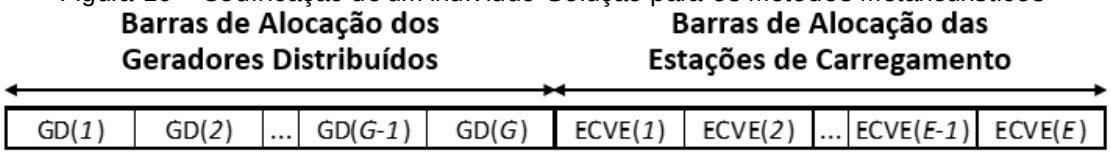
Por fim, após a criação da base de dados dos VEs, os mesmos serão distribuídos de maneira aleatória em ECVEs, as quais, por sua vez, correspondem ao ativo que será, de fato, alocado na rede de distribuição pelos métodos metaheurísticos mencionados a seguir.

4.3 MODELO DE SOLUÇÃO DOS MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

No referido trabalho, serão utilizados dois métodos metaheurísticos, o AG e o LC. Ambos foram implementados através do programa MATLAB e operados em simulações distintas objetivando chegar a uma solução de excelente qualidade para o perfil de alocação dos GDs e ECVEs na rede de distribuição. Para tal, os dois métodos utilizaram como função de avaliação (função *fitness*) a função objetivo do problema, apresentada no tópico seguinte.

Dado um número total de *G* GDs e *E* ECVEs, a codificação de um indivíduo solução é explicitada na Figura 16 e representa a solução geral, comum aos dois métodos metaheurísticos, utilizada para definir em qual região do alimentador de distribuição cada ativo será alocado. Assim, o indivíduo é dividido em duas seções: a primeira, referente à alocação dos GDs e, a segunda, referente à alocação das ECVEs. As variáveis da solução tomam valores inteiros que variam entre dois e a quantidade de barras do alimentador e, além disso, definem em qual barra cada recurso será conectado.

Figura 16 – Codificação de um Indivíduo Solução para os Métodos Metaheurísticos



Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando um exemplo onde dois GDs e três ECVEs devem ser alocadas em um alimentador de vinte barras, uma solução possível seria alocar o primeiro e segundo gerador nas barras 5 e 17, respectivamente, e alocar a primeira, segunda e terceira estação de carregamento nas barras 9, 13 e 6, respectivamente. Para este caso hipotético, a solução geral apresentada acima tomaria a formato apresentado na Tabela 10, onde os dois primeiros valores representam os pontos de alocação do primeiro e segundo GD, respectivamente, e os três últimos valores representam os pontos de alocação da primeira, segunda e terceira ECVE, respectivamente.

Tabela 10 – Exemplo de um Indivíduo Solução para os Métodos Metaheurísticos

	GD1	GD2	ECVE1	ECVE2	ECVE3
Barra	5	17	9	13	6

Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nas subseções que se seguem, será tratada a formulação matemática do problema de otimização, que consiste nas equações da função objetivo e das restrições que norteiam o processo de otimização pelo método de pontos interiores; todas essas equações são baseadas nas apresentadas em Rueda-Medina e outros (2013).

4.4.1 Função Objetivo

A função objetivo que rege o presente trabalho é a minimização do custo operacional de um sistema de distribuição radial e está demonstrada em (28).

$$\sum_{t=1}^{T}[Cs(t)\ Ps(t)] + \sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G}[Cg(g,t)\ Pg(g,t)] \tag{28}$$

$$\forall\ t \in [1,T]; \forall g \in [1,G]$$

Onde o primeiro termo representa a somatória no tempo do custo de geração da subestação ($Cs(t)$) multiplicado pela potência ativa fornecida pela mesma ($Ps(t)$); e o segundo termo representa a somatória no tempo do custo de geração de um GD ($Cg(g,t)$) multiplicado pelo seu fornecimento de potência ativa ($Pg(g,t)$) para cada um dos GDs alocados. Em conjunto, esta equação fornece o custo operacional total do sistema analisado e a sua minimização é a finalidade do problema de otimização como um todo.

4.4.2 Restrições do Balanço de Potência

A garantia do balanço de potência ativa e reativa no alimentador é crucial para se assegurar o princípio da conservação de energia em qualquer sistema. Dessa forma, as restrições explicitadas nas equações (29) e (30) (CESPEDES, 1990) são preponderantes para a preservação do fluxo de potência nos circuitos.

$$\sum_{j=1}^{B} P(j,i,t) - \sum_{j=1}^{B}[P(i,j,t) + R(i,j)\ I(i,j,t)^2] + Ps(t) + \sum_{g=1}^{G}[d(i,g)\ Pg(g,t)] = \\ = Pd(i)\ fc(t) + \sum_{e=1}^{E}\sum_{v=1}^{N}[ce(i,e)\ cv(e,v,t)\ Pv(v,t)] \tag{29}$$

$$\forall\ t \in [1,T]; \forall\ i \in [1,B]; \forall\ j \in [1,B]; \forall\ g \in [1,G]; \forall\ e \in [1,E]; \forall\ v \in [1,N]$$

$$\sum_{j=1}^{B} Q(j,i,t) - \sum_{j=1}^{B}[Q(i,j,t) + X(i,j)\ I(i,j,t)^2] + Qs(t) + \\ + \sum_{g=1}^{G}[d(i,g)\ Qg(g,t)] = Qd(i)\ fc(t) \tag{30}$$

$$\forall\ t \in [1,T]; \forall\ i \in [1,B]; \forall\ j \in [1,B]; \forall\ g \in [1,G]$$

Assim, para todo instante de tempo t, dada uma barra i do alimentador, o primeiro termo da equação (29) representa o somatório do fluxo de potência ativa de todas as barras j diretamente a montante da barra i para a mesma ($P(j,i,t)$); o segundo termo representa o somatório da potência ativa que flui da barra i para todas barras j diretamente a jusante ($P(i,j,t)$) e o somatório das perdas de potência no ramo que as conecta que são dadas pela multiplicação da resistência do ramo entre as barras i e j ($R(i,j)$) com o quadrado da corrente passante no mesmo ramo ($I(i,j,t)$); o terceiro termo se refere à potência ativa fornecida pela subestação ($Ps(t)$); o quarto corresponde ao somatório das potências ativas fornecida por qualquer GD conectado em i ($Pg(g,t)$) multiplicado pelo índice binário de estado de conexão do GD g em uma barra i ($d(i,g)$) que é igual a zero ou um quando o GD está, respectivamente, desconectado ou conectado; o quinto está relacionado à demanda de potência ativa da barra i ($Pd(i)$) multiplicada pelo fator de carga daquele instante de tempo ($fc(t)$); e o sexto e último termo representa a somatória da demanda de potência ativa dos VEs conectados em i ($Pv(v,t)$) multiplicado pelos índices binários de conexão da ECVE e em uma barra i ($ce(i,e)$) e de um VE v em uma ECVE e em um instante de tempo t ($cv(e,v,t)$), ambos funcionam conforme o índice $d(i,g)$.

A equação (30) pode ser interpretada de maneira análoga, de forma que ela representa os fluxos de potências reativas no sistema com a exceção de não englobar a demanda dos VEs. Onde $Q(j,i,t)$ é a potência reativa que flui entre uma barra j diretamente a montante da barra i para a mesma; $Q(i,j,t)$ corresponde à potência reativa que flui de uma barra i para todas as barras j diretamente a jusante; $X(i,j)$ corresponde à reatância do ramo entre as barras i e j; $Qs(t)$ é a potência reativa fornecida pela subestação; $Qg(g,t)$ representa a potência reativa fornecida por um GD; e $Qd(i)$ corresponde à demanda de potência reativa da barra i.

Ademais, o fluxo de potência no alimentador impacta diretamente os níveis de tensão em cada barra e de corrente em cada ramo. Dessa forma, faz-se necessário definir restrições que correlacionam tais variáveis e que são apresentadas nas equações (31) e (32) (CESPEDES, 1990).

$$\left(V(i,t)\right)^2 - 2\ [R(i,j)\ P(i,j,t) + X(i,j)\ Q(i,j,t)] - Z(i,j)\ \left(I(i,j,t)\right)^2 - \\ - \left(V(j,t)\right)^2 = 0 \tag{31}$$

$$\forall\ t \in [1,T];\ \forall\ i,j \in [1,B]$$

$$\left(I(i,j,t)\right)^2\ \left(V(j,t)\right)^2 = \left(P(i,j,t)\right)^2 + \left(Q(i,j,t)\right)^2 \tag{32}$$

$$\forall\ t \in [1,T];\ \forall\ i,j \in [1,B]$$

Assim, a equação (31) corresponde à equação de queda de tensão em um ramo do alimentador em um instante de tempo t , onde o primeiro termo consiste no quadrado da tensão sobre uma barra i ($V(i,t)$); o segundo termo consiste no dobro da soma entre a multiplicação da potência ativa que flui da barra i para j ($P(i,j,t)$) com resistência do ramo entre essas barras ($R(i,j)$) e a multiplicação da potência reativa que flui no mesmo sentido ($Q(i,j,t)$) com reatância do ramo ($X(i,j)$); o terceiro termo explicita a multiplicação da impedância do ramo ($Z(i,j)$) com o quadrado da corrente que flui da barra i para j ($I(i,j,t)$); e o quarto termo corresponde ao quadrado da tensão na barra j ($V(j,t)$).

Já a equação (32) consiste no quadrado da equação da potência aparente, onde o primeiro termo representa o quadrado da corrente que flui da barra i para a barra j ($I(i,j,t)$) multiplicado pelo quadrado da tensão na barra j ($V(j,t)$); e o segundo termo corresponde à soma dos quadrados da potência ativa ($P(i,j,t)$) e reativa ($Q(i,j,t)$) fluindo da barra i para j.

Ambas as equações levam em consideração um instante de tempo t e barras i e j do alimentador que sejam diretamente adjacentes.

Por fim, deve-se garantir que os níveis de correntes nunca sejam superiores aos limites do alimentador e que os níveis de tensão respeitem as normas vigentes. Assim, tem-se as restrições definidas na equação (33) e (34).

$$0 \leq \left(I(i,j,t)\right)^2 \leq \left(I_M(i,j)\right)^2; \tag{33}$$

$$\forall\ t \in [1,T];\ \forall\ i,j \in [1,B];$$

$$(V_m)^2 \leq \left(V(i,t)\right)^2 \leq (V_M)^2; \quad \forall\, t \in [1,T];\ \forall\, i,j \in [1,B]; \tag{34}$$

Novamente considerando um instante de tempo t e barras i e j do alimentador que sejam diretamente adjacentes, a equação (33) garante que uma corrente que flui da barra i para j ($I(i,j,t)$) seja inferior a capacidade máxima de condução do respectivo ramo ($I_M(i,j)$); e a equação (34) define que a tensão em uma barra i ($V(i,t)$) esteja entre os limites inferiores (V_m) e superiores (V_M) das normas vigentes.

4.4.3 Restrições do Fornecimento de Potência da Subestação

Em relação ao fornecimento de potência pela subestação, as equações (35) e (36) garantem, respectivamente, que, para todo instante de tempo t, a potência ativa fornecida pela subestação ($Ps(t)$) seja sempre positiva e que a potência reativa fornecida ou consumida ($Qs(t)$) esteja dentro das fronteiras máxima e mínima, visando respeitar os limites de fator de potência permitido pelas leis correntes.

$$Ps(t) \geq 0 \quad \forall\, t \in [1,T] \tag{35}$$

$$-Ps(t)\ \ tan\ (\cos^{-1}(fp_m))\ \leq Qs(t) \leq Ps(t)\ \ tan\ \ (\cos^{-1}(fp_M))\ \quad \forall\, t \in [1,T] \tag{36}$$

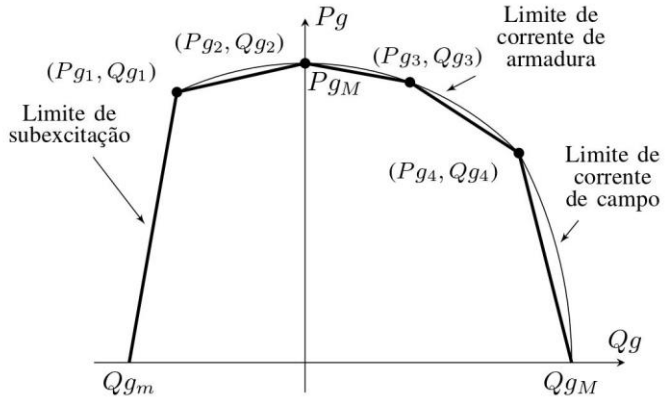
Assim, na equação (35), tem-se como primeiro e único termo a potência ativa fornecida pela subestação. Já na equação (36), o primeiro termo representa o limite inferior de potência reativa fornecida dado pela multiplicação do negativo da potência ativa fornecida com a tangente do arco cosseno do fator de potência capacitivo mínimo (fp_m); enquanto o segundo termo refere-se a potência reativa fornecida pela subestação; e o terceiro termo explicita, utilizando o fator de potência indutivo mínimo (fp_M) de maneira análoga ao primeiro, o limite superior de potência reativa fornecida pela subestação.

4.4.4 Restrições de Fornecimento de Potência dos Geradores Distribuídos

Em seguida, são apresentadas as restrições relacionadas à geração de potência dos GDs alocados no alimentador. Como apresentado no tópico 3.2.1, os geradores síncronos possuem uma curva de capacidade de geração que delimitada sua capacidade de fornecer potência ativa e de gerar ou consumir potência reativa. Esta curva é limitada pelas correntes de campo e de armadura, bem como pelos limites de subexcitação do gerador.

Contudo, a curva de capacidade de geração possui características não-lineares que tornam o processamento mais lento, assim é viável realizar sua aproximação linear, conforme apresentado no Gráfico 6, para que haja um processamento mais célere e fácil.

Gráfico 6 – Curva de Capacidade de Geração de um Gerador Síncrono Linearizada



Fonte: Rueda-Medina et al, 2013.

Dessa forma, as restrições apresentadas nas equações (37), (38), (39), (40), (41) e (42) delimitam essa curva de capacidade linearizada.

$$0 \leq Pg(g,t) \leq Pg_M(g,t) \tag{37}$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G]$$

$$Pg(g,t) \leq \frac{Pg_1(g)}{Qg_1(g) - Qg_m(g)}\,[Qg(g,t) - Qg_m(g)] \tag{38}$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G]$$

$$Pg(g,t) \leq \frac{Pg_2(g) - Pg_1(g)}{Qg_2(g) - Qg_1(g)} [Qg(g,t) - Qg_2(g)] + Pg_2(g) \quad (39)$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G]$$

$$Pg(g,t) \leq \frac{Pg_3(g) - Pg_2(g)}{Qg_3(g) - Qg_2(g)} [Qg(g,t) - Qg_3(g)] + Pg_3(g) \quad (40)$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G]$$

$$Pg(g,t) \leq \frac{Pg_4(g) - Pg_3(g)}{Qg_4(g) - Qg_3(g)} [Qg(g,t) - Qg_4(g)] + Pg_4(g) \quad (41)$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G]$$

$$Pg(g,t) \leq \frac{Pg_4(g)}{Qg_4(g) - Qg_M(g)} [Qg(g,t) - Qg_M(g)] \quad (42)$$

$$\forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G];$$

Assim, na equação (37), tem-se, para todo instante de tempo t e todo GD g, que a potência ativa fornecida pelo gerador síncrono ($Pg(g,t)$) deve estar entre zero e seu valor máximo ($Pg_M(g,t)$); enquanto as equações (38), (39), (40), (41) e (42) definem que essas potências devem ser inferiores ou iguais as retas que linearizam a curva de capacidade, onde o segundo termo refere-se a inclinação da reta; o terceiro termo que multiplica o segundo representa a potência reativa fornecida pelo gerador subtraído por um dos pontos extremos da reta no eixo das abcissas; e o quarto termo, se houver, representa um dos pontos extremos da reta no eixo das ordenadas.

Nas referidas equações as coordenadas $(Qg_1(g), Pg_1(g))$, $(Qg_2(g), Pg_2(g))$, $(Qg_3(g), Pg_3(g))$ e $(Qg_4(g), Pg_4(g))$ representam, respectivamente, o ponto de interseção entre a curva de limite de subexcitação e a de limite de corrente de armadura; o ponto de interseção entre a curva de limite de corrente de armadura e o eixo das ordenadas; o ponto central do arco que a curva de limite de corrente de armadura descreve entre os pontos $(Qg_2(g), Pg_2(g))$ e $(Qg_4(g), Pg_4(g))$; e a interseção entre a curva de limite de armadura e a de limite de corrente de campo. Além disso, $Qg(g,t)$ refere-se à potência reativa fornecida pelo gerador e $Qg_m(g)$ e $Qg_M(g)$ correspondem, respectivamente a seus limites mínimo e máximo. Todas as

equações supracitadas levam em consideração um instante de tempo t e um GD alocado g.

A última restrição em relação à geração dos GDs, apresentada pela equação (43), é referente ao acréscimo ou decréscimo de geração de potência ativa entre dois instantes de tempo consecutivos que deve respeitar o limite máximo de mudança de estado de geração.

$$\Delta Pg_d \ \Delta t \leq Pg(g,t) - Pg(g,t-1) \leq \Delta Pg_c \ \Delta t \quad \forall\, t \in [1,T];\ \forall\, g \in [1,G] \tag{43}$$

Assim, para todo instante de tempo t e GD alocado g, o primeiro termo representa a variação máxima de decréscimo no fornecimento do gerador síncrono (ΔPg_d) multiplicada pelo período (Δt); o segundo termo refere-se à variação de grandeza entre a geração de potência ativa em um instante de tempo ($Pg(g,t)$) e o instante justamente anterior ($Pg(g,t-1)$); e o terceiro explicita, de maneira análoga ao primeiro, a variação máxima de acréscimo no fornecimento de potência ativa do gerador síncrono (ΔPg_c) multiplicada pelo período.

4.4.5 Restrições da Demanda das Estações de Carregamento de Veículos Elétricos e de Estado de Carga do Veículo Elétrico

Em primeiro lugar, são elencadas as restrições referentes à demanda de potência ativa das ECVEs, que é definida como a somatória da demanda de potência de cada VE a ela conectado em um instante de tempo t. Cada VE possui um estado de carga inicial e um momento de conexão que foi definido utilizando o método apresentado no tópico 4.2 e que regerá a demanda de cada uma das estações de carregamento. Desta maneira, as equações (44), (45) e (46) apresentam as restrições de demanda.

$$0 \leq cv(e,v,t)\ Pv(v,t) \leq cv(e,v,t)\ Pv_M(e) \quad \forall\, t \in [1,T];\ \forall\, e \in [1,E];\ \forall\, v \in [1,N] \tag{44}$$

A equação (44) define os limites da potência de carregamento de cada VE, de forma que, para todo instante de tempo t, ECVE e e VE v, a restrição garante que esta potência de carregamento do VE ($Pv(v,t)$) esteja sempre entre zero e a capacidade máxima de fornecimento de potência da estação de carregamento para cada VE ($Pv_M(e)$). O segundo termo da equação consiste na potência de carregamento de um VE multiplicada pelo índice binário de estado de conexão de um VE em uma ECVE em um instante de tempo ($c(e,v,t)$); o terceiro termo representa a máxima capacidade de potência ativa que uma ECVE pode fornecer a um VE a ela conectado multiplicado pelo mesmo índice binário de estado de conexão.

$$cv(e,v,t)\ Pv(v,t) = \\ = cv(e,v,t)\ min\{\left[\frac{Ev_n(v) - Ev(v,t-1)}{\Delta t}\right]; \left[k(v)\ e^{-\lambda(v)*(t-t'-te(v))}\right]; [Pv_M(e)]\} \quad (45)$$

$$\forall t > te(v);\ \forall\ e \in [1,E];\ \forall\ v \in [1,N]$$

A equação apresentada em (45) é uma aproximação da curva de carregamento para uma bateria de lítio apresentada no tópico 3.1.1. Esta forma simplificada fez-se necessária para permitir um melhor processamento do carregamento do VE devido ao caráter não linear desta curva.

Desta forma, a restrição apresentada define que, dado uma ECVE e e um VE v, para um instante de tempo t superior ao instante de conexão do VE na ECVE ($te(v)$), a potência de carregamento do VE ($Pv(v,t)$) será igual ao menor valor entre a máxima potência de carregamento que uma ECVE pode fornecer a um VE ($Pv_M(e)$); ao valor que toma a curva exponencial de decaimento do carregamento de uma bateria de lítio na segunda etapa do processo no instante de tempo justamente anterior; e a potência necessária para completar totalmente o carregamento da bateria até o instante de tempo seguinte.

O primeiro termo da equação consiste na potência de carregamento de um VE em instante de tempo multiplicada pelo índice binário de estado de conexão de um VE em uma ECVE em um instante de tempo ($cv(e,v,t)$). O segundo termo é composto por este mesmo índice multiplicado pelo mínimo dentre três valores, sendo o primeiro a

energia nominal da bateria ($Ev_n(v)$) subtraída pela carga atual ($Ev(v,t-1)$) da mesma e dividida pelo período entre dois instantes consecutivos (Δt); o segundo corresponde à curva exponencial de decaimento de carregamento de uma bateria de lítio, sendo $k(v)$ e $\lambda(v)$ parâmetros de cada curva de carregamento de um VE e o instante de tempo t está deslocado em relação ao momento de conexão do VE em um fator de t'; e, por último, a potência máxima de carregamento que pode ser fornecida a um VE. Como a potência de carregamento na simulação é considerada constante para Δt, este deslocamento em t' da variável t presente na curva exponencial de decaimento de carregamento de uma bateria de lítio visa garantir que a potência em um período de tempo seja sempre superior e mais próxima possível da potência média real para aquele período de forma a assegurar que a energia fornecida ao VE na simulação seja próxima à energia fornecida pela curva real de carregamento em um mesmo período de tempo.

A última restrição em relação à demanda de potência ativa das ECVEs é elencada na equação (46) e define que a potência de carregamento do VE, quando desconectado, deve ser igual a zero.

$$Pv(v,t) = 0 \tag{46}$$
$$\forall\ t \leq te(v) \cup t > ts(v); \forall\ e \in [1,E];\ \forall\ v \in [1,N]$$

Assim, para todo instante de tempo menor ou igual ao momento de entrada ($te(v)$) ou maior ou igual ao momento de saída ($ts(v)$) e dado uma ECVE e e um VE v, a equação acima garante que a potência de carregamento ($Pv(v,t)$) seja zero.

As últimas restrições do problema são referentes ao estado de carregamento de uma bateria para cada VE e são dadas pelas equações (47), (48), (49) e (50).

$$0 \leq cv(e,v,t)\ Ev(v,t) \leq cv(e,v,t)\ Ev_n(v) \tag{47}$$
$$\forall t \in [1,T];\ \forall e \in [1,E]; \forall v \in [1,N]$$

A equação (47) define que, para todo instante de tempo t, dado uma ECVE e e um VE v, a carga da bateria deve sempre estar entre zero e seu valor nominal. Onde o segundo termo consiste no índice binário de estado de conexão de um VE em uma ECVE em um instante de tempo ($cv(e,v,t)$) multiplicado pela carga da bateria de VE naquele instante ($Ev(v,t)$); e o terceiro termo representa este mesmo índice multiplicado pela carga nominal da bateria do VE ($Ev_n(v)$).

$$cv(e,v,t)\ Ev(v,t) = cv(e,v,t)\ Ev(v,t-1) + cv(e,v,t)\ Pv(v,t)\ \eta\ \Delta t; \quad (48)$$
$$\forall t > te(v);\ \forall e \in [1,E]; \forall v \in [1,N];$$

A equação (48) determina, para todo instante de tempo t superior ao momento de conexão do VE ($te(v)$), dado uma ECVE e e um VE v, o processo de carregamento do VE. Onde o primeiro termo consiste na carga do VE no momento ($Ev(v,t)$) e o segundo termo representa a soma da carga do VE no momento diretamente anterior ($Ev(v,t-1)$) com a potência de carregamento daquele período ($Pv(v,t)$) multiplicada pelo período (Δt) e pela eficiência do processo de carregamento (η). É importante destacar que todos os termos são multiplicados pelo índice supracitado.

$$cv(e,v,t)\ Ev(v,t) = cv(e,v,t)\ Ev_n(v)\ \frac{S_i(v)}{100}; \quad (49)$$
$$\forall t = te(v); \forall e \in [1,E];\ \forall v \in [1,N];$$

A restrição apresentada em (49) garante que, para todo instante de tempo t igual ao momento de conexão do VE ($te(v)$), dado uma ECVE e e um VE v, a carga do VE será igual à sua carga inicial, onde o primeiro termo consiste no índice já mencionado multiplicado pela carga do VE naquele momento ($Ev(v,t)$) e o segundo termo representa o mesmo índice multiplicado pela carga nominal do VE ($Ev_n(v)$) e seu estado de carga inicial ($S_i(v)$).

$$cv(e,v,t)\ Ev(v,t) \geq cv(e,v,t)\ Ev_n(v)\ S_f \quad (50)$$
$$\forall t = ts(v); \forall e \in [1,E]; \forall v \in [1,N]$$

Para concluir, a equação (50) define a última restrição que determina que, para todo instante de tempo t igual ao momento de desconexão do VE ($ts(v)$), dado uma ECVE e e um VE v, a carga do VE ($Ev(v,t)$) deverá ser maior ou igual a um limite de carga final, onde o segundo termo consiste no índice $cv(e,v,t)$ multiplicado pela carga nominal do VE ($Ev_n(v)$) e o estado de carga final (S_f).

Após apresentar toda a formulação matemática apresentada, é valido fazer um resumo de todas elas, dessa forma, em suma, a função objetivo é dada pela equação (28) que, por sua vez, é regida pelos valores de potência de cada GD, que são limitados pelas equações (37) a (43), e pela potência fornecida pela subestação, limitada pelas equações (35) e (36). Esses valores de potência são definidos pelas equações de balanço de potência apresentadas em (29), (30), (31), (32), (33) e (34). Além disso, a dinâmica do balanço de potência é alterada com a entrada e saída de veículos elétricos na rede, cuja potência é definida pelas equações (44) a (50).

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados a base de dados dos parâmetros utilizados no problema e seus resultados. Primeiramente, é explicitada as informações sobre o alimentador, seguida dos dados referentes aos VEs e aos GDs e, por fim, a apresentação das soluções para cada método híbrido.

5.1 ALIMENTADOR

Em relação ao alimentador, foi utilizado um sistema de distribuição radial de 37 barras adaptado do “Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos” – (IEEE), cujos dados foram extraídos de Rueda-Medina e outros (2013). Nas Tabelas de 11 a 12 são apresentadas as demandas de cada uma das barras. Essas demandas estão sujeitas a um fator de carga comum ao sistema e variável nas diferentes horas do dia, encontrando-se explicitado na Tabela 6. É importante ressaltar que a numeração das barras foi adaptada em relação à numeração original para simplificação. Além disso, na Tabela A.18 do ANEXO 1, também são demonstrados os parâmetros físicos do sistema supracitado.

Tabela 11 – Demanda do Alimentador (parte 1 de 2)

Barra	Demanda Potência Ativa (kW)	Demanda Potência Reativa (kVAr)
1	0,00	0,00
2	210,00	105,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	28,33	13,33
7	81,00	44,67
8	78,33	43,33
9	144,00	74,00
10	28,33	13,33
11	0,00	0,00
12	14,00	7,00
13	0,00	0,00
14	12,67	6,00
15	128,33	63,33
16	14,00	7,00
17	42,00	21,00
18	38,33	23,33
19	0,00	0,00

Fonte: RUEDA-MEDINA et al, 2013.

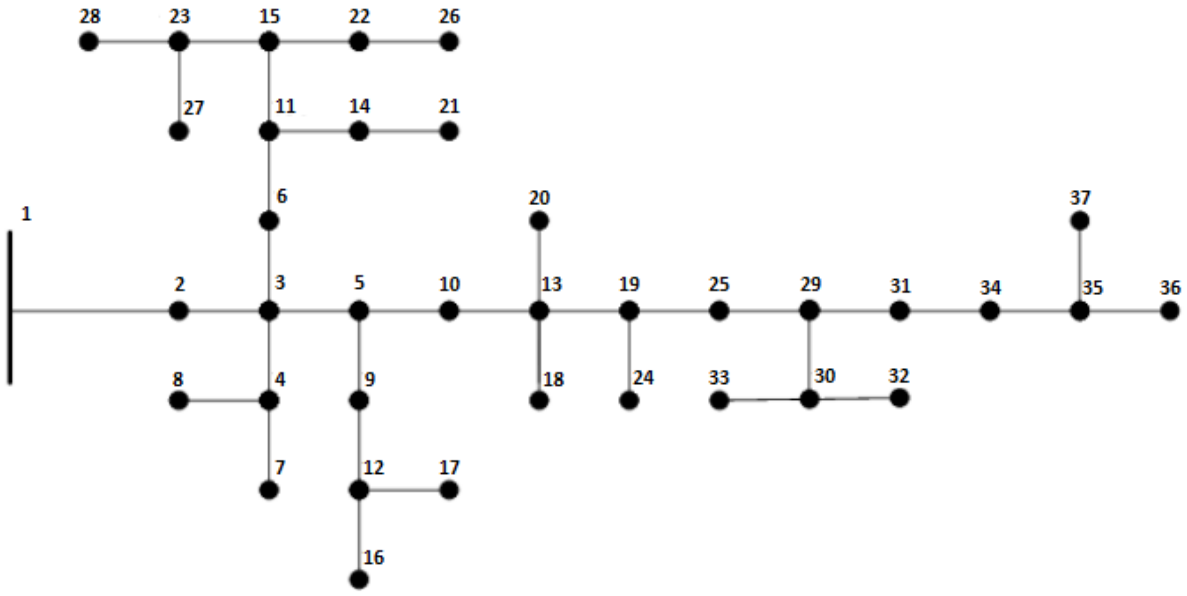
Tabela 12 – Demanda do Alimentador (parte 2 de 2)

Barra	Demanda Potência Ativa (kW)	Demanda Potência Reativa (kVAr)
20	78,33	43,33
21	95,33	53,33
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
24	14,00	7,00
25	28,33	13,33
26	114,00	70,00
27	53,67	26,67
28	14,00	7,00
29	84,00	47,00
30	0,00	0,00
31	46,67	23,33
32	14,00	7,00
33	170,33	84,00
34	0,00	0,00
35	0,00	0,00
36	78,33	43,33
37	214,00	170,00

Fonte: RUEDA-MEDINA et al, 2013.

Destaca-se que, a partir da análise dessa tabela, as barras que possuem maior concentração de demanda de potência ativa, acima de 100 kW, são as barras 2, 9, 15, 26, 33 e 37. Por fim, vale ressaltar que a barra 1 é a referência e onde está localizada a subestação. Na Figura 17 é apresentado o diagrama do alimentador supracitado.

Figura 17 – Diagrama do Alimentador de 37 Barras



Fonte: Produção do próprio autor.

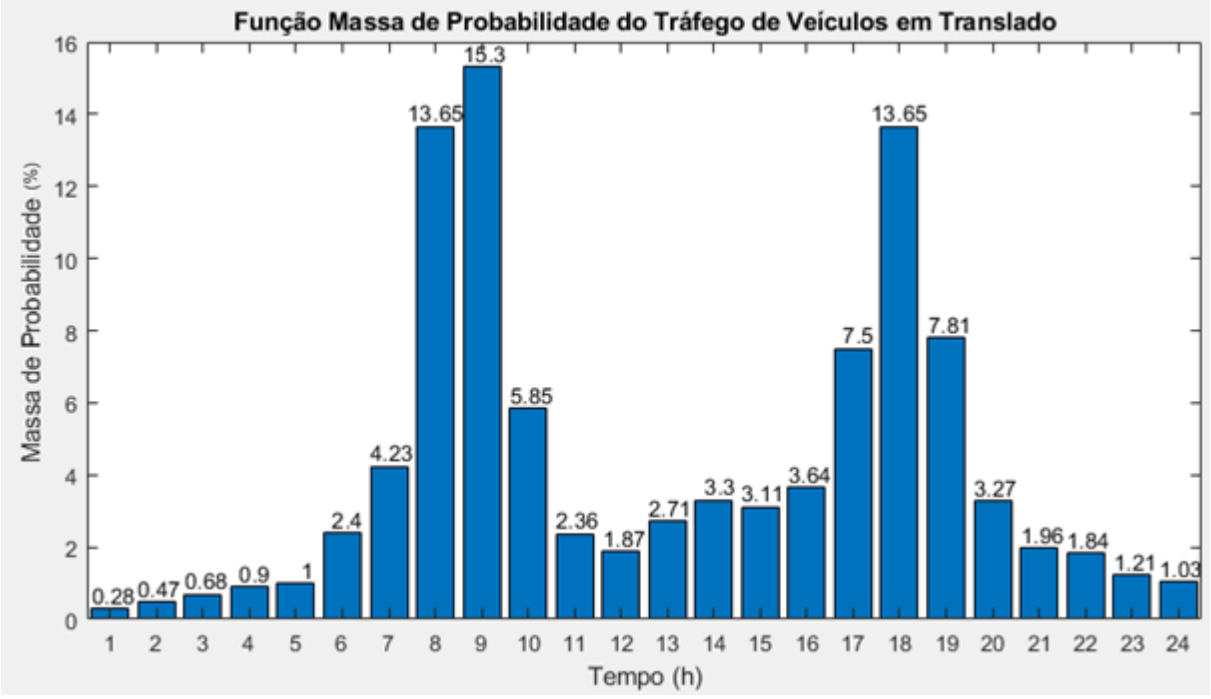
5.2 ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Primeiramente, foi definida qual a quantidade de VEs que seriam adicionados à rede de distribuição. Nesta pesquisa foram estabelecidos 52 veículos do modelo PHEV com bateria de 20 kWh, equivalente a um incremento de, aproximadamente, 10% da demanda de potência ativa do alimentador, valor este considerado como o provável impacto da inserção de VEs sobre o sistema de distribuição (UFRJ, 2014).

É importante salientar, também, que, como mencionado, os VEs obedecem a um padrão estocástico em relação ao momento em que são carregados e ao estado de carga (SOC - *State of Charge*) da bateria ao serem conectados. Em virtude disso, foi necessário encontrar a FDP ou a FMP dessas respectivas variáveis.

Neste caso, para o horário de conexão, foi utilizada a FMP referente ao período de traslado entre casa-trabalho e trabalho-casa no Reino Unido (QIAN et al, 2010), conforme Gráfico 7. Nele, percebe-se que os picos de fluxo de veículos ocorrem nos períodos de 7 às 10 horas e de 16 às 20 horas.

Gráfico 7 – Função Massa de Probabilidade do Tráfego de Veículos em Translado

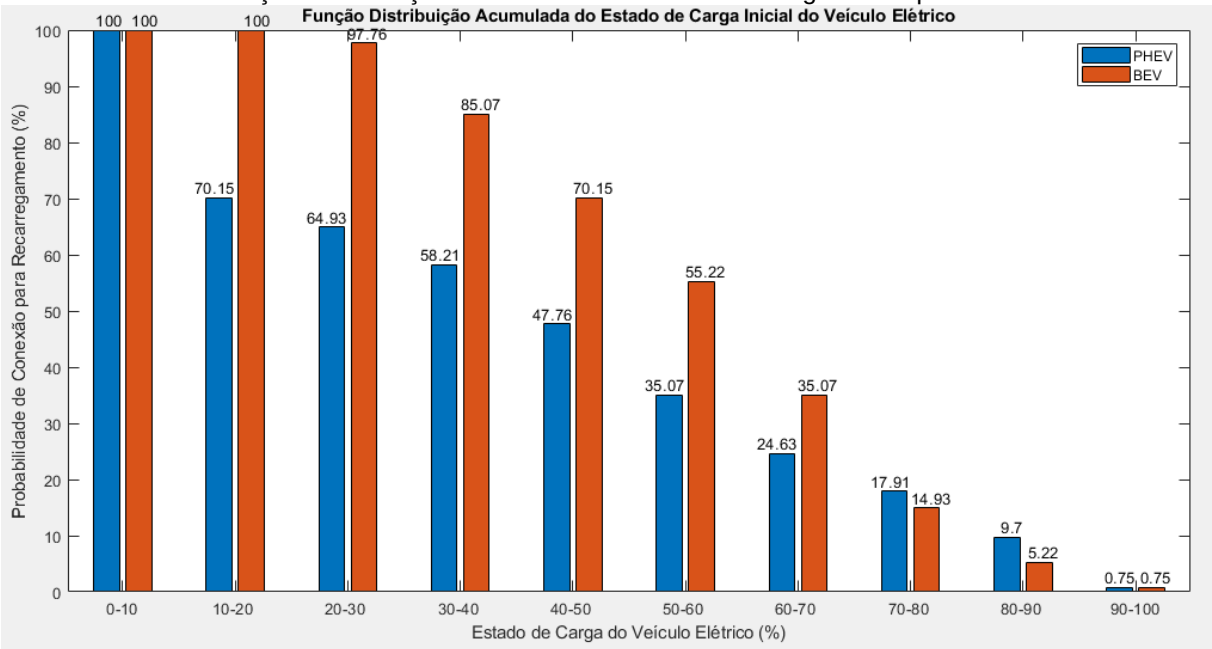


Fonte: QIAN *et al*, 2010.

No que tange ao estado da carga da bateria, foi utilizada a (FDA) discreta, referente à probabilidade de o usuário recarregar o veículo nas respectivas faixas de carga da bateria (Gráfico 8). Esta função advém de uma pesquisa realizada no estado de Idaho, nos EUA (FARIDIMEHR; VENKATACHALAM; CHINNAM, 2017). Neste caso, foi necessário converter os valores cumulativos da FDA para sua FMP correspondente, utilizando a fórmula que relaciona essas duas funções, contemplada na equação (21). A FMP resultante é apresentada no Gráfico 9.

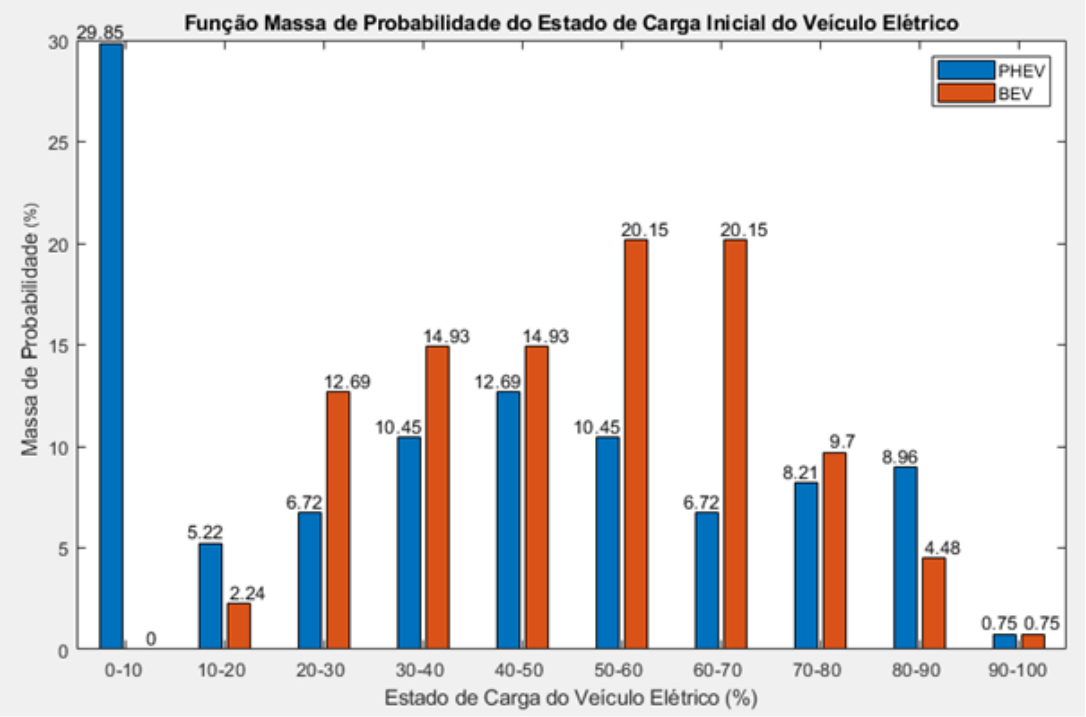
É importante ressaltar que, ao analisar as funções FMP para BEV e PHEV, é possível observar uma maior tendência nos usuários de PHEV de começar a carregar seus veículos em níveis inferiores de SOC. Este comportamento ocorre, principalmente, pela maior segurança transmitida pelos veículos híbridos ao permitirem o uso de motores elétricos e a combustão (FARIDIMEHR; VENKATACHALAM; CHINNAM, 2017).

Gráfico 8 – Função Distribuição Acumulada do Estado de Carga Inicial para PHEV e BEV



Fonte: FARIDIMEHR; VENKATACHALAM; CHINNAM, 2017.

Gráfico 9 – Função Massa de Probabilidade do Estado de Carga Inicial para PHEV e BEV



Fonte: FARIDIMEHR; VENKATACHALAM; CHINNAM, 2017, adaptado pelo autor.

Para o caso do SOC inicial da bateria, a FMP, apresentada no Gráfico 9, não define valores de SOC, mas sim dez faixas de 10% de SOC. Desta forma, o método da roleta foi aplicado de acordo com os níveis de probabilidade apresentados na FMP para os PHEVs objetivando definir, primeiramente, a qual faixa de 10% o SOC inicial do veículo pertence. Após definida, uma nova aplicação do método da roleta foi realizada visando definir um valor específico de SOC inicial a partir da faixa selecionada. Como não se possui uma FMP com níveis de probabilidade específicos para cada valor de SOC possível contido em uma faixa de 10%, foi utilizado, desta vez, dez níveis de probabilidade idênticos, de valor 0,1 cada, representando cada um dos dez possíveis valores inteiros de SOC contidos em uma faixa, para definir o valor final da variável estocástica.

Por fim, os 52 VEs foram distribuídos, aleatoriamente, em sete ECVEs, cada estação possuindo a capacidade de dez carregamentos simultâneos, com o objetivo de permitir uma maior dinâmica de conexão destes VEs, e com o valor de 4 kW como potência máxima de carregamento por veículo, característica da carga lenta. Este método de carregamento foi escolhido por necessitar de uma amostragem de tempo menor e, dessa forma, simplificar o processamento da simulação.

Em relação à curva de carregamento dos VEs, a variável t' que desloca a curva de carregamento da simulação no tempo de forma a garantir que a energia fornecida em um período a um VE seja próxima à energia fornecida pela curva real de carregamento no mesmo período, foi definida em dois valores que serviram de base para a realização de duas simulações em cada método. O primeiro valor foi 1, o que acarreta num desvio padrão médio de energia fornecida entre a curva real e simulada de 0,4699 kWh, e o segundo valor foi 0,55861, que foi calculado como resultado ao aplicar o método AG com o objetivo de minimizar o desvio padrão para que a curva simulada e a real ficassem mais próximas, o desvio padrão para este segundo valor é de 0,2103 kWh. Nos Gráficos 10 é realizada a comparação entre as curvas de carregamento real e simulada para um VE com 30% de SOC inicial para t' igual a 1. A mesma análise é apresenta no Gráfico 11 para t' igual a 0,55861.

Dessa forma, definido os SOC inicial (S_i), o momento de conexão (*te*) e a ECVE de conexão para cada um dos 52 VEs, foi aplicada as equações (1) a (7) para determinar os parâmetros λ e *k* e o momento de desconexão (*ts*) para cada VE, resultando, assim, na geração da base de dados apresentada nas Tabelas 13 a 14. Ademais, a demanda horária de cada uma das ECVEs pode ser aferida na Tabela A.1 do APÊNDICE 2.

Tabela 13 – Base de Dados de VEs (parte 1 de 2)

VE	S_i (%)	te (h)	ts (h)	ECVE	λ	k
1	22	10	16	2	-0,8835	50
2	11	11	18	5	-0,7743	50
3	8	9	16	2	-0,7491	50
4	53	19	23	4	-14,663	50
5	26	18	24	6	-0,9313	50
6	27	11	17	2	-0,944	50
7	68	17	20	3	-21,536	50
8	0	20	28	4	-0,6891	50
9	4	17	25	3	-0,7179	50
10	5	11	18	6	-0,7254	50
11	42	18	23	7	-11,882	50
12	4	8	16	2	-0,7179	50
13	18	6	13	2	-0,8404	50
14	45	8	13	5	-12,53	50
15	20	5	11	3	-0,8614	50
16	48	17	21	7	-13,253	50

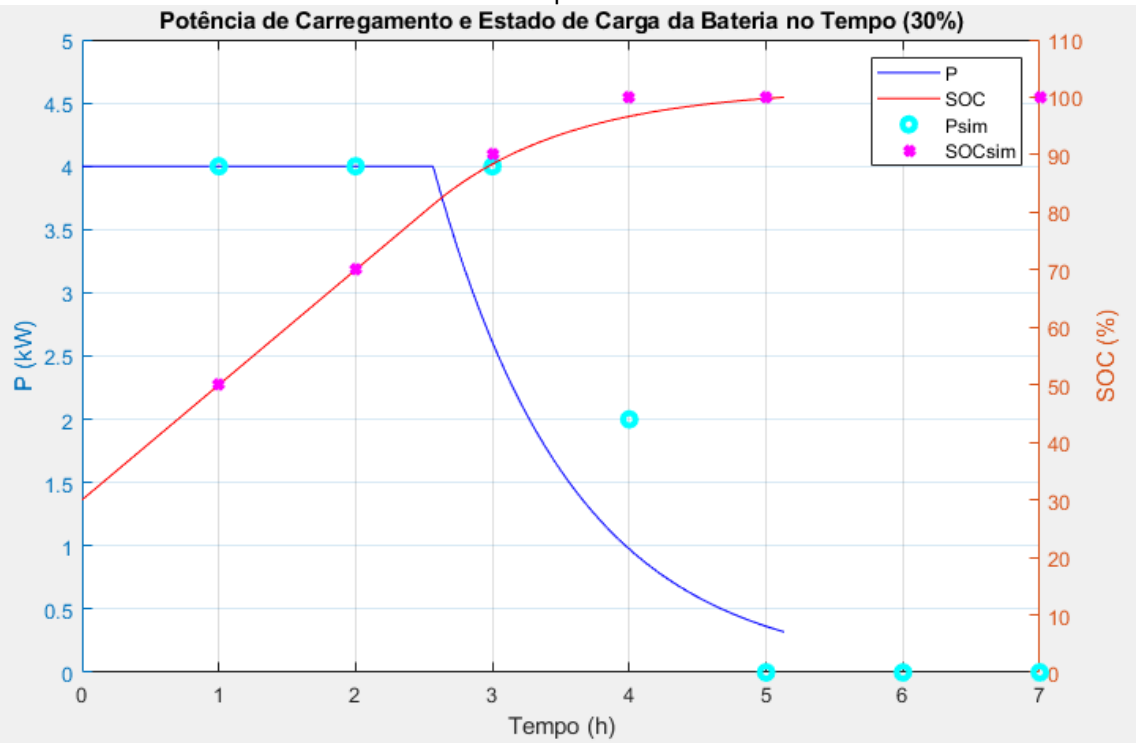
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 14 – Base de Dados de VEs (parte 2 de 2)

VE	S_i (%)	te (h)	ts (h)	ECVE	λ	k
17	17	8	15	7	-0,8303	50
18	25	8	14	5	-0,9189	50
19	44	18	23	7	-12,306	50
20	31	18	24	3	-0,9988	50
21	29	15	21	5	-0,9706	50
22	1	18	26	7	-0,6961	50
23	7	8	15	4	-0,741	50
24	3	8	16	7	-0,7105	50
25	22	8	14	6	-0,8835	50
26	36	8	13	4	-10,768	50
27	8	9	16	5	-0,7491	50
28	8	17	24	7	-0,7491	50
29	6	9	16	2	-0,7331	50
30	60	8	11	3	-17,229	50
31	26	9	15	3	-0,9313	50
32	34	4	9	5	-10,442	50
33	2	22	30	5	-0,7032	50
34	5	3	10	1	-0,7254	50
35	23	9	15	1	-0,895	50
36	17	14	21	5	-0,8303	50
37	26	14	20	4	-0,9313	50
38	6	8	15	6	-0,7331	50
39	33	7	12	1	-10,286	50
40	12	18	25	1	-0,7831	50
41	88	17	18	3	-57,429	50
42	29	16	22	1	-0,9706	50
43	53	10	14	1	-14,663	50
44	5	8	15	6	-0,7254	50
45	10	13	20	6	-0,7657	50
46	37	9	14	1	-10,939	50
47	2	10	18	6	-0,7032	50
48	49	10	14	1	-13,513	50
49	49	18	22	1	-13,513	50
50	33	18	23	1	-10,286	50
51	34	6	11	6	-10,442	50
52	8	16	23	6	-0,7491	50

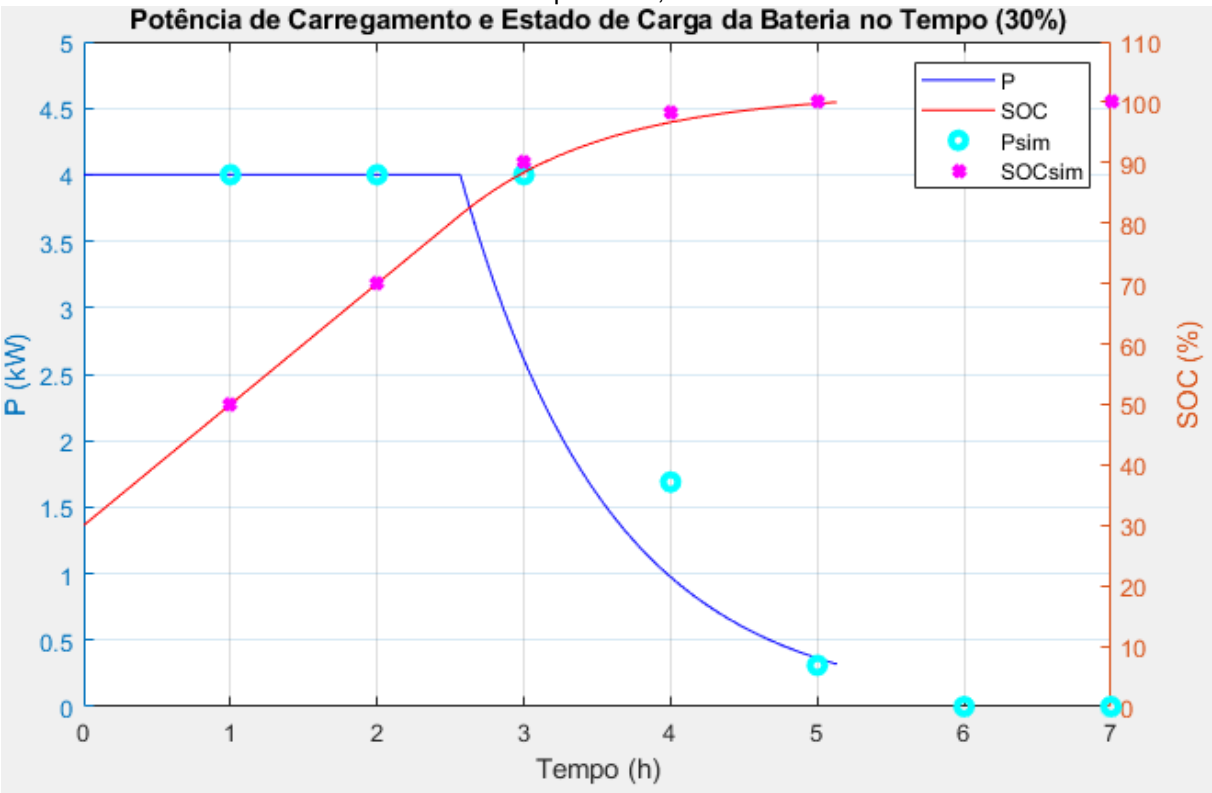
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 10 – Comparação entre Curva de Carregamento Real e Simulada para VE em 30% de SOC Inicial para t'=1



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 11 – Comparação entre Curva de Carregamento Real e Simulada para VE em 30% de SOC Inicial para t'=0,55861



Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 GERADORES DISTRIBUÍDOS

No que diz respeito aos GDs, foram alocados quatro geradores com capacidade máxima de geração de 250 kW e com o fornecimento de potência reativa na faixa de -147 a 222,65 kvar, para os GDs 1 e 2, e -250 e 188,75 kvar, para os GDs 3 e 4. Seus custos de geração utilizados para o cálculo da função objetivo são variados no tempo e estão apresentados na Tabela 15. Estes valores são inferiores aos custos de geração da subestação, que estão apresentados na Tabela 16. Todos os valores de custos operacionais são hipotéticos e foram gerados somente para o escopo deste trabalho.

Tabela 15 – Custo Operacional (R$/kW) Horário dos Geradores Distribuídos

t (h)	GD1	GD2	GD3	GD4
1	12,89	11,66	14,52	10,74
2	12,55	11,84	14,30	10,55
3	12,73	11,76	14,31	10,89
4	12,44	11,56	14,50	10,68
5	12,86	11,49	14,57	10,89
6	12,70	11,38	14,67	10,68
7	12,56	11,36	14,50	10,42
8	12,63	11,86	14,89	10,70
9	12,65	11,35	14,43	10,46
10	12,64	11,73	14,76	10,49
11	12,96	11,59	14,56	10,39
12	12,44	11,88	14,67	10,83
13	12,57	11,82	14,68	10,37
14	12,44	11,44	14,80	10,32
15	12,55	11,88	14,73	10,54
16	12,54	11,68	14,59	10,80
17	12,47	11,45	14,39	10,59
18	12,89	11,55	14,60	10,87
19	12,99	11,83	14,77	10,39
20	12,64	11,78	14,40	10,78
21	12,51	11,38	14,80	10,60
22	12,78	11,69	14,40	10,57
23	12,52	11,62	14,32	10,77
24	12,57	11,61	14,62	10,71

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 16 – Fator de Carga e Custo Operacional da Subestação

t (h)	fc	Cs (R$/kW)
1	0,984	15,88
2	0,864	16,1
3	0,834	15,57
4	0,904	16,03
5	0,935	15,71
6	0,95	15,14
7	0,92	15,23
8	0,91	15,75
9	0,902	16,54
10	0,895	15,63
11	0,887	16,35
12	0,704	15,73
13	0,368	15,43
14	0,267	16,33
15	0,249	16,89
16	0,242	16,45
17	0,269	15,42
18	0,294	16,33
19	0,476	16,53
20	0,864	15,81
21	0,984	16,14
22	0,972	15,52
23	0,976	15,08
24	0,99	16,51

Fonte: RUEDA-MEDINA et al, 2013.

5.4 MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS – PONTOS INTERIORES

O processo de otimização através do método AG-PI retornou como solução os seguintes resultados de alocação dos GDs e ECVEs para t' = 1 e t' = 0,55861, apresentados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17 – Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	30	15	37	35	15	7	35	28	6	22	19

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 18 – Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	37	22	29	3	8	6	18	28	11	22	3

Fonte: Produção do próprio autor.

Para este perfil de alocação, o método PI retornou os valores de potência ativa e reativa da subestação e de cada GD em cada período de tempo, apresentados nas Tabelas 19 e 20, respectivamente, para t' = 1 e Tabelas de 21 a 22 e 23, respectivamente, para t' = 0,55861, que serviram para o cálculo do custo operacional do sistema como um todo. Desta forma, a solução do problema de otimização pelo método AG foi um valor de custo operacional de R$ 460.679,00 para t' = 1 e de R$ 460.677,00 para t' = 0,55861. Ademais, o processo também calculou os valores de tensão em cada barra e corrente em cada ramo, além do fluxo de potência ativa e reativa do alimentador. Os valores calculados para todos os fatores em cada período de tempo estão presentes no APÊNDICE 3 nas Tabelas de A.2 a A.3; de A.4 a A.5; de A.6 a A.7; de A.8 a A.9, respectivamente, para t' = 1. Além disso, nos Gráficos A.1 e A.2 no APÊNDICE 1 são explicitadas, respectivamente, as curvas de convergência do método para t' = 1 e t' = 0,55861. Os valores apresentados nas Tabelas 19 e de 21 a 22 estão, respectivamente, representadas nos Gráficos 12 e 13.

Tabela 19 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)

t (h)	Pss (kW)	Pgd1 (kW)	Pgd2 (kW)	Pgd3 (kW)	Pgd4 (kW)
1	1124,621	175	206,951	74,459	234,625
2	843,291	175	183,909	150,625	234,625
3	836,26	175	225,875	60,741	234,625
4	977,302	175	221,075	60,447	234,625
5	1050,543	175	225,875	45,612	234,625
6	1110,55	194,604	225,875	0	234,625
7	1048,828	193,217	225,875	13,827	234,625
8	1037,125	200,125	225,875	0	234,625
9	964,241	175	195,787	150,625	234,625
10	1041,868	208,443	225,875	16,917	234,625
11	970,265	175	217,17	116,705	234,625
12	671,189	225,875	225,875	17,126	234,625
13	32,205	225,875	235,298	3,052	234,625
14	0	32,285	250	0	239,375
15	0	0	242,389	0	239,375
16	0	0	224,5	0	239,375
17	0	27,883	250	0	239,375
18	0	88,705	250	0	239,375
19	158,577	192,444	225,875	116,874	234,625
20	921,691	175	225,875	85,077	234,625
21	1171,585	175	225,875	58,128	234,625
22	1136,04	175	225,875	47,606	234,625
23	1139,311	175	225,875	40,201	234,625
24	1098,363	175	177,302	150,625	232,829

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 20 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)

t (h)	Qss (kvar)	Qgd1 (kvar)	Qgd2 (kvar)	Qgd3 (kvar)	Qgd4 (kvar)
1	544,679	178,5	133,674	162,489	0
2	408,424	178,5	166,001	135,625	0
3	405,019	178,5	107,125	167,327	0
4	473,329	178,5	113,86	167,431	0
5	508,801	178,5	107,125	172,663	0
6	537,864	150,997	107,125	188,75	0
7	507,971	152,943	107,125	183,873	0
8	502,303	143,251	107,125	188,75	0
9	467,003	178,5	149,337	135,625	0
10	504,6	131,582	107,125	182,783	0
11	469,921	178,5	119,338	147,588	0
12	325,072	107,125	107,125	182,71	0
13	15,598	107,125	65,282	187,674	0
14	0	157,741	0	186,858	-71,875
15	0	125,792	33,794	166,365	-71,875
16	0	73,302	109,054	136,228	-71,875
17	0	158,824	0	187,785	-71,875
18	0	183,411	0	188,75	-71,875
19	76,802	154,026	107,125	147,529	0
20	446,396	178,5	107,125	158,744	0
21	567,425	178,5	107,125	168,249	0
22	550,209	178,5	107,125	171,959	0
23	551,794	178,5	107,125	174,571	0
24	531,962	178,5	175,271	135,625	2,9

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 21 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861) (parte 1 de 2)

t (h)	Pss (kW)	Pgd1 (kW)	Pgd2 (kW)	Pgd3 (kW)	Pgd4 (kW)
1	1127,63	175	209,06	69,593	234,625
2	843,145	175	183,911	150,625	234,625
3	836,335	175	225,875	60,722	234,625
4	978,07	175	221,58	59,271	234,625
5	1050,637	175	225,875	45,588	234,625
6	1110,454	194,608	225,875	0	234,625
7	1056,849	199,243	225,875	0	234,625
8	1036,515	199,965	225,875	0	234,625
9	963,485	175	196,444	150,625	233,915
10	1051,454	215,806	225,875	0	234,625
11	958,287	175	208,262	137,1	234,625
12	670,143	225,875	225,875	15,82	234,625
13	20,15	225,875	233,076	14,118	234,625
14	0	35,945	250	0	239,375
15	0	1,188	243,622	0	239,375
16	0	0	225,527	0	239,375

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 22 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861) (parte 2 de 2)

t (h)	Pss (kW)	Pgd1 (kW)	Pgd2 (kW)	Pgd3 (kW)	Pgd4 (kW)
17	0	29,76	250	0	239,375
18	0	87,165	250	0	239,375
19	141,16	177,894	225,875	150,625	234,625
20	921,352	175	225,811	85,296	234,625
21	1170,463	175	225,875	57,131	234,625
22	1135,823	175	225,875	47,489	234,625
23	1140,026	175	225,875	41,076	234,625
24	1099,267	175	178,297	150,625	232,201

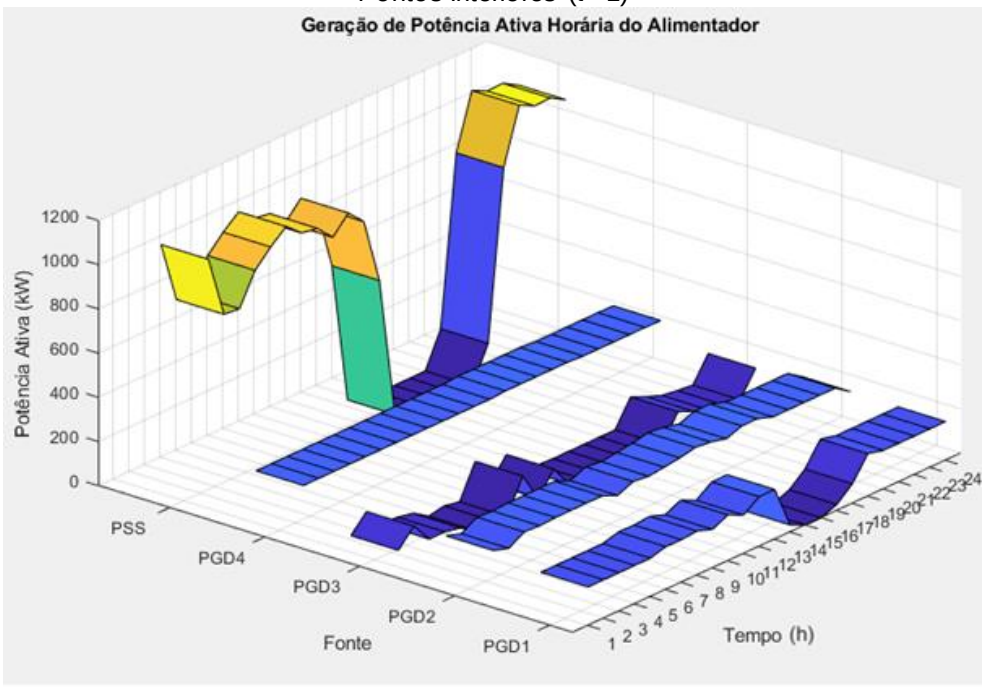
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 23 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)

t (h)	Qss (kvar)	Qgd1 (kvar)	Qgd2 (kvar)	Qgd3 (kvar)	Qgd4 (kvar)
1	546,136	178,5	130,716	164,205	0
2	408,354	178,5	165,999	135,625	0
3	405,056	178,5	107,125	167,334	0
4	473,701	178,5	113,151	167,845	0
5	508,847	178,5	107,125	172,671	0
6	537,817	150,991	107,125	188,75	0
7	511,855	144,488	107,125	188,75	0
8	502,007	143,475	107,125	188,75	0
9	466,637	178,5	148,415	135,625	1,146
10	509,242	121,252	107,125	188,75	0
11	464,12	178,5	131,835	140,395	0
12	324,565	107,125	107,125	183,17	0
13	9,759	107,125	75,148	183,771	0
14	0	155,991	0	188,75	-71,875
15	0	109,054	28,321	188,75	-71,875
16	0	51,358	90,934	176,456	-71,875
17	0	158,043	0	188,75	-71,875
18	0	183,68	0	188,75	-71,875
19	68,367	174,44	107,125	135,625	0
20	446,231	178,5	107,215	158,666	0
21	566,881	178,5	107,125	168,6	0
22	550,104	178,5	107,125	172,001	0
23	552,14	178,5	107,125	174,263	0
24	532,399	178,5	173,875	135,625	3,915

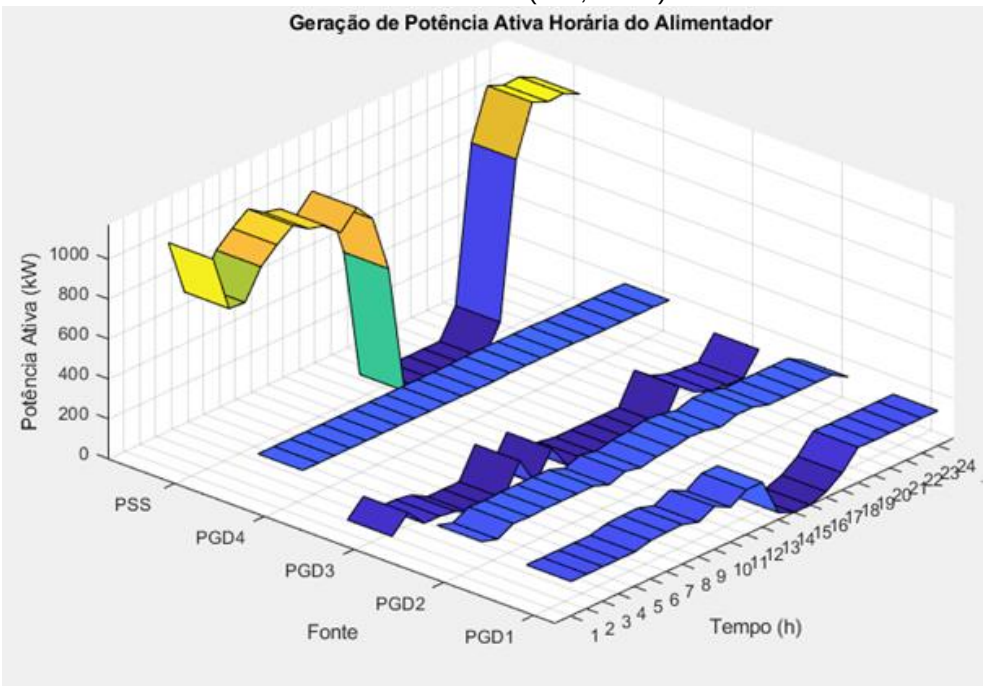
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 12 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 13 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Para que estes valores de custo operacional (R$ 460.679,00 e R$ 460.677,00) pudessem ser melhor analisados, o sistema, cuja solução foi retornada pelo método AG, foi denominado Sistema Otimizado, sendo realizadas simulações e cálculos do

custo operacional para mais três tipos de sistemas. O primeiro, é denominado Sistema Original, o qual representa o sistema de 37 barras antes da alocação dos GDs e das ECVEs; o segundo, é denominado Sistema GDs Fixados, que consiste no processo de otimização realizado novamente, mas com os GDs, arbitrariamente, pré-fixados nas barras de maior concentração de carga (2, 9, 33 e 37), tal ato se baseia em resultados de pesquisas anteriores com tema semelhante; e o último é denominado Sistema Otimizado sem VEs, que, por sua vez, consiste no Sistema Otimizado com a alocação dos GDs, mas sem a alocação da carga correspondente aos VEs. Por fim, foram calculadas as perdas operacionais para cada um dos sistemas supracitados.

Os custos e as perdas operacionais para cada um dos quatros sistemas, bem como os perfis de alocação para o Sistema GDs Fixados e Sistema Otimizado sem VEs, estão apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26, respectivamente, para t' = 1 e nas Tabelas 27, 28 e 29, respectivamente, para t' = 0,55861.

Tabela 24 – Comparativo de Sistemas para o Método AG-PI (t'=1)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Original	530.173,00	1.264,90	-	-
Sistema Otimizado	460.679,00	300,359	61,98	117
Sistema GDs Fixados	462.920,00	407,568	22,08	54
Sistema Otimizado sem VEs	449.360,00	290,204	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 25 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método AG-PI (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	37	2	33	9	16	6	7	24	2	3	9

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 26 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método AG-PI (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4
Barra	30	15	37	35

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 27 – Comparativo de Sistemas para o Método AG-PI (t'=0,55861)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Original	530.173,00	1.264,90	-	-
Sistema Otimizado	460.677,00	303,069	74,26	100
Sistema GDs Fixados	462.903,00	407,608	31,69	54
Sistema Otimizado sem Ves	449.398,00	293,916	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 28 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método AG-PI (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	37	2	33	9	17	3	9	21	2	6	12

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 29 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método AG-PI (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4
Barra	37	22	29	3

Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 MÉTODO DE LOBOS CINZENTOS – PONTOS INTERIORES

Um desenvolvimento análogo foi realizado para o processo de otimização pelo método LC que retornou a seguinte solução para o problema para t' = 1 e t' = 0,55861, apresentados nas Tabelas 30 e 31, respectivamente

Tabela 30 – Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	33	15	37	35	11	33	27	5	26	6	19

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 31 – Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	33	15	37	35	11	30	27	5	26	6	18

Fonte: Produção do próprio autor.

Analogamente ao processo anterior, o método PI retornou a geração de potência ativa e reativa da subestação e de cada GD em cada período de tempo, além dos valores de tensão em cada barra, de corrente em cada ramo e do fluxo de potência ativa e reativa do alimentador. Os dois primeiros estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 32 e de 33 a 34 para t' = 1 e Tabelas 35 e 36 para t' = 0,55861. Os demais são explicitados no APÊNDICE 4, respectivamente, nas Tabelas de A.10 a A.11; de A.12 a A.13; de A.14 a A.15; de A.16 a A.17 para t' = 1. Ademais, nos gráficos A.3 e A.4 no APÊNDICE 1 são ilustradas as curvas de convergência do método para t' = 1 e t' = 0,55861, respectivamente. Os valores apresentados nas Tabelas 32 e 35 estão, respectivamente, representadas nos Gráficos 14 e 15.

Tabela 32 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)

t (h)	Pss (kW)	Pgd1 (kW)	Pgd2 (kW)	Pgd3 (kW)	Pgd4 (kW)
1	1124,566	175	206,993	74,341	234,625
2	843,221	175	183,904	150,625	234,625
3	836,209	175	225,875	60,73	234,625
4	977,129	175	221,009	60,581	234,625
5	1050,475	175	225,875	45,593	234,625
6	1110,382	194,605	225,875	0	234,625
7	1051,525	195,278	225,875	9,09	234,625
8	1036,995	200,116	225,875	0	234,625
9	964,145	175	195,767	150,625	234,625
10	1043,514	209,623	225,875	14,113	234,625
11	966,378	175	214,208	123,365	234,625
12	671,176	225,875	225,875	17,054	234,625
13	27,178	225,875	234,288	9,012	234,625
14	0	32,329	250	0	239,375
15	0	0	242,465	0	239,375
16	0	0	224,521	0	239,375
17	0	27,993	250	0	239,375
18	0	88,903	250	0	239,375
19	163,693	196,38	225,875	108	234,625
20	921,521	175	225,875	85,089	234,625
21	1171,281	175	225,875	58,126	234,625
22	1135,834	175	225,875	47,592	234,625
23	1139,234	175	225,875	40,16	234,625
24	1098,28	175	177,093	150,625	233

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 33 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1) (parte 1 de 2)

t (h)	Qss (kvar)	Qgd1 (kvar)	Qgd2 (kvar)	Qgd3 (kvar)	Qgd4 (kvar)
1	544,652	178,5	133,616	162,53	0
2	408,391	178,5	166,009	135,625	0
3	404,995	178,5	107,125	167,331	0
4	473,245	178,5	113,951	167,383	0
5	508,768	178,5	107,125	172,67	0
6	537,783	150,995	107,125	188,75	0
7	509,277	150,05	107,125	185,544	0
8	502,24	143,263	107,125	188,75	0
9	466,957	178,5	149,364	135,625	0
10	505,397	129,925	107,125	183,772	0
11	468,038	178,5	123,493	145,24	0
12	325,065	107,125	107,125	182,735	0
13	13,163	107,125	69,768	185,571	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 34 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1) (parte 2 de 2)

t (h)	Qss (kvar)	Qgd1 (kvar)	Qgd2 (kvar)	Qgd3 (kvar)	Qgd4 (kvar)
14	0	155,86	0	188,75	-71,875
15	0	113,353	33,461	179,18	-71,875
16	0	66,938	109,024	142,634	-71,875
17	0	157,904	0	188,75	-71,875
18	0	183,494	0	188,75	-71,875
19	79,28	148,505	107,125	150,659	0
20	446,313	178,5	107,125	158,739	0
21	567,277	178,5	107,125	168,249	0
22	550,11	178,5	107,125	171,964	0
23	551,756	178,5	107,125	174,586	0
24	531,921	178,5	175,564	135,625	2,623

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 35 – Geração de Potência Ativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)

t (h)	Pss (kW)	Pgd1 (kW)	Pgd2 (kW)	Pgd3 (kW)	Pgd4 (kW)
1	1124,566	175	206,993	74,341	234,625
2	843,221	175	183,904	150,625	234,625
3	836,209	175	225,875	60,73	234,625
4	977,129	175	221,009	60,581	234,625
5	1050,475	175	225,875	45,593	234,625
6	1110,382	194,605	225,875	0	234,625
7	1051,373	195,195	225,875	9,228	234,625
8	1036,49	199,951	225,875	0	234,625
9	963,7	175	195,623	150,625	234,625
10	1043,364	209,597	225,875	14,049	234,625
11	966,484	175	214,256	123,301	234,625
12	670,194	225,875	225,875	15,728	234,625
13	25,177	225,875	234,169	7,718	234,625
14	0	35,52	250	0	239,375
15	0	0,717	243,659	0	239,375
16	0	0	224,946	0	239,375
17	0	29,315	250	0	239,375
18	0	86,709	250	0	239,375
19	165,167	196,984	225,875	107,548	234,625
20	921,521	175	225,875	85,089	234,625
21	1170,434	175	225,875	57,061	234,625
22	1135,732	175	225,875	47,447	234,625
23	1139,905	175	225,875	41,053	234,625
24	1099,245	175	177,35	150,625	233,046

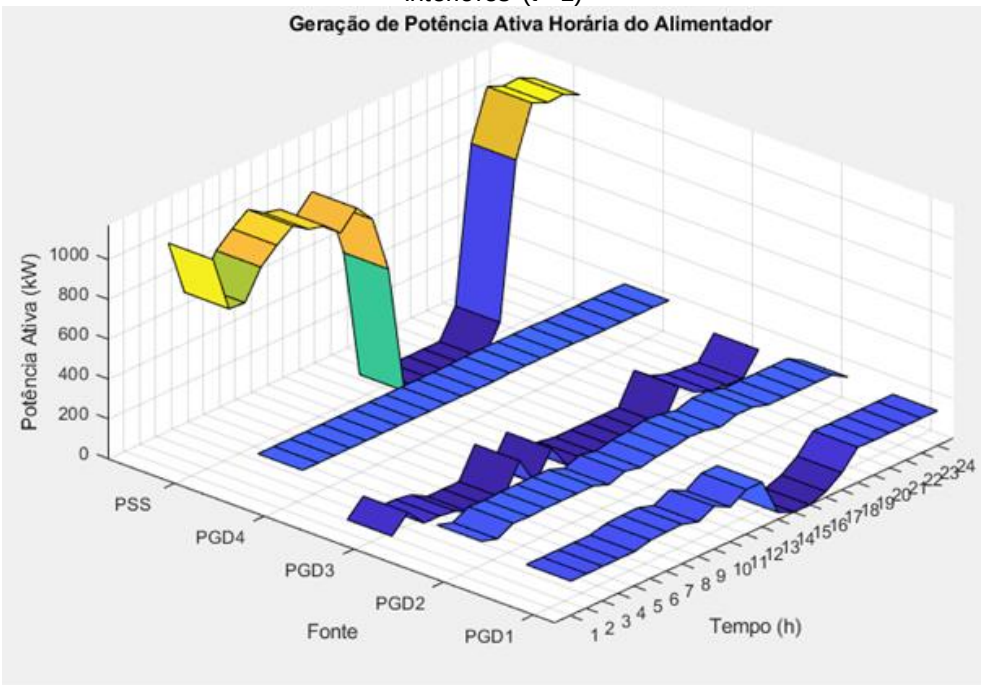
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 36 – Geração de Potência Reativa da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)

t (h)	Qss (kvar)	Qgd1 (kvar)	Qgd2 (kvar)	Qgd3 (kvar)	Qgd4 (kvar)
1	544,652	178,5	133,616	162,53	0
2	408,391	178,5	166,009	135,625	0
3	404,995	178,5	107,125	167,331	0
4	473,245	178,5	113,951	167,383	0
5	508,768	178,5	107,125	172,67	0
6	537,783	150,995	107,125	188,75	0
7	509,203	150,168	107,125	185,495	0
8	501,995	143,495	107,125	188,75	0
9	466,741	178,5	149,567	135,625	0
10	505,324	129,962	107,125	183,795	0
11	468,09	178,5	123,426	145,262	0
12	324,59	107,125	107,125	183,203	0
13	12,194	107,125	70,294	186,028	0
14	0	155,864	0	188,75	-71,875
15	0	116,374	28,157	181,496	-71,875
16	0	67,276	108,428	142,893	-71,875
17	0	157,904	0	188,75	-71,875
18	0	183,494	0	188,75	-71,875
19	79,994	147,657	107,125	150,818	0
20	446,313	178,5	107,125	158,739	0
21	566,867	178,5	107,125	168,625	0
22	550,06	178,5	107,125	172,016	0
23	552,081	178,5	107,125	174,271	0
24	532,389	178,5	175,203	135,625	2,549

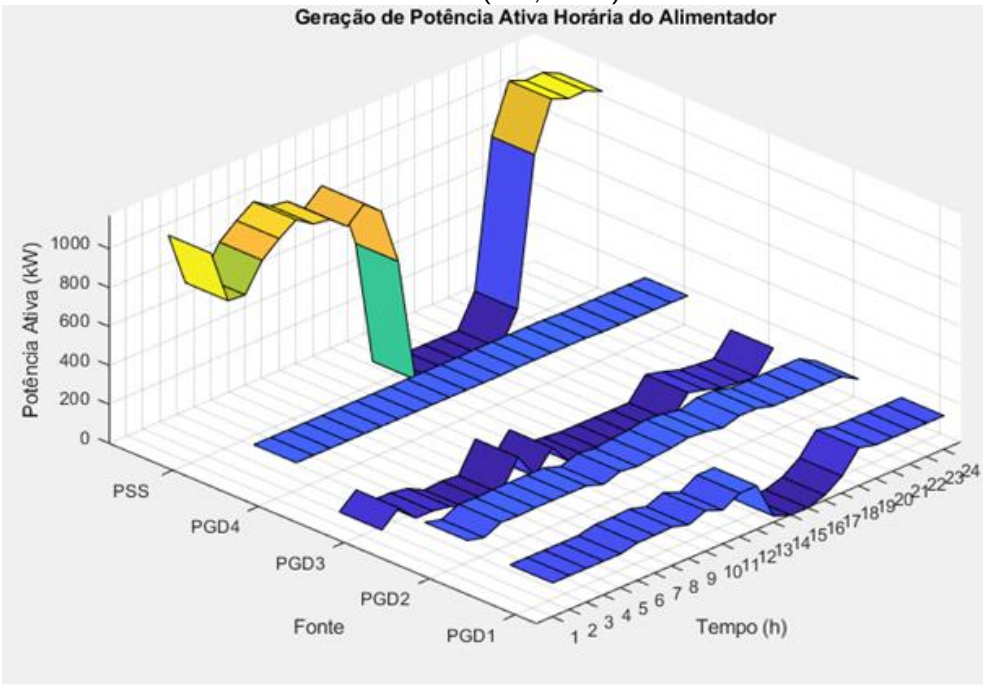
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 14 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 15 – Geração de Potência Ativa Horária da Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, a solução do problema de otimização pelo método LC retornou um valor de custo operacional para o Sistema Otimizado de R$ 460.654,00 e R$ 460.639,00 para $t' = 1$ e $t' = 0{,}55861$, respectivamente. Da mesma forma, foram realizados simulações e cálculos de custos para mais três sistemas: Sistema Original, Sistema GDs Fixados e Sistema Otimizado sem VEs, além do cálculo das perdas operacionais para todos. Estes dados, bem como os perfis de alocação para os dois últimos sistemas, se encontram, respectivamente, nas Tabelas 37, 38 e 39 para $t' = 1$ e nas Tabelas 40, 41 e 42 para $t' = 0{,}55861$.

Tabela 37 – Comparativo de Sistemas para o Método LC-PI (t'=1)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Original	530.173,00	1.264,90	-	-
Sistema Otimizado	460.654,00	298,878	54,8	120
Sistema GDs Fixados	462.898,00	406,588	5,3	60
Sistema Otimizado sem VEs	449.339,00	288,988	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 38 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método LC-PI (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	37	2	33	9	2	6	8	3	5	9	4

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 39 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método LC-PI (t'=1)

	GD1	GD2	GD3	GD4
Barra	33	15	37	35

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 40 – Comparativo de Sistemas para o Método LC-PI (t'=0,55861)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Original	530.173,00	1.264,90	-	-
Sistema Otimizado	460.639,00	298,998	79,49	120
Sistema GDs Fixados	462.880,00	406,457	16,95	57
Sistema Otimizado sem VEs	449.339,00	288,988	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 41 – Perfil de Alocação para o Sistema GDs Fixados para o Método LC-PI (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4	ECVE1	ECVE2	ECVE3	ECVE4	ECVE5	ECVE6	ECVE7
Barra	37	2	33	9	2	4	12	6	9	3	8

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 42 – Perfil de Alocação para o Sistema Otimizado sem VEs para o Método LC-PI (t'=0,55861)

	GD1	GD2	GD3	GD4
Barra	33	15	37	35

Fonte: Produção do próprio autor.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será feita a análise dos resultados apresentados no Capítulo 5. Ela será realizada, primeiramente, de maneira individual para cada método híbrido, para ambos os valores de t'. E, por fim, será feita uma análise comparando ambos os métodos somente para o caso do Sistema Otimizado.

6.1 MÉTODO HÍBRIDO ALGORITMOS GENÉTICOS-PONTOS INTERIORES

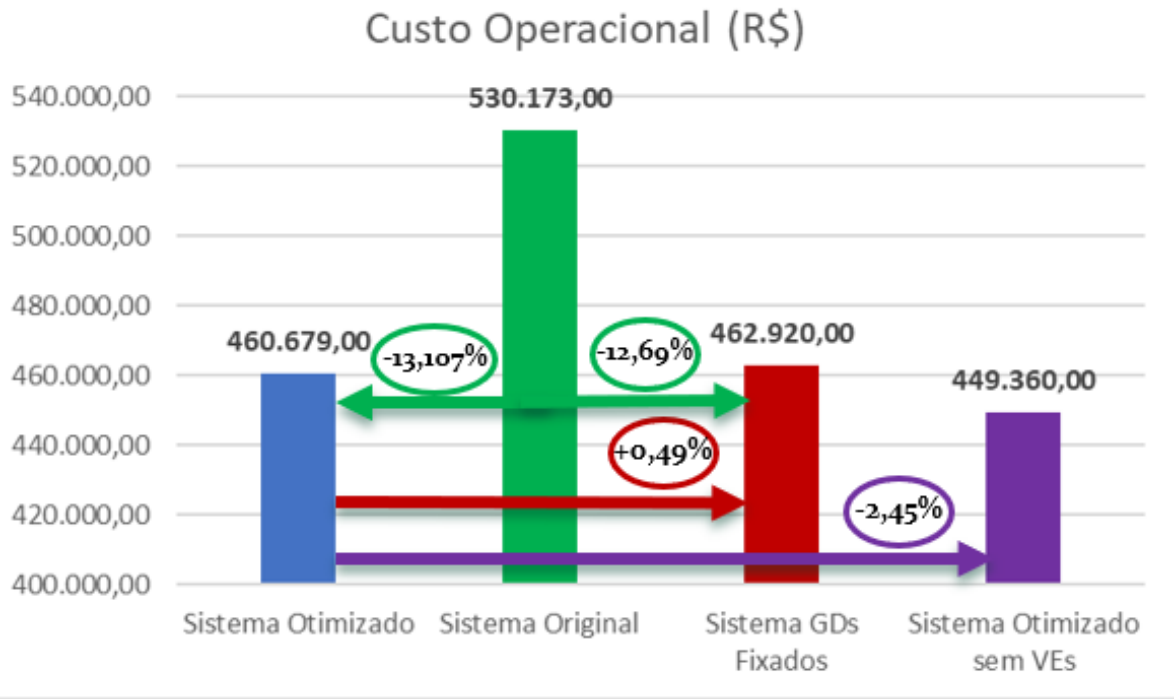
Em consonância com os resultados do método AG-PI apresentados nas Tabelas 24 e 27, observa-se que o Sistema Otimizado reduziu os custos operacionais em aproximadamente 13,107% (R$ 69.494,00), para t' = 1, e 13,108% (R$ 69.496,00), para t' = 0,55861, em relação ao Sistema Original. Ademais, apresentou uma redução de 76,25% (964,543 kWh), para t' = 1, e 76,04% (961,83 kWh), para t' = 0,55861, nas perdas do sistema.

O Sistema GDs Fixados apresentou uma redução de 12,69% (R$ 67.253,00), para t' = 1, e 12,68% (R$ 67.270,00), para t' = 0,55861, nos custos operacionais e 67,78% (857,334 kWh), para t' = 1, e 67,78% (857,29 kWh), para t' = 0,55861, nas perdas em relação ao Sistema Original. Além disso, apresentou custos operacionais superiores em 0,49% (R$ 2.241,00), para t' = 1, e 0,48% (R$ 2.226,00), para t' = 0,55861, e perdas superiores em 35,69% (107,209 kWh), para t' = 1, e 34,49% (104,54 kWh), para t' = 0,55861, em relação ao Sistema Otimizado.

Por fim, a análise do Sistema Otimizado sem VEs explicita o impacto da carga das ECVEs no sistema, tendo a sua remoção acarretado uma redução nos custos operacionais de 2,45% (R$ 11.319,00), para t' = 1, e 2,448% (R$ 11.279,00), para t' = 0,55861, e nas perdas de 3,38% (10,155 kWh), para t' = 1, e 3,02% (9,15 kWh), para t' = 0,55861, em relação ao Sistema Otimizado.Os comparativos de custo operacional e perdas para os diferentes sistemas são, também, apresentados de

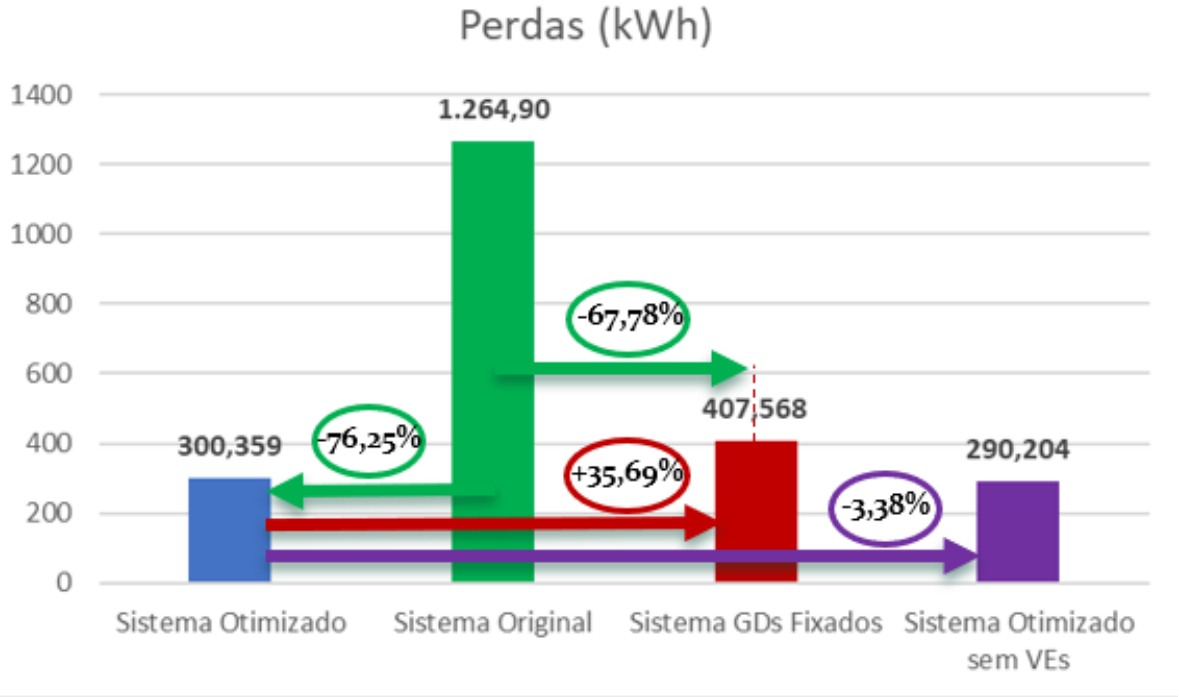
maneira respectiva nos Gráficos 16 e 17, para t' = 1, e nos Gráficos 18 e 19, para t' = 0,55861.

Gráfico 16 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)



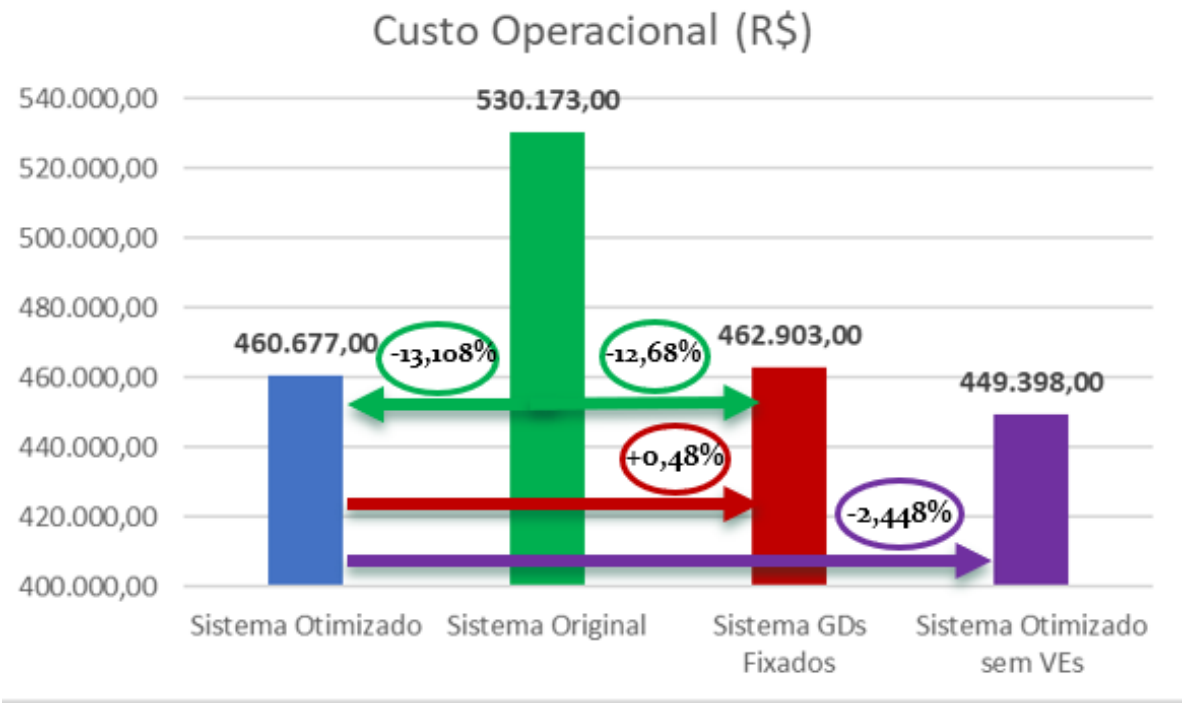
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 17 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=1)



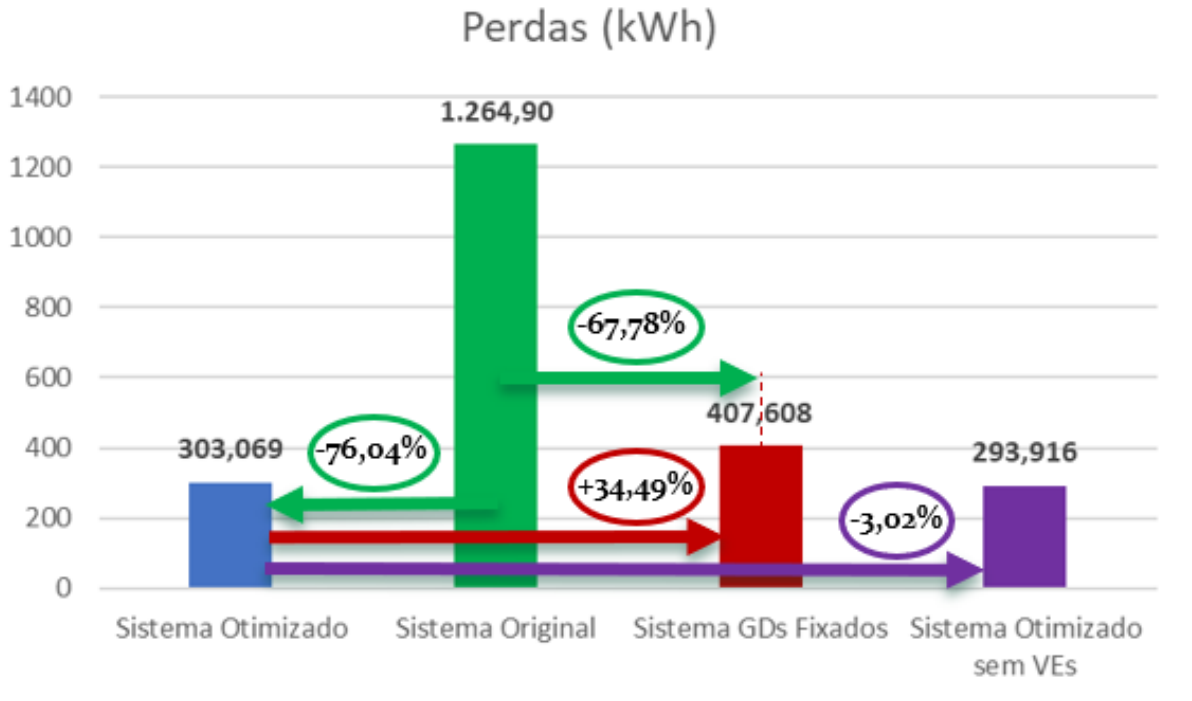
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 18 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 19 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Algoritmos Genéticos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Ademais, é possível observar, comparando a Figura 17 e as Tabelas de 11 a 12, 17 e 18, que o método de AG-PI, para $t' = 1$, alocou tanto os GDs (barras 30, 15, 37 e 35),

quanto as ECVEs (barras 15, 7, 35, 28, 6, 22 e 19) nas proximidades das seções com maior concentração de carga do alimentador (barras 2, 9, 15, 26, 33 e 37). O mesmo pode ser observado para t' = 0,55861, onde os GDs foram alocados nas barras 37, 22, 29 e 3; e as ECVEs nas barras 8, 6, 18, 28, 11, 22 e 3. Este efeito pode ser explicado devido ao fato de que tal alocação, cargas e sistemas de gerações próximas aos centros de cargas, pode acarretar na diminuição do fluxo de potência pelos ramos do alimentador e, por conseguinte, dos custos operacionais advindos das perdas no sistema.

Em se tratando da alocação dos ECVEs para o Sistema GDs Fixados para t' = 1 (barras 16, 6, 7, 24, 2, 3 e 9) e para t' = 0,55861 (barras 17, 3, 9, 21, 2, 6 e 12), apresentados, respectivamente, nas Tabelas 25 e 28, percebe-se que as soluções foram próximas tendo, em sua maioria, ocorrido somente uma permutação de barras ou deslocamento para barras próximas.

Para concluir, uma última análise a se ressaltar é o tempo de operação do algoritmo e o número de iterações. Tendo o Sistema GDs Fixados realizado seu processo 64,38% (39,9 h) mais rápido e com 53,85% (63) menos iterações que o Sistema Otimizado para t' = 1. O mesmo padrão ocorreu para t' = 0,55861, sendo o Sistema GDs Fixados 57,32% (42,57 h) mais rápido e com 46% (46) menos iterações. Quando comparados entre si, o processo para t' = 0,55861 foi, em média, 41% mais lento do que o t' = 1.

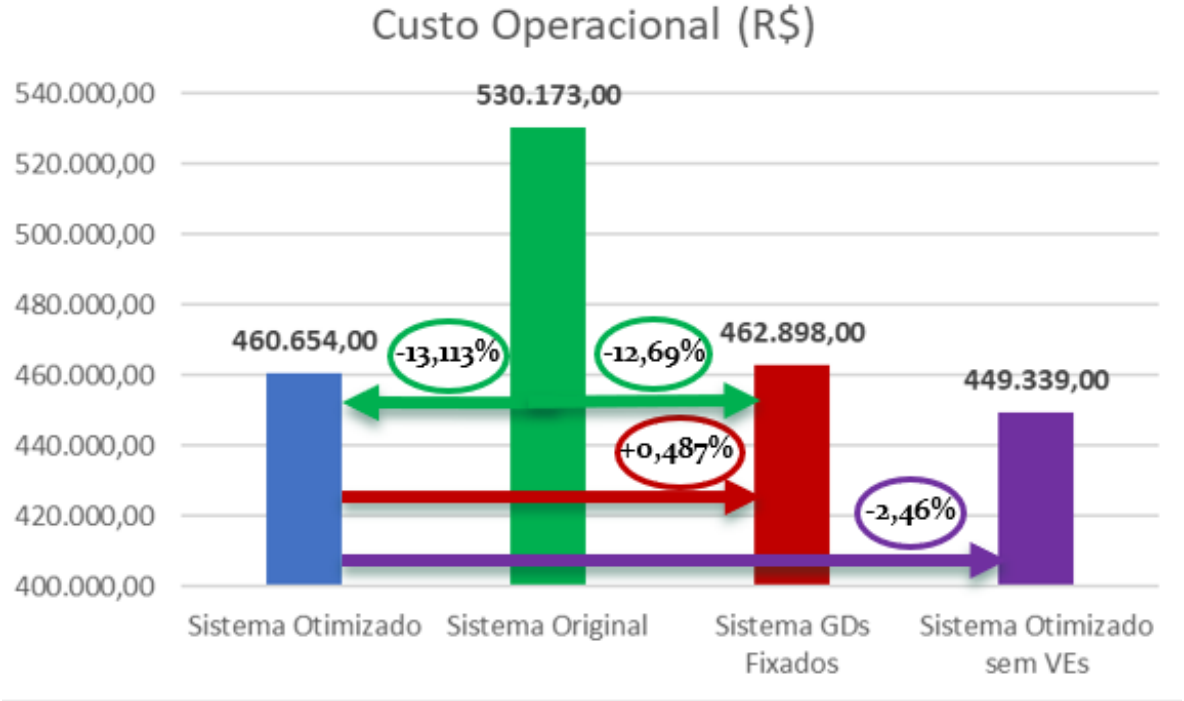
6.2 MÉTODO HÍBRIDO LOBOS CINZENTOS-PONTOS INTERIORES

A mesma análise pode ser feita para o método LC-PI a partir das Tabelas 37 e 40. Assim, o Sistema Otimizado apresentou uma redução de 13,113% (R$ 69.519,00), para t' = 1, e 13,115% (R$ 69.534,00), para t' = 0,55861, nos custos operacionais e de 76,37% (966,024 kWh), para t' = 1, e 76,36% (965,9 kWh), para t' = 0,55861 nas perdas do alimentador em comparação ao Sistema Original.

Por sua vez, o Sistema GDs Fixados reduziu seus custos operacionais e perdas, em relação ao Sistema Original, em 12,69% (R$ 67.275,00), para t' = 1, e 12,692% (R$ 67.293,00), para t' = 0,55861, e em 67,86% (858,314 kWh), para t' = 1, e 67,87% (858,45 kWh), para t' = 0,55861, respectivamente. Quando comparado ao Sistema Otimizado, têm-se custos operacionais 0,487% (R$ 2.244,00), para t' = 1, e 0,486% (R$ 2.241,00), para t' = 0,55861, superiores e perdas 36,04% (107,71 kWh), para t' = 1, e 35,94% (107,46 kWh), para t' = 0,55861, superiores.

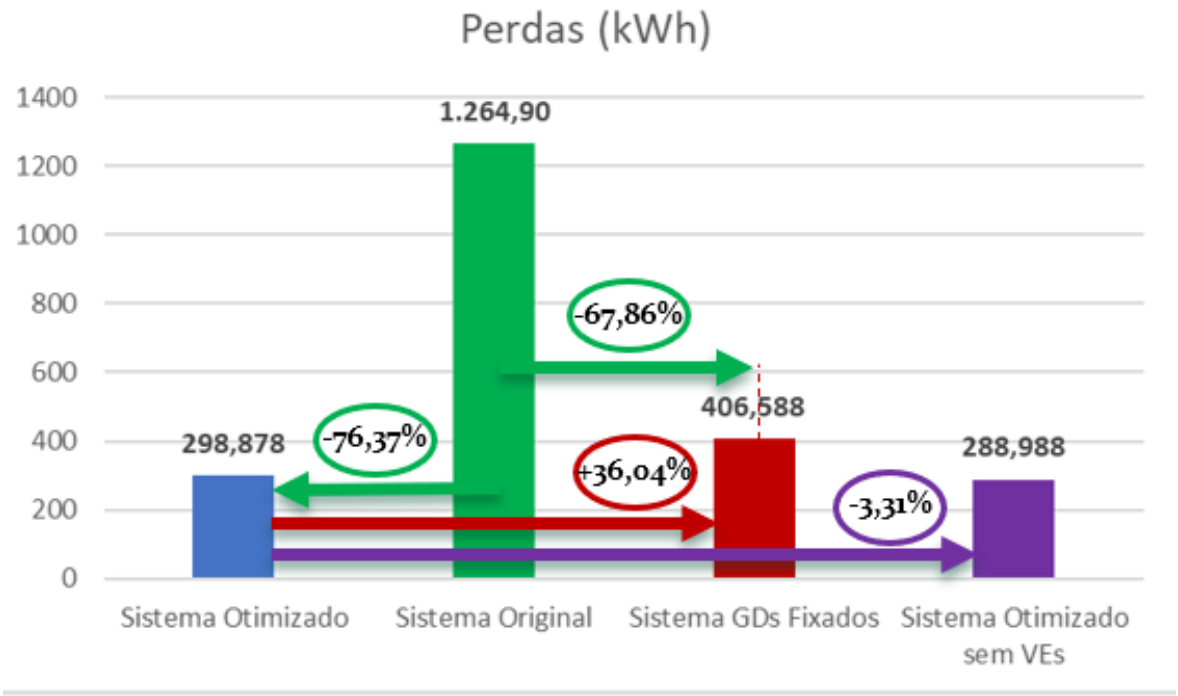
Por último, tem-se o Sistema Otimizado sem VEs que apresentou uma redução de 2,46% (R$ 11.315,00), para t' = 1, e 2,45% (R$ 11.300,00), para t' = 0,55861, nos custos operacionais e de 3,31% (9,89 kWh), para t' = 1, e 3,348% (10,01kWh), para t' = 0,55861, nas perdas. Os comparativos de custo operacional e perdas para os diferentes sistemas são, também, apresentados de maneira respectiva nos Gráficos 20 e 21, para t' = 1, e nos Gráficos 22 e 23, para t' = 0,55861.

Gráfico 20 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)



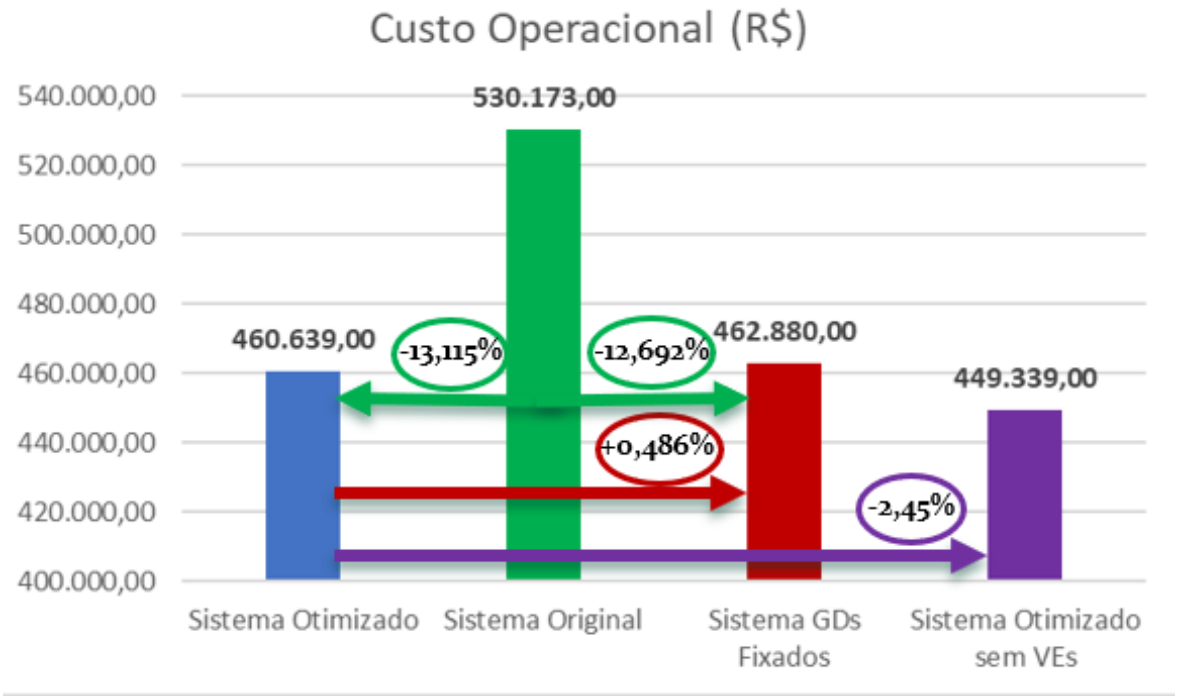
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 21 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=1)



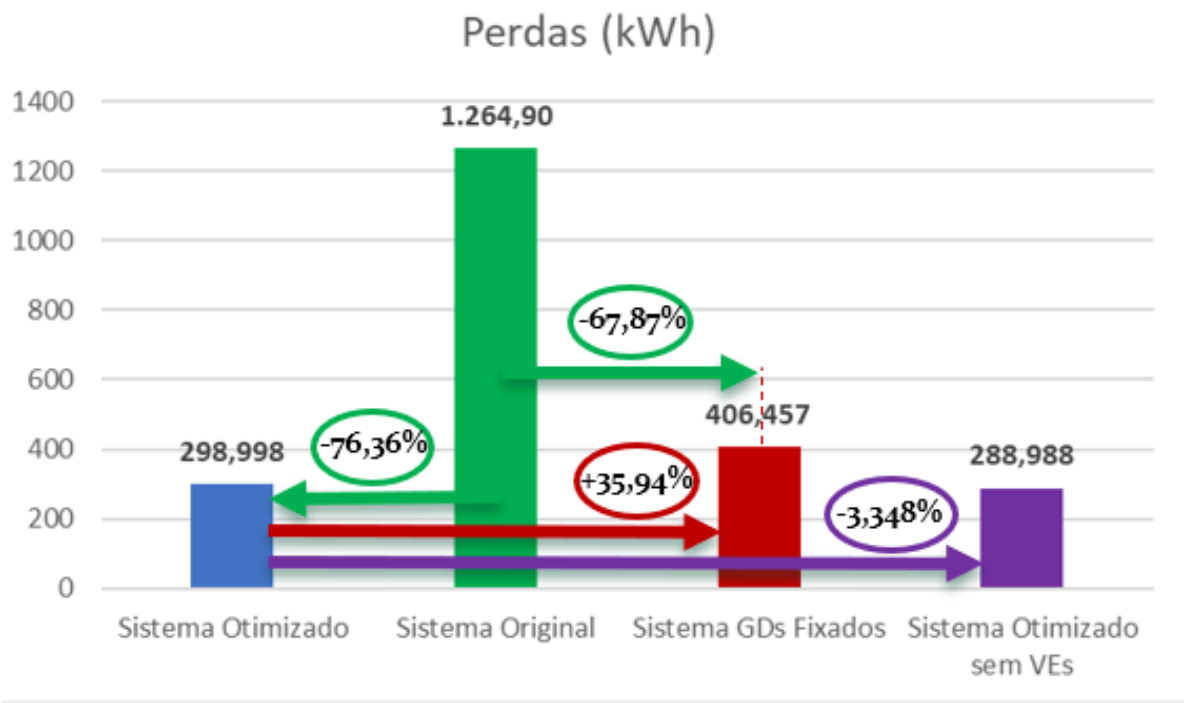
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 22 – Custo Operacional dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 23 – Perdas dos Quatro Sistemas para Solução do Método de Lobos Cinzentos – Pontos Interiores (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Pela análise da Figura 17 e Tabelas de 11 a 12, 30 e 31 se averigua que o método LC-PI, para t' = 1, alocou os GDs (barras 33, 15, 37 e 35) e as ECVEs (barras 11, 33, 27, 5, 26, 6 e 19) nas proximidades das seções com maior concentração de carga do alimentador (barras 2, 9, 15, 26, 33 e 37). O mesmo ocorreu para t' = 0,55861, sendo os GDs alocados nas barras 33, 15, 37 e 35 e as ECVEs nas barras 11, 30, 27, 5, 26, 6, 18, assim como no método anterior. Em relação à alocação das ECVEs no Sistema GDs Fixados, para t' = 1 a alocação se deu nas barras 2, 6, 8, 3, 5, 9 e 4 e para t' = 0,55861 ela ocorreu nas barras 2, 4, 12, 6, 9, 3 e 8, conforme apresentado nas Tabelas 38 e 41, respectivamente. Para ambos os sistemas é perceptível a proximidade das soluções de alocação.

Finalmente, analisando o tempo de operação do algoritmo e o número de iterações para os Sistemas Otimizado e o Sistema GDs Fixados percebe-se que, para t' = 1, o último apresentou um processo 90,33% (49,5 h) mais rápido e com 50% (60) menos iterações que o Sistema Otimizado. Para t' = 0,55861, o Sistema GDs Fixados apresentou um tempo de processamento 78,67% (62,54 h) menor e com 52,5% (63) iterações a menos que o Sistema Otimizado. Quando analisados entre si, o processo

para t' = 0,55861 apresentou um tempo de processamento médio 76% superior ao processo para t' = 1.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS HÍBRIDOS

Nas Tabelas 43 e 44 são apresentados os comparativos da solução de ambos os métodos para o Sistema Otimizado, respectivamente, para t' = 1 e t' = 0,55861.

Tabela 43 – Comparativo do Sistema Otimizado para os Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Otimizado AG-PI	460.679,00	300,359	61,98	117
Sistema Otimizado LC-PI	460.654,00	298,878	54,8	120

Fonte: Produção do próprio autor.

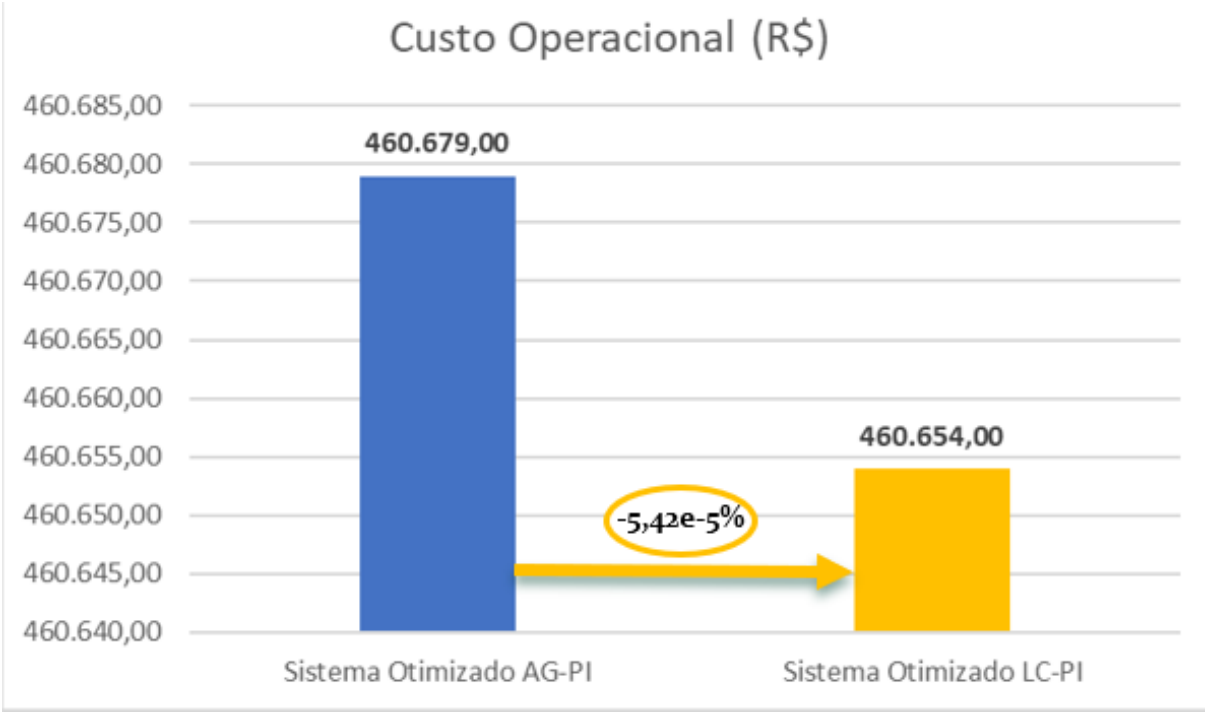
Tabela 44 – Comparativo do Sistema Otimizado para os Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)

Sistemas	Custo (R$)	Perdas (kWh)	Tempo de Processamento (h)	Nº Iterações
Sistema Otimizado AG-PI	460.677,00	303,069	74,26	100
Sistema Otimizado LC-PI	460.639,00	298,998	79,49	120

Fonte: Produção do próprio autor.

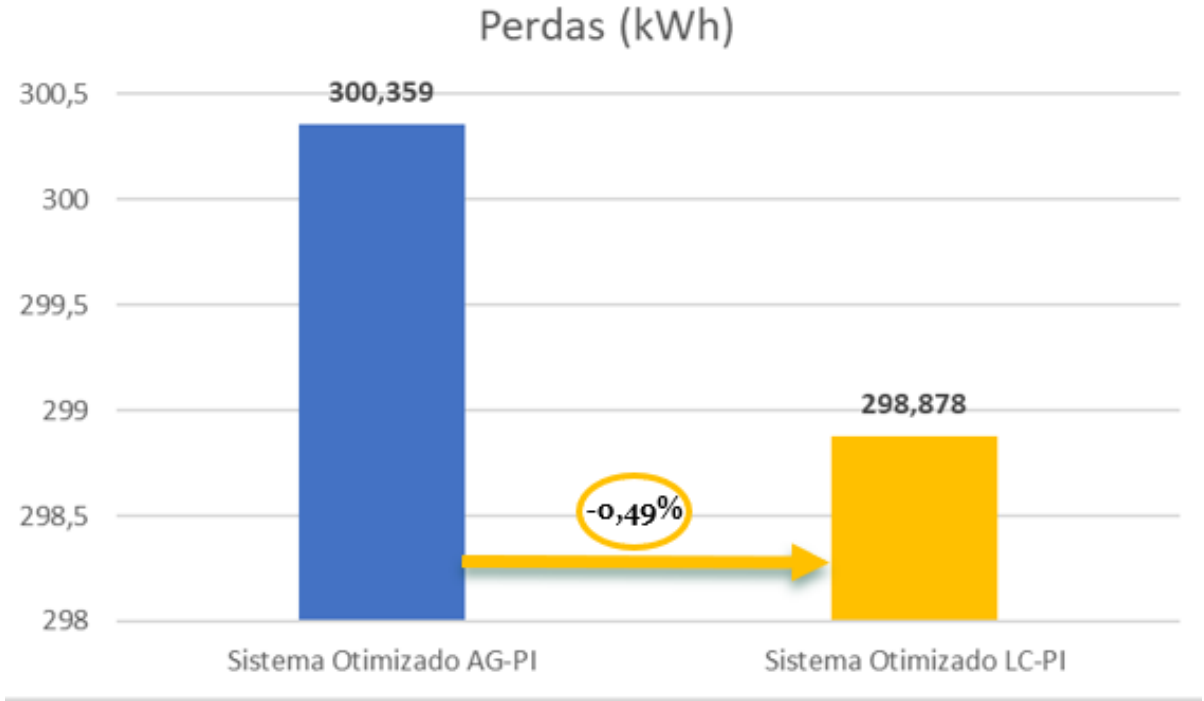
A partir da análise é possível averiguar que, para t' = 1, o resultado do método LC-PI apresentou uma solução com custo operacional 5,42e^{-5}% (R$ 25,00) inferior e perdas 0,49% (1,481 kWh) inferior em relação à do método AG-PI. Além disso, ele também demonstrou possuir um processamento 11,58% (7,18h) mais rápido, mesmo tendo 2,56% (3) mais iterações. A mesma análise pode ser feita para t' = 0,55861, onde o método LC-PI apresentou um custo operacional 8,25e^{-5}% (R$ 38,00) e perdas 1,34% (4,071 kWh) menores em relação ao método AG-PI. Em se tratando do tempo de processamento, o método LC-PI apresentou um tempo 7,04% (5,23 h) superior, com 20% (20) mais iterações que o método AG-PI. Os comparativos de custo operacional e perdas para as soluções de ambos os métodos são, também, apresentados de maneira respectiva nos Gráficos 24 e 25, para t' = 1, e nos Gráficos 26 e 27, para t' = 0,55861.

Gráfico 24 – Custo Operacional para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)



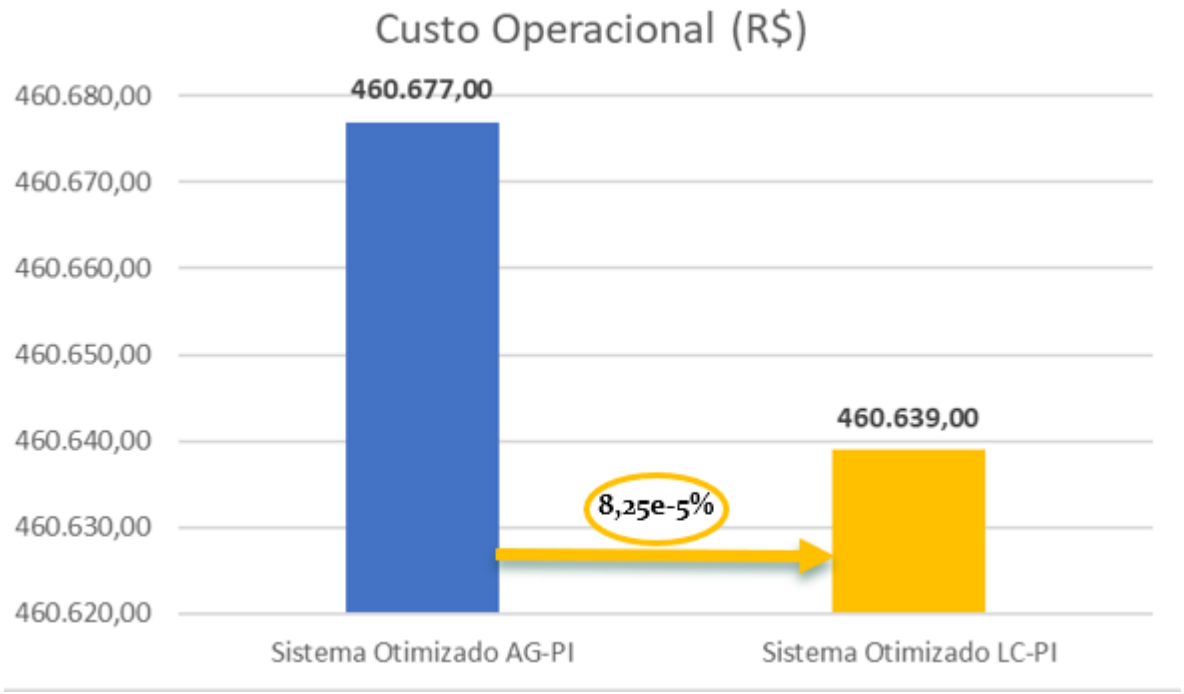
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 25 – Perdas para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=1)



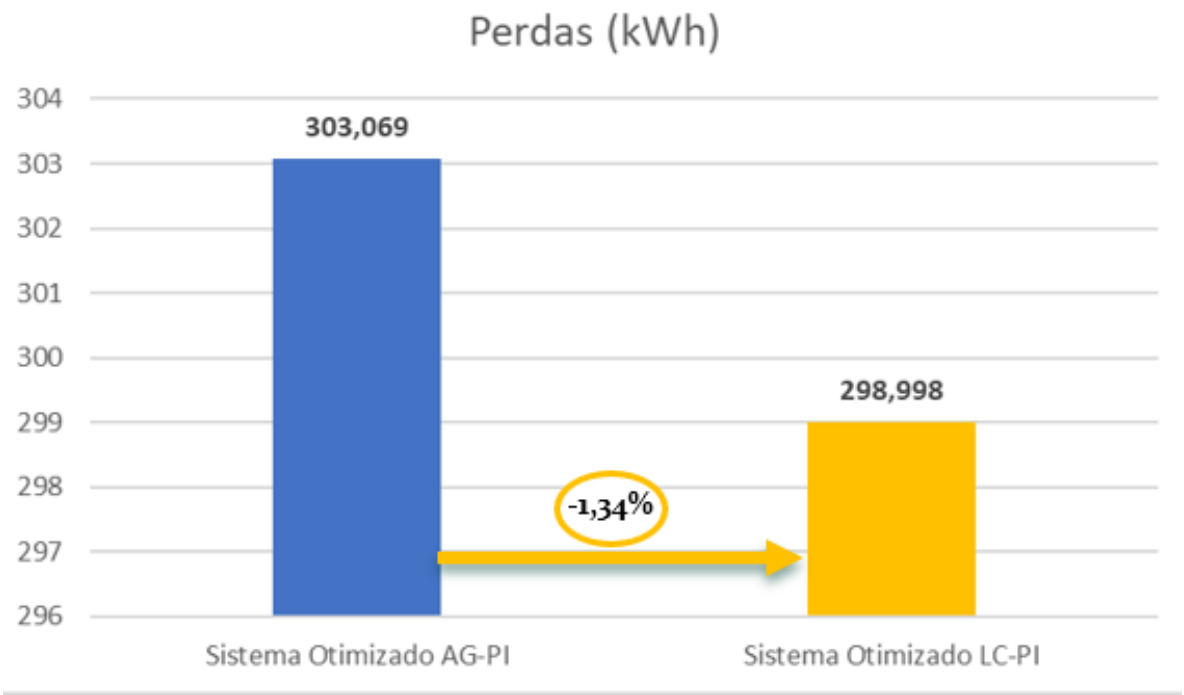
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 26 – Custo Operacional para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 27 – Perdas para as Soluções dos Métodos AG-PI e LC-PI (t'=0,55861)



Fonte: Produção do próprio autor.

7 CONCLUSÃO

Com a crescente preocupação com o quadro climático eleva-se a necessidade de se encontrar alternativas para o sistema de transporte atual, extremamente poluidor. Os VEs surgem como uma excelente alternativa para contornar este problema, destacando-se o seu crescimento exponencial. Assim, pode-se afirmar que a existência de sistemas de distribuição com alta penetração de cargas estocásticas referentes aos VEs será um fato em um futuro próximo.

Contudo, não se pode idealizar um prognóstico onde exista uma enorme quantidade de VEs não emissores de gases poluidores, mas cujo sistema de geração não tenha acompanhado tal mudança, pois, neste caso, se estaria realizando somente uma alteração da fonte poluidora. Dessa forma, uma maior penetração de cargas de VEs na rede deve ser acompanhada por um equivalente aumento de fontes geradoras renováveis de energia que são frequentemente empregadas através da geração distribuída.

A inserção destes recursos na rede, entretanto, causam impactos na mesma, o que torna preponderante a aplicação de técnicas de otimização para poder melhor usufruir de seus inúmeros benefícios. Portanto, o presente trabalho apresentou dois métodos de otimização híbridos (método AG-PI e método LC-PI) para a alocação de ECVEs e GDs em uma rede de distribuição radial, além de realizar o despacho econômico da subestação e GDs com o objetivo de minimizar o custo operacional. Em ambos os métodos, a alocação é realizada por um método metaheurístico (AG ou LC), onde a função *fitness* corresponde ao despacho econômico ótimo do sistema realizado através do método PI.

Os algoritmos mostraram coerência ao realizar a alocação tanto dos GDs, quanto das ECVEs nas cercanias dos centros de carga da rede, aliviando, assim, a demanda da subestação e reduzindo as perdas, no alimentador considerado neste trabalho, em 76,25% (964,543 kWh), para t' = 1, e 76,04% (961,83 kWh), para t' = 0,55861, para o método AG-PI e em 76,37% (966,024 kWh)), para t' = 1, e 76,36% (965,9 kWh), para t' = 0,55861, para o método LC-PI, garantindo, portanto, as suas eficácias na

redução dos custos operacionais em mais de 13,107% (R$ 69.494,00), para t' = 1, e 13,108% (R$ 69.496,00), para t' = 0,55861, para o primeiro e de 13,113% (R$ 69.519,00), para t' = 1, e 13,115% (R$ 69.534,00), para t' = 0,55861, para o último. Ademais, ao ser comparado com uma solução mais simples para este tipo de problema, que consiste em alocar os GDs nos pontos de maior concentração de cargas, o resultado ainda se mostrou superior, apresentando uma melhor redução do custo operacional e perdas.

Um ponto de atenção de ambos os métodos é o tempo de processamento que foi de 61,98 h e 54,8 h, respectivamente para o método AG-PI e LC-PI, com t' = 1, e de 74,26 h e 79,49 h, respectivamente, para os mesmos métodos, com t' = 0,55861. O método LC-PI apresentou uma maior velocidade, 7,18h (11,58%) a menos, em relação ao método AG-PI para t' = 1, já para t' = 0,5586 essa diferença foi 5,23 h (7,04%) maior. Mesmo assim, o método LC-PI apresentou um tempo de processamento médio, para as simulações do Sistema Otimizado, 12,05% menor do que para o método AG-PI, tal vantagem se mostrou presente também nas simulações para o Sistema GDs Fixados, possuindo um tempo 61,26% menor.

Portanto, observa-se um melhor resultado do método LC-PI em relação ao AG-PI, pois, embora ambos tenham apresentado soluções bem semelhantes, o LC-PI demonstrou melhor performance em lidar com o problema quando este ficou mais complexo ao utilizar o t' = 0,5586, além de apresentar um tempo de processamento médio menor. Vale ressaltar que foi averiguado uma melhor resposta do AG-PI para a versão mais complexa do problema ao aumentar o número de indivíduos por geração, mas o tempo de processamento sofreu um aumento demasiado. Além disso, é válido mencionar que a melhor performance do LC-PI pode estar correlacionada a sua característica mais oscilante durante as primeiras iterações do processo de busca, o que pode ter impedido que ele se estabilizasse em um ótimo local, entretanto, é necessário e desejado uma investigação mais detalhada para ter total certeza do motivo.

Dessa forma, destaca-se a contribuição da hibridização de um método metaheurístico com um método clássico para a solução de problemas cujo espaço de busca é não

convexo ou quando o problema é de grande porte e não há capacidade de cômputo suficiente para a aplicação somente do método clássico. Assim, ao aplicar as características metaheurísticas em parte do problema, este método híbrido garante tal convexidade, mas retorna o ótimo global somente em parte da solução. Ademais, também destaca-se a aplicação da solução deste trabalho como base para políticas de incentivo de concessionárias locais em relação à alocação de GDs e ECVEs e ao despacho de potência desses geradores para terceiros que venham a empregá-los em seu sistema de distribuição.

Vale explicitar que, embora a proposta do trabalho seja a aplicação de métodos de otimização para planejamento de sistemas, o que diminui a relevância da variável tempo em comparação aos processos de otimização para operação, é pretendido que, no futuro, seja possível encontrar outras técnicas e conceitos capazes de reduzir o tempo de processamento e melhorar a qualidade da solução. Também, é desejado tratar a alocação dos GDs e das ECVEs como um problema de programação linear ou não linear resolvido de forma conjunta ao despacho econômico, para que, tanto a alocação dos recursos, quanto o despacho econômico, passem a ser soluções ótimas.

Por fim, deseja-se trazer melhorias futuras para a metodologia, como: o emprego de outras tecnologias de geração, por exemplo as baseadas em inversores; aplicar a otimização em um sistema trifásico desbalanceado e comparar com o resultado atual; realizar a otimização com o objetivo de definir a melhor localização geográfica das ECVEs em relação aos grandes centros; considerar a potência reativa dos VEs; tratar a otimização não só com o custo operacional, mas também com o custo de investimento da ECVE e do GD; levar em consideração os artifícios de correção de fator de potência da subestação para não restringir sua capacidade de fornecimento; aplicar uma variável agregada dos VEs ao invés de uma individual de cada veículo para simplificar o problema; levar em consideração o fator de autodescarregamento da bateria; atualizar os valores de custo operacionais para que estejam mais próximo da realidade; considerar a inserção de ECVEs integradas com geração distribuídas; realizar a análise do perfil de tensão do alimentador e de sua estabilidade estática de tensão; e, para concluir, empregar melhorias no método AG-PI para melhorar sua performance.

REFERÊNCIAS

ACCENTURE. Carros elétricos. **Cadernos FGV Energia**, ano 4, n. 7, maio 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/publicacao/caderno-de-carros-eletricos>. Acesso em: 15 ago. 2021.

AHMADIAN, Ali *et al*. Two-layer optimization methodology for wind distributed generation planning considering plug-in electric vehicles uncertainty: A flexible active-reactive power approach. **ELSEVIER Energy Conversion and Management**, v. 124, p. 231–246, 2016.

ALI, E. S.; ABD-ELAZIM, S. M.; ABDELAZIZ, A. Y. Optimal allocation and sizing of renewable distributed generation using ant lion optimization algorithm. **SPRINGER Electrical Engineering**, v. 100, p. 99–109, 2018.

AL-SABOUNCHI, Ammar M. Munir. **Optimal Sizing and Location of Photovoltaic Generators on Three Phase Radial Distribution Feeder**. 2011. Tese – Faculty of Technology, De Montfort University, Leicester (UK), 2011. Disponível em: <https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/5225/PhD_Thesis_Ammar%20AL-Sabounchi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 nov. 2018.

AMPL. A Modeling Language. **AMPL Optimization Inc**, 2021. Disponível em: < https://ampl.com>. Acesso em: 16 set. 2021.

ANEEL (Brasil). **Micro e Minigeração Distribuída**: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 01 ago. 2021.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):** Módulo 1 - Introdução. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-1>. Acesso em: 01 ago. 2021.

CAILIAN, Gu *et al*. Research on improvement method of distributed generation optimization configuration. **27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)**, p. 5039–5043, 2015.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; FERREIRA, Tiago Toledo. **Veículos elétricos**: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 32, p. 267-310, 2010. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1312>. Acesso em: 14 ago. 2021.

CEI. Lithium-ion battery. **University of Washington**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>. Acesso em: 04 set. 2021.

CESPEDES, Renato G. New method for the analysis of distribution networks, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 391–396, 1990.

CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

DENTON, Tom. **Veículos elétricos e híbridos**. Tradução de Jorge Augusto Pessatto Mondaadori. São Paulo: Blucher, 2018.

EPA. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. **Environmental Protection Agency**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>. Acesso em: 04 set. 2021.

EPE. Distributed Energy Resources: Impacts on Energy Planning Studies. **Ministério de Minas e Energia**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-en/sala-de-imprensa/noticias/Documents/Discussion%20Paper%20-%20Distributed%20Energy%20Resources.pdf>. Acesso em: 01 set. 2021.

FARIDIMEHR, S.; VENKATACHALAM, S.; CHINNAM, R. B. A Stochastic Programming Approach for Electric Vehicle Charging Network Design. **IEEE**, v. 20, n. 5, 2017.

HAIDAR, A. M. A.; MUTTAQI, K. M.; SUTANTO, D. Technical challenges for electric power industries due to grid-integrated electric vehicles in low voltage distributions: A review. **ELSEVIER Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 689–700, 2014.

HOLLAND, John H. Genetic algorithms. **Scholarpedia**, 2012. Disponível em: <http://www.scholarpedia.org/article/Genetic_algorithms>. Acesso em: 08 set. 2021.

IEA. Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?. **International Energy Agency**, Paris, 2020. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

JACOBI, Pedro Roberto; SULAIMAN, Samia Nascimento. Sustentabilidade, aprendizagem social e governança socioambiental. In: OLIVEIRA, M. M. D. *et al.* (orgs.). **Cidadania, meio ambiente e sustentabilidade**. Caxias do Sul: Educs, 2017, p. 302-324. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/ebook-cidadani-meioamb_3.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2021.

JAMIAN, J. J.; MUSTAFA, M. W.; MOKHLIS, H. Optimal multiple distributed generation output through rank evolutionary particle swarm optimization. **ELSEVIER Neurocomputing**, v. 152, p. 190–198, 2015.

LESAJA, Goran Goran. Introducing interior-point methods for introductory operations research courses and/or linear programming courses. **The Open Operational Research Journal**, v. 3, p. 1–12, 2009.

LOCH, Éder; HENKES, Jairo Afonso. Alternativas para reduzir a poluição gerada por automóveis a partir do uso de energias renováveis. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 565-583, 2014. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/2218>. Acesso em: 15 ago. 2021.

MATLAB. The language of technical computing. **The MathWorks, Inc**, 2021. Disponível em: < https://www.mathworks.com>. Acesso em: 16 set. 2021.

MEIRELES, Tais. Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas. Texto disponibilizado em 12 dez. 2020. In: **WWF Brasil**. Disponível em: < https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MENEZES, Roberto Felipe Andrade; SORIANO, Guilherme Delgado; AQUINO, Ronaldo Ribeiro Barbosa de. Locational Marginal Pricing and Daily Operation Scheduling of a Hydro-Thermal-Wind-Photovoltaic Power System Using BESS to Reduce Wind Power Curtailment. **Energies**, v. 14, n. 5, p. 1441, 2021.

MILLER, Scott L.; CHILDERS, Donald. Probability and random processes with applications to signal processing and communications. 2. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2012.

MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A. Grey Wolf Optimizer. **Advances in Engineering Software**, v. 69, p. 46-61, 2014.

MOHAMMADI, Sirus; SOLEYMANI, Soodabeh; MOZAFARI, Babak. Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices. **Energy Systems**, v. 54, p. 525-535, 2014.

OLIVELLA-ROSELL, Pol *et al*. Probabilistic Agent-Based Model of Electric Vehicle Charging Demand to Analyse the Impact on Distribution Networks. **Electrical Power and Energy Systems for Transportation Applications**, v. 8, n. 5, p. 4160-4187, 2015.

PEREIRA, Guillermo Ivan; SILVA, Patrícia Pereira da. The smart grid and distributed generation nexus. In: CASTRO, Nivalde de; DANTAS, Guilherme Dantas. **Distributed generation:** international experiences and comparative analyses. Rio de Janeiro: Publit, 2017, p. 13-36.

POTRA, Florian A.; WRIGHT, Stephen J. Interior-point methods. **Journal of Computational and Applied Mathematics**. v. 124, p. 281-302, 2000.

POUDINEH, Rahmatallah. JAMASB, Tooraj. Distributed generation, storage, demand response and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement. **ELSEVIER Energy Policy**, v. 67, p. 222–231, 2014.

PUC-SP. **Guia GPS**: Gestão Pública Sustentável. 2016. São Paulo. Disponível em: <https://www.cidadessustentaveis.org.br/arquivos/Publicacoes/GPS_Guia_Gestao_Publica_Sustentavel.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2021.

QIAN, Kejun *et al*. Load model for prediction of electric vehicle charging demand. **International Conference on Power System Technology,** p. 1-6, 2010.

RABIEE, Abdorreza, *et al*. Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and pv units uncertainties. **ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 721–739, 2016.

RITCHIE, Hannah. Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?. Texto disponibilizado em 06 out. 2020. In: **Our World in Data**. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>. Acesso em: 15 ago. 2021.

RUEDA-MEDINA, Augusto Cesar *et al*. A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems. **ELSEVIER Electric Power Systems Research**, v. 97, p. 133–143, 2013.

SANCHO CAPARRINI, Fernando. **Algoritmos Genéticos**. 2018. Disponível em: < http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=65>. Acesso em: 08 set. 2021.

SANTOS, Max Mauro Dias. **Veículos elétricos e híbridos**: fundamentos, características e aplicações. São Paulo: Érica, 2020.

SHABBAR, Rawan; KASASBEH, Anemone; AHMED, Mohamed M. Charging station allocation for electric vehicle network using stochastic modeling and grey wolf optimization. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3314, 2021.

SONG, Xianhai et al. Grey Wolf Optimizer for parameter estimation in surface waves, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 75, p. 147-157, 2015.

SULTANA, U. *et al*. Grey wolf optimizer based placement and sizing of multiple distributed generation in the distribution system. **Energy, Elsevier**, v. 111, p. 525-536, 2016.

THEOTONIO, Sérgio Barcelos. **Veículos elétricos e híbridos**: panorama patentário no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, Diretoria de Patentes – DIRPA, Coordenação Geral de Estudos, Projetos e Disseminação da Informação Tecnológica – CEPIT, Coordenação de Pesquisa em Inovação e Propriedade Intelectual – COPIP, Divisão de Estudos e Projetos - DIESP, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/arquivos-dirpa/VeculosEletricoseHbridos_FINAL_Jan2019.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

UFRJ (2014). Relatório técnico de mobilidade elétrica. 2014. Disponível: <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/estudos/reltec4.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON. **Estimating generator capability curves**. 2015. Disponível em: <https://neos-guide.org/sites/default/files/capability_curves.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2021.

VAZ, Luiz Felipe Hupsel; BARROS, Daniel Chiari; CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de. **Veículos híbridos e elétricos**: sugestões de políticas públicas para o segmento. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 41, p. 295-344, 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4284>. Acesso em: 14 ago. 2021.

WANG, Yongli *et al*. Energy management of smart micro-grid with response loads and distributed generation considering demand response. **ELSEVIER Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1069–1083, 2018.

WORLD ENERGY COUNCIL. Issues monitor 2020: decoding new signals of change. **World Energy Council**, 2020. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/issues-monitor-2020-signals-change>. Acesso em: 02 set. 2021.

ZALDIVAR, Daniel *et al*. Learning classical and metaheuristic optimization techniques by using an educational platform based on LEGO robots. **International Journal of Electrical Engineering Education**, 2019. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/330538630_Learning_classical_and_metaheuristic_optimization_techniques_by_using_an_educational_platform_based_on_LEGO_robots>. Acesso em: 01 set. 2021.

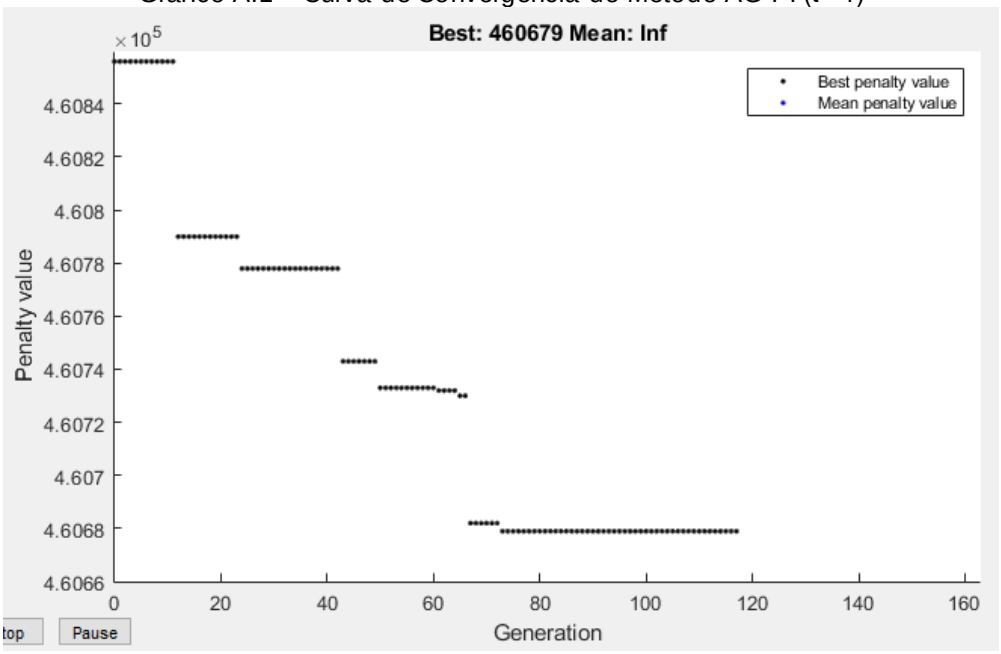
ZHANG, Jian *et al*. Primal dual interior point dynamic programming for coordinated charging of electric vehicles. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 5, n. 6, p. 1004-1015, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – CURVAS DE CONVERGÊNCIA

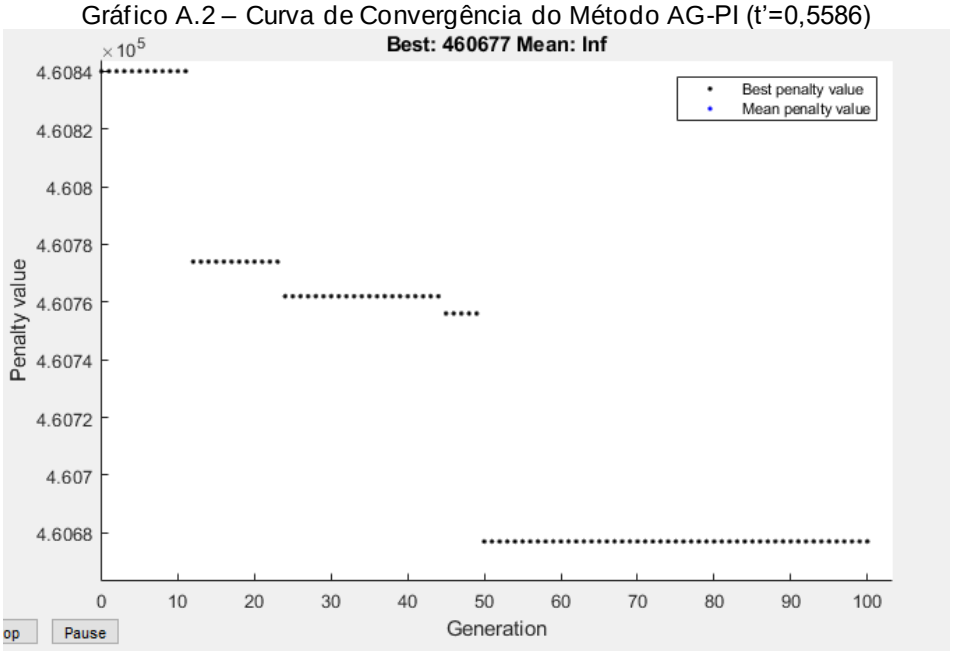
Nos Gráficos A.1, A.2, A.3 e A.4 estão explicitados, respectivamente, as curvas de convergência para o método AG-PI (t' = 1), para o método AG-PI (t' = 0,5586), para o método LC-PI (t' = 1) e para o método LC-PI (t' = 0,5586).

Gráfico A.1 – Curva de Convergência do Método AG-PI (t'=1)



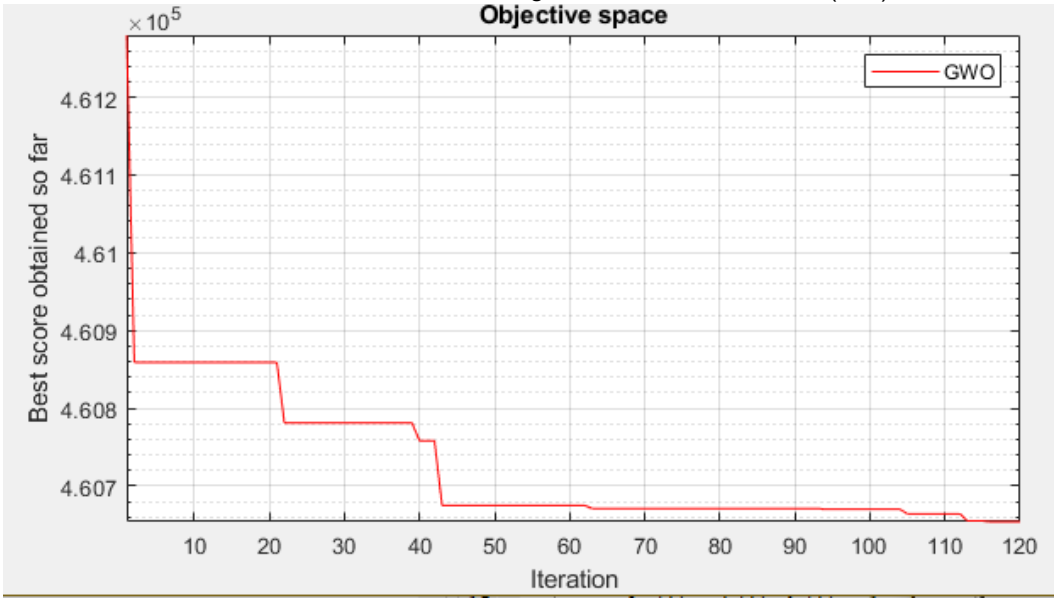
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico A.2 – Curva de Convergência do Método AG-PI (t'=0,5586)



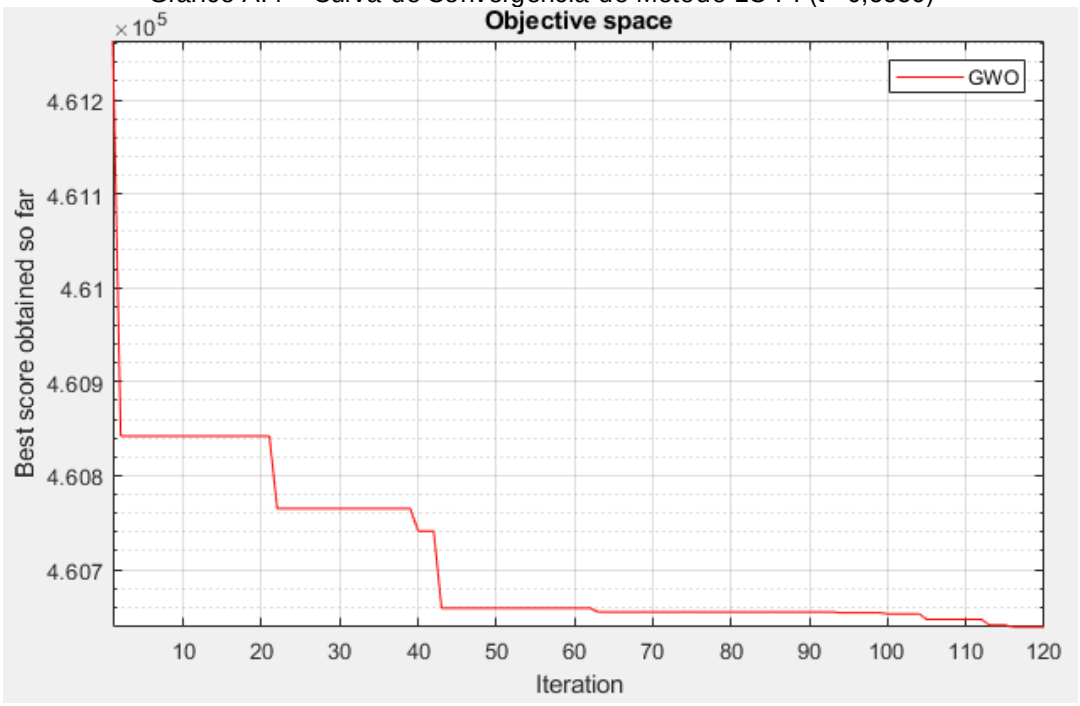
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico A.3 – Curva de Convergência do Método LC-PI (t'=1)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico A.4 – Curva de Convergência do Método LC-PI (t'=0,5586)



Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DO ALIMENTADOR

Na Tabela A.1 é explicitada a demanda horária em kW de cada uma das sete ECVEs.

Tabela A.1 – Demanda (kW) Horária das Estações de Carregamento de VEs

t	Pe1	Pe2	Pe3	Pe4	Pe5	Pe6	Pe7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	0	0
5	4	0	0	0	4	0	0
6	4	0	4	0	4	0	0
7	4	4	4	0	4	4	0
8	6,747	4	4	0	1,2	4	0
9	4,253	8	7,773	8	8	16	8
10	12	16	8,227	8	12	13,2	8
11	17,4	16,4	4	8	11	16	8
12	16	20	4	4,8	11	19,531	8
13	7,6	18,83	2,8	2,581	8	13,479	3,515
14	0	12,964	0	0,019	6,4	12,39	0,485
15	0	2,806	0	4	8	11,002	0
16	0	0	0	4	9,8	7,345	0
17	4	0	0	4	8	8,253	0
18	4	0	10,4	2,8	8	6	8
19	16	0	10,4	0	2,8	8	20
20	14,2	0	8	4	0	8	18,4
21	10,2	0	8	8	0	6,4	14,8
22	5,4	0	4,63	5,4	0	2,8	6,4
23	1,6	0	0,37	4	4	0	3,088
24	0	0	0	4	4	0	0,712

Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE 3 – VARIÁVEIS PARA A SOLUÇÃO DO MÉTODO AG-PI

Nas Tabelas de A.2 a A.3 são apresentados os valores horários dos módulos de tensão em kV para cada barra para a solução do Método AG-PI para $t' = 1$.

Tabela A.2 – Níveis de Tensão (kV) Horário de cada Barra para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
2	13,654	13,691	13,692	13,673	13,664	13,656	13,664	13,666	13,675	13,665	13,674	13,713
3	13,569	13,629	13,63	13,6	13,584	13,571	13,584	13,587	13,603	13,585	13,601	13,664
4	13,544	13,607	13,609	13,577	13,561	13,547	13,561	13,563	13,579	13,561	13,577	13,644
5	13,502	13,584	13,585	13,544	13,523	13,504	13,523	13,525	13,551	13,526	13,55	13,632
6	13,551	13,615	13,618	13,585	13,568	13,554	13,568	13,571	13,585	13,568	13,583	13,653
7	13,534	13,599	13,601	13,568	13,551	13,538	13,551	13,554	13,569	13,55	13,566	13,635
8	13,537	13,601	13,603	13,571	13,554	13,54	13,554	13,557	13,573	13,554	13,57	13,639
9	13,483	13,567	13,568	13,526	13,505	13,485	13,504	13,507	13,533	13,508	13,532	13,618
10	13,464	13,566	13,562	13,514	13,488	13,463	13,486	13,489	13,527	13,491	13,525	13,619
11	13,528	13,598	13,603	13,566	13,547	13,533	13,548	13,551	13,564	13,547	13,562	13,641
12	13,478	13,563	13,564	13,522	13,501	13,481	13,5	13,503	13,529	13,504	13,529	13,615
13	13,452	13,56	13,555	13,505	13,477	13,451	13,475	13,478	13,519	13,481	13,517	13,616
14	13,524	13,595	13,6	13,563	13,544	13,53	13,545	13,548	13,561	13,544	13,559	13,639
15	13,512	13,588	13,595	13,554	13,534	13,519	13,535	13,538	13,548	13,532	13,546	13,636
16	13,477	13,562	13,563	13,521	13,499	13,48	13,499	13,502	13,528	13,503	13,527	13,614
17	13,475	13,561	13,562	13,519	13,497	13,478	13,497	13,5	13,526	13,501	13,526	13,613
18	13,447	13,556	13,551	13,5	13,472	13,446	13,47	13,473	13,515	13,476	13,513	13,613
19	13,442	13,559	13,552	13,498	13,468	13,439	13,465	13,468	13,516	13,472	13,513	13,617
20	13,442	13,551	13,546	13,495	13,467	13,441	13,465	13,468	13,51	13,471	13,508	13,609
21	13,505	13,578	13,584	13,545	13,526	13,511	13,527	13,53	13,543	13,526	13,542	13,625
22	13,496	13,574	13,582	13,54	13,519	13,504	13,52	13,523	13,532	13,516	13,53	13,623
23	13,488	13,567	13,575	13,532	13,511	13,496	13,513	13,516	13,524	13,508	13,522	13,617
24	13,44	13,558	13,55	13,496	13,467	13,437	13,464	13,467	13,514	13,471	13,512	13,616
25	13,433	13,559	13,549	13,492	13,46	13,428	13,457	13,459	13,514	13,465	13,51	13,619
26	13,483	13,563	13,572	13,528	13,507	13,491	13,508	13,512	13,521	13,505	13,519	13,614
27	13,485	13,565	13,573	13,53	13,509	13,493	13,511	13,514	13,522	13,505	13,52	13,616
28	13,484	13,564	13,572	13,529	13,508	13,492	13,509	13,513	13,518	13,502	13,516	13,613
29	13,42	13,562	13,547	13,484	13,449	13,412	13,444	13,447	13,513	13,455	13,508	13,625
30	13,424	13,57	13,557	13,491	13,455	13,419	13,452	13,456	13,519	13,465	13,516	13,644
31	13,413	13,568	13,547	13,48	13,442	13,4	13,435	13,437	13,516	13,446	13,51	13,627
32	13,417	13,564	13,551	13,485	13,448	13,413	13,446	13,45	13,513	13,459	13,51	13,639
33	13,411	13,559	13,546	13,479	13,442	13,407	13,44	13,444	13,508	13,453	13,504	13,634
34	13,413	13,575	13,55	13,481	13,441	13,396	13,433	13,434	13,521	13,444	13,514	13,631
35	13,412	13,582	13,553	13,482	13,441	13,392	13,43	13,431	13,527	13,443	13,518	13,635
36	13,406	13,577	13,548	13,477	13,435	13,386	13,425	13,426	13,521	13,437	13,513	13,631
37	13,403	13,579	13,546	13,474	13,431	13,379	13,419	13,419	13,523	13,432	13,513	13,628

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.3 – Níveis de Tensão (kV) Horário de cada Barra para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
2	13,796	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,779	13,681	13,648	13,653	13,653	13,658
3	13,8	13,805	13,805	13,805	13,805	13,806	13,774	13,611	13,558	13,566	13,565	13,575
4	13,789	13,797	13,798	13,799	13,799	13,799	13,762	13,59	13,534	13,542	13,541	13,55
5	13,814	13,816	13,81	13,804	13,815	13,818	13,779	13,561	13,489	13,499	13,498	13,512
6	13,802	13,81	13,811	13,812	13,81	13,809	13,773	13,596	13,539	13,548	13,547	13,555
7	13,783	13,793	13,796	13,796	13,796	13,796	13,758	13,581	13,524	13,532	13,531	13,54
8	13,786	13,795	13,797	13,797	13,797	13,797	13,759	13,584	13,526	13,534	13,534	13,543
9	13,807	13,81	13,806	13,799	13,81	13,813	13,769	13,544	13,469	13,479	13,478	13,492
10	13,838	13,83	13,82	13,81	13,829	13,835	13,797	13,534	13,446	13,458	13,457	13,479
11	13,806	13,818	13,82	13,825	13,817	13,816	13,773	13,578	13,514	13,524	13,524	13,531
12	13,806	13,809	13,805	13,798	13,809	13,811	13,767	13,54	13,465	13,475	13,474	13,488
13	13,846	13,835	13,824	13,812	13,834	13,841	13,803	13,526	13,434	13,446	13,444	13,469
14	13,805	13,817	13,819	13,824	13,816	13,815	13,772	13,575	13,511	13,521	13,521	13,528
15	13,819	13,835	13,84	13,849	13,834	13,832	13,783	13,565	13,495	13,508	13,509	13,514
16	13,805	13,809	13,804	13,798	13,809	13,811	13,767	13,538	13,463	13,473	13,472	13,486
17	13,804	13,809	13,804	13,797	13,808	13,81	13,766	13,537	13,462	13,472	13,471	13,484
18	13,844	13,834	13,823	13,811	13,832	13,839	13,801	13,521	13,428	13,441	13,439	13,464
19	13,862	13,845	13,832	13,818	13,844	13,853	13,817	13,521	13,421	13,434	13,433	13,462
20	13,842	13,832	13,821	13,81	13,831	13,838	13,798	13,517	13,423	13,435	13,434	13,459
21	13,798	13,812	13,815	13,819	13,811	13,809	13,762	13,558	13,491	13,502	13,502	13,509
22	13,812	13,83	13,835	13,844	13,829	13,827	13,774	13,551	13,479	13,492	13,493	13,498
23	13,81	13,829	13,833	13,842	13,826	13,824	13,771	13,543	13,469	13,483	13,484	13,489
24	13,861	13,845	13,831	13,818	13,843	13,852	13,817	13,519	13,42	13,433	13,431	13,46
25	13,879	13,856	13,84	13,824	13,854	13,865	13,833	13,517	13,411	13,424	13,423	13,456
26	13,808	13,827	13,832	13,841	13,825	13,823	13,768	13,54	13,466	13,48	13,481	13,485
27	13,809	13,828	13,832	13,841	13,826	13,823	13,77	13,541	13,466	13,48	13,481	13,486
28	13,808	13,828	13,831	13,84	13,824	13,822	13,769	13,539	13,463	13,477	13,479	13,483
29	13,909	13,875	13,855	13,835	13,873	13,889	13,863	13,514	13,396	13,41	13,408	13,449
30	13,94	13,88	13,853	13,83	13,877	13,903	13,886	13,523	13,4	13,414	13,412	13,452
31	13,927	13,894	13,874	13,852	13,892	13,905	13,884	13,513	13,387	13,401	13,398	13,448
32	13,937	13,878	13,851	13,829	13,875	13,901	13,883	13,517	13,393	13,408	13,405	13,445
33	13,935	13,876	13,85	13,827	13,873	13,899	13,88	13,511	13,387	13,401	13,399	13,439
34	13,94	13,907	13,886	13,864	13,905	13,917	13,899	13,517	13,385	13,399	13,396	13,452
35	13,952	13,92	13,899	13,876	13,918	13,928	13,915	13,52	13,383	13,397	13,394	13,455
36	13,95	13,919	13,898	13,874	13,917	13,927	13,912	13,514	13,377	13,391	13,388	13,449
37	13,952	13,922	13,9	13,876	13,92	13,93	13,918	13,513	13,372	13,386	13,382	13,45

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.4 a A.5 são explicitados os módulos das correntes em A que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método AG-PI para t' = 1.

Tabela A.4 – Corrente (A) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	90,549	67,898	67,332	78,688	84,585	89,416	84,447	83,504	77,636	83,886	78,121	54,041
2	3	73,632	53,083	53,032	63,168	68,521	73,086	68,641	67,872	62,152	68,511	62,894	41,989
3	4	13,232	11,564	11,16	12,126	12,557	12,772	12,615	12,478	12,617	13,067	12,971	10,704
3	5	41,629	26,956	29,305	35,407	39,014	42,781	39,346	39,094	31,304	37,417	31,545	20,078
3	6	18,805	15,177	12,77	15,731	17,109	17,691	16,802	16,421	18,633	18,035	18,422	11,215
4	7	6,725	5,877	5,672	6,163	6,382	6,491	6,54	6,471	6,671	7,167	7,131	6,102
4	8	6,507	5,686	5,488	5,963	6,175	6,281	6,076	6,009	5,949	5,911	5,851	4,621
5	9	17,53	15,296	14,764	16,053	16,63	16,921	16,364	16,182	16,009	15,915	15,744	12,417
5	10	24,122	11,766	14,709	19,447	22,502	25,965	23,078	23,005	15,346	21,53	15,802	7,663
6	11	16,533	13,254	10,87	13,652	14,71	15,254	14,435	14,254	16,018	15,182	15,631	8,869
9	12	5,715	4,986	4,813	5,233	5,421	5,516	5,334	5,275	5,219	5,188	5,132	4,047
10	13	21,836	9,824	12,821	17,368	20,351	23,772	20,956	20,906	13,284	19,456	13,749	6,044
11	14	8,977	7,84	7,565	8,223	8,517	8,663	8,38	8,286	8,206	8,152	8,07	6,366
11	15	7,637	6,399	3,392	5,431	6,22	6,615	6,073	5,98	8,302	7,033	7,655	2,536
12	16	1,143	0,997	0,962	1,047	1,084	1,103	1,067	1,055	1,044	1,038	1,026	0,809
12	17	3,429	2,992	2,888	3,14	3,253	3,31	3,201	3,165	3,131	3,113	3,079	2,429
13	18	3,284	2,86	2,762	3,005	3,114	3,17	3,065	3,031	2,995	2,98	2,945	2,321
13	19	12,133	2,027	5,439	8,764	11,431	14,597	12,101	12,143	4,421	10,671	4,96	1,028
13	20	6,553	5,707	5,511	5,997	6,215	6,327	6,116	6,048	5,977	5,947	5,878	4,631
14	21	7,959	6,951	6,707	7,29	7,551	7,681	7,429	7,347	7,275	7,228	7,155	5,644
15	22	9,763	8,522	8,221	8,939	9,26	9,42	9,364	9,263	9,951	9,712	9,805	8,174
15	23	5,515	4,814	4,644	5,05	5,231	5,322	5,147	5,09	5,578	5,546	5,495	4,227
19	24	1,146	0,997	0,963	1,048	1,087	1,107	1,07	1,058	1,045	1,04	1,028	0,809
19	25	11,004	1,754	4,732	7,795	10,414	13,537	11,083	11,134	3,107	9,078	3,388	2,244
22	26	9,763	8,522	8,221	8,939	9,26	9,42	9,111	9,01	8,925	8,866	8,777	6,918
23	27	4,373	3,817	3,682	4,004	4,148	4,219	4,081	4,036	3,998	3,972	3,932	3,099
23	28	1,142	0,997	0,962	1,046	1,083	1,102	1,066	1,054	1,596	1,59	1,579	1,136
25	29	8,747	2,674	3,645	5,911	8,409	11,423	9,062	9,131	1,807	7,034	1,335	3,854
29	30	6,64	7,446	7,725	7,156	6,941	5,017	5,43	5,087	7,156	4,918	7,28	7,712
29	31	5,566	8,482	2,407	3,56	4,545	7,358	5,634	6,145	7,826	4,98	5,76	1,346
30	32	1,148	0,997	0,963	1,049	1,088	1,109	1,071	1,059	1,045	1,041	1,028	0,808
30	33	13,935	12,102	11,693	12,737	13,21	13,457	13	12,855	12,682	12,635	12,474	9,806
31	34	3,881	10,403	3,877	2,958	2,062	3,688	2,061	2,684	9,4	1,508	7,201	3,883
34	35	3,881	10,403	3,877	2,958	2,062	3,688	2,061	2,684	9,4	1,508	7,201	3,883
35	36	6,57	5,697	5,511	6,005	6,23	6,353	6,135	6,067	5,972	5,962	5,876	4,623
35	37	10,162	2,656	8,894	9,924	11,547	15,331	13,794	14,732	3,398	13,198	5,416	10,835

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.5 – Corrente (A) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	2,593	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	12,768	74,21	94,331	91,469	91,732	88,435
2	3	3,67	4,543	4,236	4,117	4,577	5,002	4,659	59,385	77,406	74,756	74,95	71,419
3	4	6,091	4,37	3,465	3,193	3,549	3,879	6,297	11,578	13,243	13,073	13,128	13,307
3	5	8,303	8,39	5,457	0,497	8,462	9,269	2,779	32,297	44,19	42,93	43,196	38,075
3	6	3,293	9,324	8,037	7,8	8,948	8,725	1,108	15,587	20,072	18,891	18,782	20,715
4	7	3,725	2,653	1,85	1,623	1,804	1,971	3,2	5,885	6,731	6,644	6,672	6,763
4	8	2,39	1,733	1,616	1,57	1,745	1,908	3,097	5,694	6,512	6,429	6,456	6,544
5	9	6,401	4,643	4,332	4,212	4,678	5,112	8,303	15,323	17,548	17,321	17,394	17,625
5	10	14,559	11,289	7,9	3,723	11,221	12,74	11,058	17,061	26,726	25,712	25,913	20,516
6	11	4,375	10,098	9,053	8,98	9,809	9,561	0,205	13,601	17,801	16,652	16,282	18,198
9	12	2,086	1,513	1,412	1,373	1,525	1,666	2,706	4,995	5,72	5,646	5,67	5,745
10	13	15,378	11,737	8,321	4,271	11,658	13,257	12,136	15,078	24,447	23,466	23,659	18,245
11	14	3,286	2,382	2,221	2,158	2,4	2,623	4,262	7,852	8,986	8,869	8,906	9,029
11	15	7,06	11,643	10,865	11,136	11,341	11,138	4,414	5,749	8,815	7,788	7,394	9,943
12	16	0,417	0,303	0,282	0,275	0,305	0,333	0,541	0,999	1,144	1,129	1,134	1,149
12	17	1,252	0,908	0,847	0,824	0,915	1	1,624	2,997	3,432	3,388	3,402	3,448
13	18	1,193	0,866	0,808	0,786	0,873	0,953	1,548	2,867	3,288	3,245	3,259	3,299
13	19	18,935	13,905	10,38	6,622	13,799	15,719	16,77	6,918	14,874	14,076	14,245	8,448
13	20	2,38	1,728	1,613	1,569	1,741	1,902	3,088	5,722	6,562	6,476	6,503	6,585
14	21	2,913	2,112	1,969	1,913	2,128	2,326	3,778	6,961	7,967	7,864	7,896	8,005
15	22	4,427	3,379	3,114	2,805	3,127	3,223	5,129	9,045	10,183	9,824	9,685	9,821
15	23	2,183	1,461	1,625	1,586	1,734	1,791	2,613	5,089	6,061	5,812	5,739	5,816
19	24	0,416	0,302	0,282	0,274	0,304	0,332	0,539	1	1,148	1,133	1,137	1,151
19	25	19,556	14,176	10,622	6,896	14,05	16,328	18,588	4,658	12,684	12,522	12,932	7,299
22	26	3,565	2,583	2,408	2,339	2,603	2,845	4,625	8,537	9,775	9,646	9,685	9,821
23	27	1,597	1,157	1,079	1,048	1,166	1,275	2,072	3,824	4,379	4,321	4,339	4,399
23	28	0,59	0,303	0,556	0,548	0,578	0,522	0,541	1,27	1,696	1,498	1,405	1,421
25	29	20,377	14,681	11,105	7,444	14,549	16,907	19,665	3,012	10,461	10,361	10,77	5,159
29	30	12,506	9,691	8,149	4,915	9,807	11,538	10,971	7,472	6,652	6,716	6,693	6,592
29	31	10,679	11,312	11,43	11,345	11,278	9,874	13,152	3,66	6,064	5,827	5,97	7,961
30	32	0,413	0,301	0,281	0,274	0,303	0,331	0,537	1,001	1,15	1,135	1,14	1,153
30	33	5,015	3,654	3,414	3,324	3,682	4,017	6,513	12,145	13,96	13,775	13,834	13,99
31	34	12,011	12,307	12,342	12,183	12,281	10,971	14,883	4,761	3,128	2,696	2,65	8,831
34	35	12,011	12,307	12,342	12,183	12,281	10,971	14,883	4,761	3,128	2,696	2,65	8,831
35	36	2,361	1,717	1,604	1,561	1,73	1,89	3,063	5,723	6,585	6,498	6,526	6,589
35	37	10,481	10,959	9,712	7,803	11,011	10,938	4,906	7,439	11,4	11,993	12,62	5,161

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.6 a A.7 são apresentados os valores de potência ativa em kW que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método AG-PI para $t' = 1$.

Tabela A.6 – Fluxo de Potência Ativa (kW) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	1114,83	837,79	830,85	969,91	1042,00	1101,00	1040,31	1028,80	957,05	1033,47	962,98	667,70
2	3	903,51	653,91	653,28	776,62	841,60	896,89	843,05	833,72	764,29	841,46	773,29	518,34
3	4	156,89	137,75	132,96	144,13	149,07	151,47	150,69	149,09	151,82	158,71	157,84	132,25
3	5	510,70	312,43	372,00	443,37	489,89	535,66	492,43	489,27	366,70	460,83	381,64	245,20
3	6	233,25	202,45	146,93	187,17	200,29	207,03	197,57	193,04	244,03	219,68	232,05	140,11
4	7	79,70	69,98	67,55	73,22	75,74	76,95	78,52	77,71	81,06	88,50	88,25	77,02
4	8	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
5	9	210,61	184,92	178,50	193,48	200,12	203,33	196,91	194,77	193,06	191,56	189,85	150,67
5	10	298,95	127,06	192,97	249,08	288,77	331,08	294,48	293,48	173,04	268,35	191,18	94,28
6	11	205,04	177,76	123,16	161,33	169,54	175,84	167,26	165,81	210,17	182,05	195,62	109,07
9	12	68,89	60,49	58,39	63,29	65,46	66,51	64,41	63,71	63,15	62,66	62,10	49,29
10	13	270,85	102,54	169,26	223,33	262,09	303,90	268,21	267,50	147,40	242,82	165,96	74,32
11	14	106,42	93,43	90,18	97,76	101,11	102,74	99,49	98,41	97,54	96,78	95,92	76,11
11	15	98,48	84,23	32,95	63,50	68,33	72,99	67,68	67,31	112,47	85,15	99,57	32,93
12	16	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
12	17	41,33	36,29	35,03	37,97	39,27	39,90	38,64	38,22	37,88	37,59	37,25	29,57
13	18	37,72	33,12	31,97	34,65	35,84	36,41	35,26	34,88	34,57	34,31	34,00	26,98
13	19	155,87	1,68	71,89	117,75	152,85	192,85	160,71	161,16	42,10	138,26	62,41	-7,85
13	20	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
14	21	93,81	82,37	79,51	86,18	89,13	90,56	87,70	86,75	85,99	85,32	84,56	67,11
15	22	112,30	98,59	95,16	103,16	106,70	108,41	108,99	107,84	118,93	115,33	117,22	99,85
15	23	66,60	58,48	56,45	61,19	63,29	64,30	62,27	61,59	69,06	68,58	68,04	52,45
19	24	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
19	25	142,00	-10,42	60,20	105,04	139,67	179,41	147,74	148,33	21,46	117,67	41,98	-25,71
22	26	112,18	98,50	95,08	103,06	106,59	108,30	104,88	103,74	102,83	102,03	101,12	80,26
23	27	52,81	46,37	44,76	48,52	50,18	50,99	49,38	48,84	48,41	48,04	47,61	37,78
23	28	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	20,63	20,53	20,42	14,66
25	29	114,02	-34,91	36,55	79,39	113,09	152,33	121,57	122,44	-4,10	92,25	16,85	-45,68
29	30	6,56	-15,60	-21,14	-8,21	-2,49	-19,32	-23,47	-32,23	-8,58	-43,32	-11,35	-96,02
29	31	24,66	-92,12	-12,51	11,53	36,90	91,71	67,65	78,11	-71,49	60,29	-46,48	-8,94
30	32	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
30	33	167,61	147,17	142,06	153,98	159,26	161,81	156,70	155,00	153,64	152,45	151,08	119,91
31	34	-21,28	-132,54	-51,45	-30,67	-6,75	47,36	24,71	35,64	-113,67	18,52	-87,93	-41,81
34	35	-21,30	-132,64	-51,46	-30,68	-6,75	47,34	24,70	35,63	-113,75	18,52	-87,98	-41,82
35	36	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
35	37	136,12	34,27	117,74	133,01	154,48	203,30	183,05	194,74	42,40	174,61	73,11	133,53

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.7 – Fluxo de Potência Ativa (kW) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	32,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	158,38	915,12	1160,96	1126,05	1129,27	1089,03
2	3	-45,10	-56,09	-52,31	-50,84	-56,51	-61,76	58,40	730,63	949,15	917,11	919,45	876,72
3	4	77,49	55,52	42,49	38,56	42,87	46,85	75,87	137,75	156,89	154,98	155,62	157,85
3	5	-83,56	-0,20	12,99	5,51	5,73	-11,23	-31,09	404,50	550,23	536,74	540,67	442,73
3	6	-39,18	-111,60	-107,89	-94,97	-105,28	-97,58	13,55	186,70	239,06	222,59	220,34	273,74
4	7	48,64	34,59	22,98	19,60	21,79	23,81	38,56	69,98	79,70	78,73	79,06	80,19
4	8	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
5	9	78,76	57,14	53,29	51,79	57,57	62,92	101,87	184,92	210,61	208,04	208,90	211,89
5	10	-162,66	-57,54	-40,41	-46,32	-52,04	-74,40	-133,21	218,92	338,29	327,46	330,51	229,91
6	11	-57,63	-125,69	-123,04	-111,73	-121,02	-114,02	-2,74	162,00	210,80	194,72	188,37	241,30
9	12	25,76	18,69	17,43	16,94	18,83	20,58	33,32	60,49	68,89	68,05	68,33	69,31
10	13	-173,19	-65,17	-47,50	-53,19	-59,72	-82,81	-146,77	194,33	310,13	299,66	302,60	201,71
11	14	39,76	28,85	26,90	26,15	29,06	31,77	51,44	93,43	106,42	105,12	105,55	107,07
11	15	-97,49	-154,79	-150,16	-138,11	-150,32	-146,02	-54,22	68,49	104,20	89,46	82,69	134,01
12	16	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
12	17	15,46	11,21	10,46	10,16	11,30	12,35	19,99	36,29	41,33	40,82	40,99	41,58
13	18	14,11	10,23	9,54	9,28	10,31	11,27	18,25	33,12	37,72	37,26	37,41	37,95
13	19	-216,40	-96,47	-76,63	-81,46	-91,25	-117,30	-202,52	93,45	195,10	186,05	188,52	86,09
13	20	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
14	21	35,08	25,45	23,74	23,07	25,64	28,03	45,38	82,37	93,81	92,66	93,04	94,38
15	22	55,45	42,84	39,40	34,94	38,93	39,53	62,29	106,59	118,70	113,73	111,38	112,98
15	23	27,49	18,09	20,85	20,38	22,21	22,70	32,21	62,48	74,61	71,19	70,06	71,01
19	24	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
19	25	-225,35	-100,84	-80,20	-84,88	-95,17	-129,61	-229,44	62,93	166,40	165,92	171,64	71,47
22	26	41,95	30,44	28,39	27,59	30,67	33,52	54,26	98,50	112,18	110,81	111,26	112,86
23	27	19,75	14,33	13,36	12,99	14,44	15,78	25,55	46,37	52,81	52,17	52,38	53,13
23	28	7,73	3,76	7,49	7,39	7,77	6,92	6,66	16,10	21,78	19,01	17,66	17,86
25	29	-236,32	-108,68	-87,42	-91,81	-103,06	-138,31	-243,43	38,44	138,38	138,24	143,84	43,39
29	30	-158,02	16,94	45,91	44,62	21,72	-34,50	-104,66	-15,60	6,56	4,35	5,09	7,67
29	31	-109,75	-148,47	-154,59	-157,00	-147,79	-128,97	-179,29	-18,68	49,00	52,09	56,61	-47,64
30	32	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
30	33	62,68	45,48	42,41	41,22	45,82	50,08	81,08	147,17	167,61	165,56	166,24	168,63
31	34	-127,06	-161,07	-166,35	-168,43	-160,48	-142,80	-201,71	-59,03	3,07	6,72	11,05	-93,91
34	35	-127,19	-161,21	-166,50	-168,57	-160,62	-142,92	-201,92	-59,05	3,06	6,72	11,05	-93,98
35	36	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
35	37	75,70	57,14	53,29	51,79	57,57	62,92	-15,01	99,82	152,45	160,40	168,66	61,24

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.8 a A.9 são explicitados os valores de potência reativa em kVAr que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método AG-PI para $t' = 1$.

Tabela A.8 – Fluxo de Potência Reativa (kvar) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	534,63	402,77	399,46	465,74	500,03	528,06	499,23	493,75	459,61	495,97	462,44	321,49
2	3	426,43	309,52	309,36	367,23	397,64	423,51	398,39	394,06	361,43	397,78	365,75	245,99
3	4	86,63	76,06	73,42	79,58	82,31	83,63	80,99	80,11	79,41	78,80	78,09	61,98
3	5	234,78	190,98	141,74	182,76	195,87	216,41	201,52	200,51	213,26	209,22	192,50	121,60
3	6	102,62	41,40	93,00	103,14	117,34	120,96	113,74	111,33	67,29	107,78	93,67	61,79
4	7	43,96	38,60	37,26	40,38	41,77	42,44	41,10	40,65	40,29	39,98	39,62	31,45
4	8	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
5	9	107,27	94,19	90,92	98,55	101,93	103,57	100,29	99,20	98,33	97,57	96,70	76,74
5	10	126,93	96,60	50,57	83,82	93,44	112,21	100,71	100,80	114,65	111,19	95,52	44,76
6	11	89,31	29,76	81,80	90,96	104,73	108,14	101,33	99,06	55,09	95,69	81,68	52,35
9	12	34,44	30,24	29,19	31,64	32,73	33,25	32,20	31,85	31,57	31,33	31,05	24,64
10	13	113,69	85,06	39,41	71,69	80,87	99,40	88,33	88,55	102,58	99,16	83,64	35,36
11	14	58,43	51,30	49,52	53,67	55,52	56,41	54,63	54,03	53,56	53,14	52,66	41,79
11	15	30,81	-21,59	32,27	37,24	49,16	51,67	46,66	44,99	1,46	42,49	28,94	10,54
12	16	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
12	17	20,66	18,14	17,51	18,98	19,64	19,95	19,32	19,11	18,94	18,80	18,63	14,78
13	18	22,96	20,16	19,46	21,09	21,81	22,16	21,46	21,23	21,04	20,88	20,69	16,42
13	19	47,99	27,43	-16,23	11,36	18,45	35,94	26,91	27,79	42,41	39,42	24,47	-11,59
13	20	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
14	21	52,48	46,08	44,48	48,21	49,86	50,66	49,06	48,53	48,10	47,73	47,30	37,54
15	22	68,92	60,51	58,41	63,31	65,49	66,54	64,43	63,73	63,17	62,68	62,12	49,30
15	23	33,14	29,10	28,08	30,44	31,49	31,99	30,98	30,64	30,38	30,14	29,87	23,71
19	24	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
19	25	41,05	21,38	-22,08	5,01	11,85	29,21	20,41	21,37	36,09	33,12	18,26	-16,52
22	26	68,88	60,48	58,38	63,28	65,45	66,50	64,40	63,70	63,14	62,65	62,09	49,28
23	27	26,24	23,04	22,24	24,11	24,94	25,34	24,54	24,27	24,06	23,87	23,66	18,78
23	28	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
25	29	27,88	9,86	-33,20	-7,07	-0,66	16,45	8,09	9,18	24,07	21,15	6,43	-25,91
29	30	-88,90	-99,83	-102,57	-96,19	-93,36	-64,49	-69,17	-60,39	-96,37	-50,09	-97,74	-43,03
29	31	70,47	68,98	30,11	46,58	48,70	36,23	33,97	26,74	77,95	29,13	62,41	-16,02
30	32	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
30	33	82,66	72,58	70,06	75,94	78,54	79,80	77,28	76,44	75,77	75,18	74,51	59,14
31	34	47,50	48,76	10,65	25,49	26,89	14,06	12,51	5,51	56,86	8,25	41,69	-32,45
34	35	47,50	48,71	10,64	25,48	26,88	14,05	12,50	5,51	56,82	8,25	41,66	-32,46
35	36	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
35	37	4,79	11,26	-25,55	-13,75	-13,71	-27,25	-27,47	-34,05	17,72	-30,63	3,20	-63,03

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.9 – Fluxo de Potência Reativa (kvar) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método AG-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	15,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,60	439,64	556,51	539,95	541,48	522,37
2	3	-23,06	-28,05	-26,16	-25,43	-28,26	-30,89	26,60	345,76	447,81	432,87	433,95	413,84
3	4	32,39	23,50	21,91	21,30	23,68	25,88	41,90	76,06	86,63	85,57	85,92	87,16
3	5	-78,58	-115,92	-74,23	4,10	-116,76	-127,60	-22,35	167,93	229,24	218,45	218,21	262,03
3	6	23,02	64,22	26,08	-50,85	64,69	70,68	7,03	100,28	129,24	126,30	127,24	62,55
4	7	16,44	11,93	11,12	10,81	12,02	13,13	21,26	38,60	43,96	43,42	43,60	44,22
4	8	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
5	9	40,11	29,10	27,14	26,38	29,32	32,05	51,89	94,19	107,27	105,96	106,40	107,93
5	10	-118,88	-145,13	-101,43	-22,30	-146,19	-159,78	-74,36	73,43	121,29	111,86	111,17	153,67
6	11	18,10	60,59	22,71	-54,14	61,04	66,69	0,68	88,64	115,90	113,15	114,05	49,13
9	12	12,88	9,35	8,72	8,47	9,42	10,29	16,66	30,24	34,44	34,02	34,16	34,65
10	13	-123,85	-148,73	-104,77	-25,53	-149,82	-163,75	-80,75	61,85	108,02	98,75	98,01	140,38
11	14	21,84	15,84	14,78	14,36	15,96	17,45	28,25	51,30	58,43	57,72	57,95	58,79
11	15	-3,80	44,60	7,80	-68,63	44,94	49,11	-27,59	37,30	57,38	55,36	56,03	-9,77
12	16	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
12	17	7,73	5,61	5,23	5,08	5,65	6,17	10,00	18,14	20,66	20,41	20,50	20,79
13	18	8,59	6,23	5,81	5,65	6,28	6,86	11,11	20,16	22,96	22,68	22,77	23,10
13	19	-148,54	-166,61	-121,41	-41,68	-167,83	-183,45	-112,61	4,21	42,29	33,83	32,82	74,31
13	20	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
14	21	19,63	14,24	13,28	12,91	14,35	15,68	25,39	46,08	52,48	51,84	52,05	52,80
15	22	25,77	18,69	17,43	16,94	18,83	20,58	33,33	60,51	68,92	68,08	68,36	69,34
15	23	12,39	8,99	8,38	8,15	9,06	9,90	16,03	29,10	33,14	32,73	32,87	33,34
19	24	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
19	25	-151,28	-168,56	-123,20	-43,40	-169,80	-185,62	-116,08	-1,85	35,33	26,96	25,92	67,36
22	26	25,76	18,69	17,43	16,94	18,83	20,58	33,32	60,48	68,88	68,04	68,32	69,30
23	27	9,82	7,12	6,64	6,45	7,17	7,84	12,70	23,04	26,24	25,92	26,03	26,40
23	28	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
25	29	-156,49	-172,28	-126,62	-46,67	-173,54	-189,76	-122,72	-13,38	22,13	13,93	12,82	54,14
29	30	-73,63	-133,44	-103,13	-51,28	-134,34	-156,65	-110,70	-99,83	-88,90	-89,99	-89,63	-88,35
29	31	-100,37	-51,57	-35,35	-6,89	-52,02	-47,11	-34,63	45,79	64,72	58,17	56,51	95,88
30	32	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
30	33	30,91	22,43	20,92	20,33	22,60	24,70	39,98	72,58	82,66	81,65	81,98	83,16
31	34	-109,03	-57,88	-41,24	-12,62	-58,38	-54,03	-45,85	25,62	41,76	35,49	33,74	72,74
34	35	-109,11	-57,96	-41,32	-12,69	-58,46	-54,09	-45,97	25,61	41,75	35,49	33,74	72,70
35	36	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
35	37	-125,11	-141,47	-124,04	-95,09	-142,06	-138,77	-66,61	-11,86	-0,97	-6,72	-8,65	32,68

Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE 4 – VARIÁVEIS PARA A SOLUÇÃO DO MÉTODO LC-PI

Nas Tabela de A.10 a A.11 são apresentados os valores horários dos módulos de tensão em kV para cada barra para a solução do Método LC-PI para $t' = 1$.

Tabela A.10 – Níveis de Tensão (kV) Horário de cada Barra para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
2	13,654	13,691	13,692	13,673	13,664	13,656	13,664	13,666	13,675	13,665	13,675	13,713
3	13,569	13,629	13,63	13,6	13,584	13,571	13,584	13,587	13,603	13,585	13,602	13,664
4	13,544	13,607	13,609	13,577	13,561	13,547	13,561	13,564	13,58	13,563	13,58	13,647
5	13,502	13,584	13,585	13,544	13,523	13,505	13,522	13,525	13,55	13,524	13,55	13,63
6	13,551	13,615	13,618	13,585	13,568	13,554	13,567	13,571	13,585	13,568	13,585	13,653
7	13,534	13,599	13,601	13,568	13,551	13,538	13,551	13,555	13,571	13,553	13,571	13,64
8	13,537	13,601	13,603	13,571	13,554	13,54	13,554	13,557	13,574	13,556	13,573	13,642
9	13,483	13,567	13,568	13,526	13,505	13,486	13,503	13,507	13,532	13,506	13,532	13,616
10	13,464	13,566	13,562	13,514	13,488	13,464	13,485	13,489	13,526	13,488	13,523	13,616
11	13,528	13,598	13,603	13,566	13,547	13,532	13,547	13,551	13,565	13,547	13,564	13,642
12	13,478	13,563	13,564	13,522	13,501	13,481	13,499	13,503	13,529	13,502	13,528	13,613
13	13,452	13,56	13,555	13,505	13,477	13,452	13,474	13,478	13,519	13,478	13,516	13,612
14	13,524	13,595	13,6	13,563	13,544	13,529	13,544	13,548	13,562	13,543	13,561	13,64
15	13,512	13,588	13,596	13,555	13,534	13,517	13,534	13,539	13,551	13,533	13,551	13,64
16	13,477	13,562	13,563	13,521	13,499	13,48	13,498	13,502	13,527	13,501	13,527	13,612
17	13,475	13,561	13,562	13,519	13,497	13,478	13,496	13,5	13,526	13,499	13,525	13,611
18	13,447	13,556	13,551	13,5	13,472	13,447	13,469	13,473	13,514	13,473	13,511	13,609
19	13,442	13,559	13,552	13,498	13,468	13,44	13,464	13,468	13,515	13,468	13,511	13,612
20	13,442	13,551	13,546	13,495	13,467	13,442	13,464	13,468	13,509	13,468	13,506	13,605
21	13,505	13,578	13,584	13,545	13,525	13,51	13,526	13,53	13,544	13,526	13,543	13,626
22	13,496	13,574	13,582	13,54	13,518	13,502	13,519	13,524	13,536	13,518	13,536	13,628
23	13,488	13,567	13,575	13,533	13,511	13,493	13,51	13,515	13,527	13,509	13,529	13,622
24	13,44	13,558	13,55	13,496	13,467	13,438	13,462	13,467	13,514	13,467	13,51	13,611
25	13,433	13,559	13,549	13,492	13,46	13,43	13,455	13,459	13,513	13,46	13,508	13,613
26	13,483	13,563	13,572	13,529	13,506	13,489	13,507	13,512	13,523	13,505	13,524	13,618
27	13,486	13,565	13,573	13,531	13,509	13,49	13,508	13,513	13,524	13,507	13,526	13,62
28	13,484	13,564	13,572	13,529	13,507	13,489	13,507	13,512	13,523	13,505	13,525	13,619
29	13,42	13,562	13,547	13,485	13,449	13,414	13,442	13,447	13,512	13,449	13,505	13,617
30	13,424	13,57	13,557	13,491	13,455	13,421	13,45	13,455	13,517	13,457	13,51	13,633
31	13,413	13,568	13,547	13,48	13,442	13,402	13,433	13,437	13,516	13,441	13,508	13,62
32	13,417	13,564	13,551	13,485	13,448	13,415	13,443	13,449	13,511	13,451	13,504	13,628
33	13,427	13,575	13,561	13,495	13,458	13,425	13,454	13,46	13,52	13,461	13,513	13,64
34	13,413	13,575	13,55	13,482	13,441	13,399	13,43	13,435	13,522	13,44	13,513	13,624
35	13,412	13,582	13,553	13,483	13,441	13,395	13,428	13,432	13,528	13,439	13,518	13,629
36	13,406	13,577	13,548	13,477	13,435	13,389	13,423	13,427	13,522	13,433	13,512	13,624
37	13,403	13,58	13,546	13,474	13,431	13,382	13,416	13,42	13,524	13,428	13,513	13,622

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.11 – Níveis de Tensão (kV) Horário de cada Barra para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
2	13,796	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,779	13,681	13,648	13,653	13,653	13,658
3	13,801	13,805	13,805	13,805	13,805	13,806	13,773	13,612	13,558	13,566	13,565	13,575
4	13,792	13,799	13,799	13,799	13,799	13,799	13,761	13,59	13,534	13,542	13,541	13,55
5	13,814	13,815	13,81	13,804	13,815	13,819	13,778	13,561	13,489	13,499	13,497	13,511
6	13,803	13,81	13,811	13,813	13,81	13,809	13,771	13,596	13,539	13,548	13,547	13,556
7	13,789	13,796	13,796	13,796	13,796	13,796	13,756	13,581	13,524	13,532	13,531	13,54
8	13,79	13,797	13,797	13,797	13,797	13,797	13,758	13,584	13,526	13,534	13,534	13,543
9	13,807	13,809	13,805	13,799	13,81	13,813	13,769	13,544	13,469	13,479	13,478	13,492
10	13,836	13,827	13,82	13,81	13,829	13,837	13,796	13,535	13,447	13,459	13,457	13,479
11	13,808	13,818	13,821	13,825	13,818	13,815	13,771	13,578	13,515	13,525	13,525	13,532
12	13,805	13,808	13,804	13,798	13,809	13,812	13,766	13,54	13,465	13,475	13,474	13,487
13	13,844	13,832	13,823	13,812	13,834	13,843	13,803	13,527	13,435	13,446	13,444	13,469
14	13,806	13,817	13,82	13,824	13,817	13,814	13,769	13,575	13,511	13,522	13,521	13,528
15	13,823	13,837	13,842	13,849	13,836	13,83	13,782	13,568	13,498	13,509	13,509	13,514
16	13,805	13,808	13,804	13,798	13,808	13,811	13,766	13,539	13,463	13,473	13,472	13,486
17	13,804	13,807	13,803	13,797	13,808	13,811	13,765	13,537	13,462	13,472	13,47	13,484
18	13,842	13,831	13,822	13,811	13,832	13,841	13,8	13,523	13,429	13,441	13,439	13,464
19	13,86	13,842	13,831	13,818	13,844	13,855	13,817	13,523	13,423	13,435	13,433	13,462
20	13,84	13,829	13,821	13,809	13,831	13,84	13,798	13,518	13,424	13,436	13,434	13,458
21	13,799	13,812	13,815	13,82	13,812	13,808	13,76	13,558	13,492	13,503	13,502	13,509
22	13,816	13,832	13,837	13,844	13,831	13,824	13,774	13,554	13,482	13,494	13,493	13,498
23	13,814	13,83	13,836	13,844	13,829	13,82	13,767	13,545	13,472	13,485	13,485	13,49
24	13,859	13,841	13,83	13,817	13,843	13,855	13,816	13,521	13,421	13,434	13,431	13,46
25	13,876	13,852	13,839	13,823	13,854	13,869	13,833	13,52	13,413	13,425	13,422	13,456
26	13,811	13,828	13,833	13,841	13,826	13,82	13,768	13,543	13,47	13,482	13,48	13,485
27	13,812	13,83	13,835	13,843	13,829	13,819	13,766	13,542	13,469	13,482	13,483	13,488
28	13,812	13,829	13,835	13,843	13,828	13,819	13,766	13,541	13,468	13,48	13,481	13,486
29	13,905	13,87	13,854	13,835	13,873	13,893	13,863	13,517	13,399	13,412	13,408	13,448
30	13,933	13,872	13,85	13,83	13,876	13,907	13,887	13,526	13,403	13,416	13,412	13,452
31	13,924	13,889	13,873	13,852	13,892	13,91	13,885	13,518	13,391	13,403	13,398	13,448
32	13,93	13,87	13,849	13,828	13,875	13,905	13,884	13,52	13,396	13,409	13,405	13,445
33	13,944	13,873	13,849	13,828	13,878	13,913	13,897	13,53	13,406	13,419	13,415	13,455
34	13,937	13,902	13,886	13,864	13,905	13,923	13,9	13,521	13,389	13,401	13,396	13,451
35	13,95	13,915	13,899	13,876	13,918	13,935	13,916	13,525	13,388	13,4	13,394	13,455
36	13,948	13,913	13,898	13,875	13,916	13,933	13,913	13,519	13,382	13,394	13,388	13,449
37	13,95	13,917	13,901	13,877	13,92	13,936	13,919	13,518	13,377	13,389	13,382	13,449

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.12 a A.13 são explicitados os módulos das correntes em A que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método LC-PI para $t' = 1$.

Tabela A.12 – Corrente (A) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	90,545	67,892	67,328	78,674	84,579	89,403	84,664	83,494	77,628	84,019	77,808	54,04
2	3	73,628	53,078	53,028	63,154	68,516	73,072	68,858	67,862	62,145	68,644	62,582	41,988
3	4	13,232	11,563	11,16	12,126	12,557	12,772	12,356	12,219	12,097	12,018	11,896	9,394
3	5	41,625	26,95	29,301	35,391	39,007	42,49	39,56	39,084	31,827	38,614	32,53	21,458
3	6	18,804	15,177	12,77	15,732	17,111	17,951	17,062	16,677	18,613	18,05	18,231	11,159
4	7	6,725	5,877	5,672	6,163	6,382	6,491	6,28	6,21	6,148	6,108	6,046	4,774
4	8	6,507	5,686	5,488	5,963	6,175	6,28	6,076	6,009	5,949	5,91	5,85	4,62
5	9	17,53	15,296	14,764	16,053	16,63	16,921	16,365	16,182	16,01	15,917	15,744	12,419
5	10	24,119	11,76	14,705	19,432	22,495	25,669	23,289	22,995	15,356	22,192	16,257	8,738
6	11	16,532	13,255	10,87	13,653	14,964	15,764	14,691	14,33	15,429	15,118	15,096	8,256
9	12	5,715	4,986	4,813	5,233	5,421	5,516	5,335	5,275	5,219	5,189	5,132	4,048
10	13	21,833	9,819	12,817	17,353	20,344	23,474	21,167	20,896	13,294	20,118	14,204	7,123
11	14	8,977	7,84	7,565	8,223	8,517	8,663	8,38	8,287	8,205	8,152	8,069	6,366
11	15	7,636	6,4	3,392	5,179	6,221	6,862	6,075	5,645	7,381	6,19	5,908	0,953
12	16	1,143	0,997	0,962	1,047	1,084	1,103	1,067	1,055	1,044	1,038	1,026	0,81
12	17	3,429	2,992	2,888	3,14	3,253	3,31	3,201	3,165	3,132	3,113	3,08	2,429
13	18	3,284	2,86	2,762	3,005	3,114	3,17	3,065	3,031	2,995	2,981	2,946	2,321
13	19	12,13	2,025	5,435	8,747	11,424	14,291	12,305	12,133	4,429	11,351	5,416	1,043
13	20	6,553	5,707	5,511	5,996	6,215	6,327	6,117	6,048	5,977	5,949	5,879	4,632
14	21	7,959	6,951	6,707	7,29	7,551	7,681	7,43	7,347	7,275	7,228	7,154	5,644
15	22	9,763	8,522	8,221	8,939	9,515	9,675	9,366	9,085	9,432	9,634	9,477	7,616
15	23	5,515	4,814	4,644	5,05	5,232	5,59	5,415	5,357	5,562	5,561	5,223	4,172
19	24	1,146	0,997	0,963	1,048	1,087	1,107	1,07	1,058	1,045	1,04	1,028	0,81
19	25	11,002	1,755	4,729	7,778	10,407	13,229	11,286	11,125	3,113	9,758	3,844	1,412
22	26	9,763	8,522	8,221	8,939	9,515	9,675	9,366	9,085	9,432	9,634	9,477	7,616
23	27	4,373	3,817	3,682	4,004	4,148	4,488	4,349	4,303	4,519	4,525	4,197	3,363
23	28	1,142	0,997	0,962	1,046	1,084	1,102	1,066	1,054	1,044	1,037	1,027	0,809
25	29	8,744	2,679	3,644	5,894	8,402	11,114	9,26	9,122	1,804	7,719	1,79	2,896
29	30	6,643	7,448	7,727	7,158	6,944	5,022	5,187	4,961	7,132	4,183	7,246	6,41
29	31	5,566	8,482	2,407	3,561	4,546	7,08	5,631	5,863	8,225	4,588	6,393	1,51
30	32	1,148	0,997	0,963	1,049	1,088	1,108	1,071	1,059	1,045	1,042	1,028	0,809
30	33	7,16	8,068	8,357	7,758	7,519	5,839	5,988	5,829	7,662	5,089	7,716	7,218
31	34	3,874	10,403	3,877	2,968	2,061	3,402	2,06	2,39	9,917	1,114	7,99	4,117
34	35	3,874	10,403	3,877	2,968	2,061	3,402	2,06	2,39	9,917	1,114	7,99	4,117
35	36	6,57	5,697	5,511	6,004	6,23	6,351	6,136	6,067	5,971	5,964	5,876	4,625
35	37	10,171	2,656	8,895	9,914	11,549	15,328	14,165	14,731	3,398	13,421	4,935	10,845

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.13 – Corrente (A) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	2,188	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	13,18	74,197	94,306	91,452	91,726	88,428
2	3	4,075	4,543	4,236	4,117	4,577	5,002	5,071	59,371	77,382	74,74	74,944	71,412
3	4	4,858	3,523	3,285	3,193	3,549	3,879	6,298	11,578	13,243	13,073	13,128	13,307
3	5	7,554	8,442	5,588	0,749	8,482	9,332	3,013	32,015	44,171	42,969	43,439	38,321
3	6	3,059	9,324	8,328	8,056	9,195	8,286	1,815	15,844	20,067	18,838	18,55	20,437
4	7	2,469	1,79	1,669	1,623	1,804	1,971	3,201	5,885	6,731	6,644	6,672	6,763
4	8	2,389	1,732	1,616	1,57	1,745	1,908	3,097	5,694	6,512	6,429	6,456	6,544
5	9	6,401	4,644	4,332	4,212	4,678	5,112	8,303	15,322	17,548	17,321	17,394	17,625
5	10	13,889	10,98	7,851	3,723	11,224	13,072	11,315	16,493	26,15	25,374	25,88	20,508
6	11	4,587	10,49	9,56	9,081	10,084	8,969	0,188	13,341	17,382	16,422	16,305	18,209
9	12	2,086	1,513	1,412	1,373	1,525	1,666	2,706	4,995	5,72	5,646	5,67	5,746
10	13	14,704	11,395	8,262	4,272	11,661	13,611	12,395	14,507	23,869	23,127	23,626	18,238
11	14	3,286	2,382	2,221	2,158	2,4	2,624	4,262	7,852	8,985	8,869	8,906	9,029
11	15	7,933	12,06	11,375	11,236	11,913	10,756	5,124	4,615	7,757	7,23	7,319	9,96
12	16	0,417	0,303	0,282	0,275	0,305	0,333	0,541	0,999	1,144	1,129	1,134	1,149
12	17	1,252	0,908	0,847	0,824	0,915	1	1,624	2,997	3,432	3,388	3,402	3,448
13	18	1,193	0,866	0,808	0,786	0,873	0,953	1,548	2,867	3,288	3,245	3,259	3,3
13	19	18,255	13,463	10,294	6,623	13,802	16,133	17,027	6,32	14,277	13,726	14,211	8,443
13	20	2,38	1,728	1,613	1,569	1,741	1,902	3,088	5,721	6,562	6,476	6,504	6,585
14	21	2,913	2,112	1,969	1,913	2,127	2,326	3,779	6,961	7,967	7,863	7,896	8,005
15	22	4,069	2,987	2,917	2,966	3,111	3,353	4,8	8,534	9,773	9,645	9,94	10,075
15	23	2,197	1,459	1,36	1,321	1,47	2,306	3,307	5,358	6,06	5,759	5,496	5,548
19	24	0,416	0,302	0,282	0,274	0,304	0,332	0,539	1	1,148	1,133	1,137	1,151
19	25	18,874	13,722	10,533	6,897	14,052	16,766	18,857	4,06	12,088	12,171	12,898	7,295
22	26	4,069	2,987	2,917	2,966	3,111	3,353	4,8	8,534	9,773	9,645	9,94	10,075
23	27	1,781	1,157	1,079	1,048	1,166	1,978	2,769	4,361	4,917	4,631	4,363	4,399
23	28	0,417	0,302	0,282	0,274	0,304	0,333	0,541	0,999	1,144	1,129	1,133	1,149
25	29	19,693	14,207	11,011	7,445	14,552	17,356	19,935	2,455	9,859	10,008	10,736	5,159
29	30	11,294	9,725	7,433	4,578	9,739	11,539	10,881	7,473	6,653	6,718	6,696	6,595
29	31	11,056	11,361	11,669	11,374	11,301	10,574	13,303	3,922	5,721	5,602	5,952	7,985
30	32	0,413	0,301	0,281	0,274	0,303	0,331	0,537	1	1,15	1,135	1,14	1,153
30	33	11,708	9,801	7,43	4,5	9,834	11,75	11,394	8,095	7,171	7,252	7,224	7,102
31	34	12,403	12,358	12,594	12,225	12,305	11,667	15,039	5,308	3,14	2,653	2,642	8,854
34	35	12,403	12,358	12,594	12,225	12,305	11,667	15,039	5,308	3,14	2,653	2,642	8,854
35	36	2,362	1,718	1,604	1,561	1,73	1,889	3,063	5,721	6,582	6,496	6,526	6,589
35	37	10,136	11,089	10,564	8,211	11,076	10,933	5,03	7,435	11,396	11,992	12,623	5,161

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.14 a A.15 são apresentados os valores de potência ativa em kW que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método LC-PI para $t' = 1$.

Tabela A.14 – Fluxo de Potência Ativa (kW) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	1114,78	837,72	830,80	969,74	1041,93	1100,84	1042,97	1028,67	956,95	1035,09	959,15	667,69
2	3	903,46	653,85	653,23	776,46	841,53	896,73	845,67	833,60	764,20	843,07	769,50	518,33
3	4	156,89	137,75	132,96	144,13	149,07	151,47	146,68	145,09	143,81	142,69	141,42	112,22
3	5	510,69	312,35	371,95	443,14	489,81	531,47	495,01	489,15	374,86	478,17	395,36	266,01
3	6	233,21	202,45	146,93	187,23	200,31	211,09	201,60	197,04	243,77	219,90	230,94	139,28
4	7	79,70	69,98	67,55	73,22	75,74	76,95	74,52	73,71	73,06	72,50	71,85	57,02
4	8	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
5	9	210,61	184,92	178,50	193,48	200,12	203,33	196,91	194,77	193,06	191,56	189,85	150,67
5	10	298,93	126,98	192,92	248,85	288,68	326,91	297,06	293,36	173,20	277,65	196,87	110,27
6	11	205,00	177,76	123,16	161,39	173,56	183,87	171,28	167,02	201,92	181,07	189,53	99,72
9	12	68,89	60,49	58,39	63,29	65,46	66,51	64,41	63,71	63,15	62,66	62,10	49,29
10	13	270,84	102,46	169,21	223,10	262,00	299,74	270,79	267,38	147,57	252,11	171,65	90,30
11	14	106,42	93,43	90,18	97,76	101,11	102,74	99,49	98,41	97,54	96,78	95,92	76,11
11	15	98,44	84,24	32,95	59,56	68,34	77,02	67,69	61,78	100,01	72,19	76,13	7,60
12	16	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
12	17	41,33	36,29	35,03	37,97	39,27	39,90	38,64	38,22	37,88	37,59	37,25	29,57
13	18	37,72	33,12	31,97	34,65	35,84	36,41	35,26	34,88	34,57	34,31	34,00	26,98
13	19	155,86	1,61	71,84	117,52	152,76	188,69	163,28	161,04	42,26	147,54	68,09	8,13
13	20	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
14	21	93,81	82,37	79,51	86,18	89,13	90,56	87,70	86,75	85,99	85,32	84,56	67,11
15	22	112,30	98,59	95,16	103,16	110,70	112,42	108,99	105,04	110,94	114,15	112,23	91,33
15	23	66,60	58,48	56,45	61,19	63,29	68,30	66,27	65,59	68,83	68,81	64,04	51,65
19	24	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
19	25	141,99	-10,49	60,15	104,82	139,59	175,26	150,30	148,21	21,63	126,94	47,66	-9,73
22	26	112,18	98,50	95,08	103,06	110,59	112,30	108,88	104,94	110,83	114,03	112,12	91,26
23	27	52,81	46,37	44,76	48,52	50,18	54,99	53,38	52,84	56,18	56,26	51,61	41,78
23	28	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
25	29	114,01	-34,98	36,51	79,16	113,01	148,18	124,13	122,32	-3,93	101,50	22,53	-29,68
29	30	6,44	-15,67	-21,20	-8,31	-2,59	-19,45	-21,66	-28,34	-0,68	-28,62	4,96	-76,06
29	31	24,77	-92,12	-12,50	11,39	36,91	87,70	68,39	74,11	-79,25	54,87	-57,12	-12,86
30	32	13,78	12,10	11,68	12,66	13,09	13,30	12,88	12,74	12,63	12,53	12,42	9,86
30	33	-7,40	-27,84	-32,95	-21,02	-15,74	-32,79	-34,58	-41,12	-13,36	-41,18	-7,52	-85,96
31	34	-21,16	-132,54	-51,44	-30,81	-6,73	43,35	25,45	31,64	-121,43	13,10	-98,58	-45,73
34	35	-21,18	-132,64	-51,45	-30,82	-6,73	43,34	25,45	31,63	-121,53	13,10	-98,64	-45,75
35	36	77,08	67,68	65,33	70,81	73,24	74,41	72,06	71,28	70,65	70,11	69,48	55,14
35	37	136,24	34,27	117,75	132,88	154,50	203,30	187,79	194,74	42,40	177,42	66,45	133,60

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.15 – Fluxo de Potência Ativa (kW) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	27,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	163,49	914,95	1160,66	1125,85	1129,19	1088,94
2	3	-50,12	-56,09	-52,31	-50,84	-56,51	-61,76	63,50	730,46	948,85	916,91	919,38	876,64
3	4	58,65	42,55	39,68	38,56	42,87	46,85	75,87	137,75	156,89	154,98	155,62	157,85
3	5	-70,96	12,77	19,83	9,52	9,69	-18,81	-36,43	400,38	550,00	537,35	544,21	446,43
3	6	-37,93	-111,59	-111,93	-98,99	-109,25	-90,00	23,98	190,67	238,99	221,79	216,71	269,95
4	7	29,81	21,63	20,17	19,60	21,79	23,81	38,56	69,98	79,70	78,73	79,06	80,19
4	8	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
5	9	78,76	57,14	53,29	51,79	57,57	62,92	101,87	184,92	210,61	208,04	208,90	211,89
5	10	-152,61	-44,58	-37,56	-46,31	-52,07	-84,79	-138,55	210,82	330,10	322,68	330,05	229,61
6	11	-61,86	-131,68	-130,10	-113,29	-125,25	-104,42	2,49	157,98	204,35	191,12	188,74	241,50
9	12	25,76	18,69	17,43	16,94	18,83	20,58	33,32	60,49	68,89	68,05	68,33	69,31
10	13	-163,14	-52,20	-44,65	-53,18	-59,76	-93,21	-152,11	186,25	301,96	294,90	302,14	201,41
11	14	39,76	28,85	26,90	26,15	29,06	31,77	51,44	93,43	106,42	105,12	105,55	107,07
11	15	-109,34	-160,80	-157,24	-139,67	-158,57	-140,41	-65,00	50,29	87,59	80,48	81,46	134,22
12	16	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
12	17	15,46	11,21	10,46	10,16	11,30	12,35	19,99	36,29	41,33	40,82	40,99	41,58
13	18	14,11	10,23	9,54	9,28	10,31	11,27	18,25	33,12	37,72	37,26	37,41	37,95
13	19	-206,33	-83,49	-73,78	-81,45	-91,29	-127,71	-207,87	85,37	186,94	181,29	188,06	85,79
13	20	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
14	21	35,08	25,45	23,74	23,07	25,64	28,03	45,38	82,37	93,81	92,66	93,04	94,38
15	22	49,97	36,85	36,40	37,40	38,68	41,53	57,09	98,59	112,30	110,93	115,39	116,99
15	23	27,71	18,07	16,85	16,38	18,20	30,30	42,62	66,48	74,61	70,42	66,43	67,01
19	24	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
19	25	-215,26	-87,85	-77,35	-84,87	-95,20	-140,03	-234,80	54,86	158,25	161,17	171,18	71,17
22	26	49,95	36,84	36,39	37,39	38,67	41,52	57,06	98,50	112,18	110,81	115,26	116,86
23	27	22,55	14,33	13,36	12,99	14,44	26,18	35,95	54,37	60,81	56,80	52,75	53,13
23	28	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
25	29	-226,19	-95,68	-84,56	-91,80	-103,10	-148,75	-248,80	30,37	130,25	133,50	143,38	43,09
29	30	-139,09	29,94	48,75	44,63	21,68	-34,59	-108,52	-15,67	6,44	4,22	4,96	7,54
29	31	-118,50	-148,46	-154,56	-156,99	-147,79	-139,34	-180,81	-26,69	41,00	47,48	56,28	-47,81
30	32	5,15	3,74	3,49	3,39	3,77	4,12	6,66	12,10	13,78	13,61	13,66	13,86
30	33	-144,36	26,11	45,22	41,22	17,83	-38,83	-115,30	-27,84	-7,40	-9,44	-8,76	-6,37
31	34	-135,82	-161,06	-166,33	-168,43	-160,48	-153,19	-203,23	-67,03	-4,93	2,11	10,72	-94,08
34	35	-135,96	-161,21	-166,48	-168,57	-160,62	-153,32	-203,44	-67,06	-4,94	2,10	10,72	-94,16
35	36	28,83	20,91	19,50	18,96	21,07	23,03	37,29	67,68	77,08	76,14	76,45	77,55
35	37	69,74	57,14	53,29	51,79	57,57	62,92	-6,14	99,81	152,45	160,42	168,70	61,24

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas de A.16 a A.17 são explicitados os valores de potência reativa em kVAr que fluem da barra B_i para a barra B_j em cada horário para a solução do Método LC-PI para $t' = 1$.

Tabela A.16 – Fluxo de Potência Reativa (kvar) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 1 de 2)

B_i	B_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	534,60	402,74	399,44	465,66	500,00	527,98	500,49	493,69	459,57	496,74	460,62	321,48
2	3	426,41	309,49	309,34	367,15	397,60	423,44	399,63	394,00	361,39	398,53	363,96	245,98
3	4	86,63	76,06	73,42	79,58	82,31	83,63	80,99	80,11	79,41	78,79	78,09	61,97
3	5	234,69	190,96	141,71	182,78	195,83	216,34	202,73	200,46	213,25	209,89	194,85	121,56
3	6	102,68	41,39	93,00	103,04	117,35	120,99	113,75	111,33	67,23	107,77	89,47	61,77
4	7	43,96	38,60	37,26	40,38	41,77	42,44	41,10	40,65	40,29	39,98	39,62	31,45
4	8	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
5	9	107,27	94,19	90,92	98,55	101,93	103,57	100,29	99,20	98,33	97,57	96,70	76,74
5	10	126,85	96,58	50,55	83,84	93,40	112,15	101,91	100,74	114,64	111,84	97,86	44,70
6	11	89,37	29,75	81,80	90,86	104,74	108,15	101,34	99,06	55,04	95,69	77,49	52,34
9	12	34,44	30,24	29,19	31,64	32,73	33,25	32,20	31,85	31,57	31,33	31,05	24,64
10	13	113,61	85,03	39,39	71,71	80,83	99,34	89,53	88,49	102,57	99,80	85,98	35,31
11	14	58,43	51,30	49,52	53,67	55,52	56,41	54,63	54,03	53,56	53,14	52,66	41,79
11	15	30,87	-21,60	32,27	37,15	49,17	51,68	46,66	44,99	1,42	42,50	24,78	10,54
12	16	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
12	17	20,66	18,14	17,51	18,98	19,64	19,95	19,32	19,11	18,94	18,80	18,63	14,78
13	18	22,96	20,16	19,46	21,09	21,81	22,16	21,46	21,23	21,04	20,88	20,69	16,42
13	19	47,91	27,41	-16,25	11,38	18,40	35,88	28,10	27,73	42,40	40,05	26,81	-11,64
13	20	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
14	21	52,48	46,08	44,48	48,21	49,86	50,66	49,06	48,53	48,10	47,73	47,30	37,54
15	22	68,92	60,51	58,41	63,31	65,49	66,54	64,44	63,73	63,18	62,69	62,13	49,30
15	23	33,14	29,10	28,08	30,44	31,49	31,99	30,98	30,64	30,38	30,14	29,87	23,71
19	24	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
19	25	40,97	21,36	-22,10	5,03	11,81	29,16	21,60	21,31	36,08	33,75	20,59	-16,57
22	26	68,88	60,48	58,38	63,28	65,45	66,50	64,40	63,70	63,14	62,65	62,09	49,28
23	27	26,24	23,04	22,24	24,11	24,94	25,34	24,54	24,27	24,06	23,87	23,66	18,78
23	28	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
25	29	27,80	9,83	-33,23	-7,05	-0,70	16,40	9,28	9,12	24,05	21,77	8,77	-25,96
29	30	-88,94	-99,86	-102,58	-96,22	-93,40	-64,53	-66,32	-60,44	-96,40	-48,47	-97,76	-43,05
29	31	70,43	68,98	30,11	46,63	48,69	36,23	32,31	26,74	77,96	28,15	64,77	-16,04
30	32	6,89	6,05	5,84	6,33	6,55	6,65	6,44	6,37	6,31	6,27	6,21	4,93
30	33	-95,84	-105,92	-108,44	-102,56	-99,96	-71,20	-72,77	-66,82	-102,73	-54,75	-103,99	-47,99
31	34	47,46	48,76	10,65	25,53	26,88	14,06	10,84	5,51	56,87	7,27	44,04	-32,47
34	35	47,45	48,71	10,64	25,53	26,88	14,05	10,84	5,51	56,82	7,26	44,01	-32,48
35	36	42,64	37,44	36,14	39,17	40,51	41,16	39,86	39,43	39,08	38,78	38,43	30,50
35	37	4,75	11,26	-25,55	-13,70	-13,72	-27,25	-29,14	-34,05	17,72	-31,62	5,55	-63,06

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela A.17 – Fluxo de Potência Reativa (kvar) Horária de cada Ramo do Alimentador para a Solução do Método LC-PI (t'=1) (parte 2 de 2)

B_i	B_j	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	13,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,07	439,56	556,37	539,86	541,44	522,33
2	3	-25,50	-28,05	-26,16	-25,43	-28,26	-30,89	29,06	345,68	447,67	432,78	433,91	413,80
3	4	32,39	23,50	21,91	21,30	23,68	25,88	41,90	76,06	86,63	85,57	85,92	87,16
3	5	-76,52	-115,93	-74,59	4,06	-116,78	-127,58	-19,91	167,89	229,14	218,37	218,15	262,27
3	6	18,54	64,24	26,43	-50,82	64,71	70,67	7,04	100,26	129,20	126,28	127,24	62,26
4	7	16,44	11,93	11,12	10,81	12,02	13,13	21,26	38,60	43,96	43,42	43,60	44,22
4	8	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
5	9	40,11	29,10	27,14	26,38	29,32	32,05	51,89	94,19	107,27	105,96	106,40	107,93
5	10	-116,80	-145,13	-101,78	-22,34	-146,21	-159,77	-71,92	73,41	121,22	111,79	111,11	153,90
6	11	13,62	60,60	23,05	-54,10	61,05	66,69	0,69	88,62	115,87	113,14	114,05	48,83
9	12	12,88	9,35	8,72	8,47	9,42	10,29	16,66	30,24	34,44	34,02	34,16	34,65
10	13	-121,76	-148,73	-105,12	-25,57	-149,84	-163,74	-78,31	61,83	107,95	98,69	97,96	140,62
11	14	21,84	15,84	14,78	14,36	15,96	17,45	28,25	51,30	58,43	57,72	57,95	58,79
11	15	-8,29	44,60	8,14	-68,60	44,94	49,12	-27,59	37,29	57,37	55,36	56,03	-10,07
12	16	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
12	17	7,73	5,61	5,23	5,08	5,65	6,17	10,00	18,14	20,66	20,41	20,50	20,79
13	18	8,59	6,23	5,81	5,65	6,28	6,86	11,11	20,16	22,96	22,68	22,77	23,10
13	19	-146,44	-166,61	-121,77	-41,72	-167,85	-183,45	-110,17	4,19	42,23	33,78	32,77	74,55
13	20	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
14	21	19,63	14,24	13,28	12,91	14,35	15,68	25,39	46,08	52,48	51,84	52,05	52,80
15	22	25,77	18,69	17,43	16,94	18,83	20,59	33,33	60,51	68,92	68,08	68,36	69,34
15	23	12,39	8,99	8,38	8,15	9,06	9,90	16,03	29,10	33,14	32,73	32,87	33,34
19	24	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
19	25	-149,17	-168,56	-123,56	-43,44	-169,82	-185,63	-113,65	-1,87	35,28	26,91	25,86	67,60
22	26	25,76	18,69	17,43	16,94	18,83	20,58	33,32	60,48	68,88	68,04	68,32	69,30
23	27	9,82	7,12	6,64	6,45	7,17	7,84	12,70	23,04	26,24	25,92	26,03	26,40
23	28	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
25	29	-154,36	-172,26	-126,97	-46,70	-173,56	-189,77	-120,29	-13,39	22,09	13,88	12,77	54,38
29	30	-73,60	-131,54	-90,68	-44,91	-133,40	-156,70	-105,15	-99,86	-88,94	-90,03	-89,67	-88,39
29	31	-98,26	-53,46	-48,15	-13,29	-52,99	-47,09	-37,75	45,80	64,72	58,17	56,50	96,16
30	32	2,58	1,87	1,74	1,69	1,88	2,06	3,33	6,05	6,89	6,80	6,83	6,93
30	33	-76,21	-133,43	-92,44	-46,61	-135,31	-158,80	-108,52	-105,92	-95,84	-96,85	-96,52	-95,34
31	34	-106,93	-59,77	-54,04	-19,02	-59,34	-54,02	-48,98	25,63	41,75	35,49	33,73	73,02
34	35	-107,01	-59,85	-54,13	-19,10	-59,42	-54,09	-49,10	25,62	41,75	35,48	33,72	72,98
35	36	15,95	11,57	10,79	10,49	11,66	12,74	20,63	37,44	42,64	42,12	42,29	42,90
35	37	-123,01	-143,36	-136,85	-101,49	-143,02	-138,77	-69,74	-11,86	-0,97	-6,72	-8,67	32,68

Fonte: Produção do próprio autor.

ANEXOS

ANEXO 1 – PARÂMETROS DO ALIMENTADOR

Na Tabela A.18 são explicitados os parâmetros físicos do alimentador.

Tabela A.18 – Parâmetros Físicos do Alimentador

B_i	B_j	R (Ω)	X (Ω)	I_{max} (A)
1	2	1,19392	1,22615	800
2	3	0,86346	0,89846	800
3	4	1,80447	0,58011	800
3	5	1,18726	1,23539	800
3	6	0,83753	0,47759	800
4	7	1,44364	0,46411	800
4	8	1,08265	0,34806	800
5	9	1,08265	0,34806	800
5	10	1,39586	0,79598	800
6	11	1,20977	0,68986	800
9	12	0,65137	0,37144	800
10	13	0,46529	0,26533	800
11	14	0,36084	0,116	800
11	15	1,86114	1,0613	800
12	16	1,26307	0,40606	800
12	17	0,90224	0,29006	800
13	18	1,39586	0,79598	800
13	19	0,74449	0,42454	800
13	20	1,39586	0,9598	800
14	21	2,34587	0,75417	800
15	22	1,39586	0,79598	800
15	23	4,15034	1,33428	800
19	24	1,44364	0,46411	800
19	25	0,74449	0,42454	800
22	26	1,26307	0,40606	800
23	27	0,5414	0,17405	800
23	28	3,42853	1,10223	800
25	29	1,30282	0,74292	800
29	30	2,34587	0,75417	800
29	31	1,4889	0,84903	800
30	32	5,77425	1,85634	800
30	33	0,90224	0,29006	800
31	34	0,93057	0,53065	800
34	35	0,93057	0,53065	800
35	36	0,90224	0,29006	800
35	37	0,93057	0,53065	800

Fonte: RUEDA-MEDINA et al, 2013.