



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

HENRIQUE MESQUITA TONHÁ

**Macro e Micro modelo de planejamento para microrredes
participantes de mercado local de energia**

GOIÂNIA
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[] Dissertação [X] Tese

2. Nome completo do autor

Henrique Mesquita Tonhá

3. Título do trabalho

“Macro e Micro modelo de planejamento para microrredes participantes de mercado local de energia”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Pinheiro De Alvarenga, Professor do Magistério Superior**, em 13/04/2022, às 08:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **HENRIQUE MESQUITA TONHÁ, Discente**, em 13/04/2022, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2829052** e o código CRC **0E267C0B**.

Referência: Processo nº 23070.008951/2022-12

SEI nº 2829052

HENRIQUE MESQUITA TONHÁ

**Macro e Micro modelo de planejamento para microrredes
participantes de mercado local de energia**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Linha de pesquisa: Sistemas Eletro-Eletrônicos

Orientador: Professor Doutor Bernardo Pinheiro de Alvarenga

GOIÂNIA
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Tonhá, Henrique Mesquita

Macro e Micro modelo de planejamento para microrredes
participantes de mercado local de energia [manuscrito] / Henrique
Mesquita Tonhá. - 2022.

104 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2022.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. equilíbrio de Nash e eficiência de Pareto. 2. fontes renováveis.
3. jogo. 4. mercado local. 5. microrredes. I. Alvarenga, Bernardo
Pinheiro de, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata nº 01 da sessão de Defesa de Tese de **Henrique Mesquita Tonhá** que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos vinte e um dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e dois, a partir das 14h30min., realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**Macro e Micro modelo de planejamento para microrredes participantes de mercado local de energia**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Bernardo Pinheiro de Alvarenga (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Luiz Carlos Pereira da Silva (DSEE/UNICAMP)**, membro titular externo; Professor Doutor **Luis Gustavo Wesz da Silva (IFG/Itumbiara)**, membro titular externo, Professor Doutor **Thyago Carvalho Marques (EMC/UFG)**, membro titular interno; Professor Doutor **Prof. Dr. Igor Kopcak (EMC/UFG)**, membro titular interno: **cujas participações ocorreram através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Bernardo Pinheiro de Alvarenga, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e um dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Pinheiro De Alvarenga, Professor do Magistério Superior**, em 21/03/2022, às 18:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 21/03/2022, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Gustavo Wesz da Silva, Usuário Externo**, em 21/03/2022, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thyago Carvalho Marques, Professor do Magistério Superior**, em 21/03/2022, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº](#)



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Pereira da Silva, Usuário Externo**, em 23/03/2022, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **HENRIQUE MESQUITA TONHÁ, Discente**, em 14/04/2022, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2760954** e o código CRC **6A93B093**.

Referência: Processo nº 23070.008951/2022-12

SEI nº 2760954

*Este trabalho é dedicado a todos que fazem da educação
um instrumento de evolução, libertação e justiça social.*

Agradecimentos

A Deus, pela vida, sabedoria e todos os demais infinitos benefícios.

A minha mãe, Maria José, pelo incentivo, apoio e amor.

Aos professores da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG por contribuírem para minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga pela confiança, parceria, e ensinamentos que pude alcançar.

Ao Prof. Dr. Antônio César Baleeiro Alves pela contribuição para este trabalho, ensinamentos e disponibilidade.

Aos companheiros do laboratório de Pesquisa em Energia que compartilharam em algum momento a minha jornada, em especial: André, Arthur Melo, Célio, Ciliana, Lázaro, Morgam, Renato Silva, Thaissa e Vilmar.

A meus familiares, amigos e todos aqueles que torceram por mim.

A Capes e Fapeg pelo apoio financeiro e sua operacionalização.

Resumo

As microrredes (MRs) possuem inteligência e flexibilidade que proporcionam a integração de fontes renováveis à sua configuração. O aspecto técnico complementar entre as diversas fontes renováveis e os esquemas de armazenamento associados a uma flexibilidade de contratos de energia permitem a existência de um mercado local envolvendo MRs. Este trabalho almeja estudar dois modelos de competição de MRs: macro e micro. O modelo macro trata da competição de mercado entre MRs locais e o modelo micro, a competição entre as diversas fontes de geração. A associação virtual de MRs remotamente instaladas aplicada a uma plataforma de competição busca conferir justiça para esses agentes em um modelo macro de mercado competindo com MRs mais centralizadas na rede. Ao remunerar todos os envolvidos, o modelo almeja reduzir resistências e encorajar a entrada de novos agentes especialmente aqueles que possibilitam os maiores ganhos de qualidade de fornecimento de energia à rede. A partir de um conjunto restrição e das condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) é possível processar os pontos de equilíbrios de Nash (EN) e de eficiência de Pareto (EP). Um EN normalizado exclusivo pode ser obtido quando o jogo é jogado em um ambiente convexo com funções diagonalmente estritamente côncavas ou convexas como é o caso em questão. Acerca do modelo micro, uma MR híbrida com recursos energético solar, biomassa, biogás, hídrico, gerador a diesel e bateria é estudada com finalidade de reduzir o custo de implementação e operação da MR exportadora durante o período de pico de demanda. O despacho econômico é modelado via replicador dinâmico (RD) considerando um jogo cooperativo. Um estudo de caso para uma região agroindustrial de Goiás auxilia a demonstrar a eficiência da técnica proposta associada a uma nova função *fitness*, além do aspecto lucrativo do investimento.

Palavras-chave: despacho econômico; equilíbrio de Nash e eficiência de Pareto; fontes renováveis; função *fitness*; jogo; mercado local; microrredes; replicador dinâmico

Abstract

Microgrids (MRs) have intelligence and flexibility that provide the integration of renewable sources into their configuration. The complementary technical aspect between the different renewable sources and the storage schemes associated with a flexibility of energy contracts allows the existence of a local market involving MRs. This work aims to study two models of competition of MRs: macro and micro. The macro model deals with market competition between local MRs and the micro model, the competition between different generation sources. The virtual association of remotely installed MRs applied to a competition platform seeks to confer justice for these agents in a macro market model competing with more centralized MRs in the network. By remunerating everyone involved, the model aims to reduce resistance and encourage the entry of new agents, especially those that enable the greatest gains in the quality of energy supply to the grid. From a constraint set and Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions, it is possible to process the Nash equilibrium (EN) and Pareto efficiency (EP) points. A unique normalized EN can be obtained when the game is played in a convex environment with diagonally strictly concave or convex functions as the case in question. About the micro model, a hybrid MR with solar energy resources, biomass, biogas, water, diesel generator and battery is studied in order to reduce the cost of implementation and operation of the exporting MR during the period of peak demand. The economic dispatch is modeled via dynamic replicator (RD) considering a cooperative game. A case study for an agro-industrial region of Goiás helps to demonstrate the efficiency of the proposed technique associated with a new fitness function, in addition to the profitable aspect of the investment.

Keywords: economic dispatch; Nash equilibrium and Pareto efficiency; renewable sources; fitness function; game; local market; microgrids; dynamic replicator

Lista de ilustrações

Figura 1 – Dilema dos prisioneiros - modo sequencial	40
Figura 2 – Solução do modelo de Cournot para duas firmas	41
Figura 3 – Topologia de mercado para microrredes exportadoras	44
Figura 4 – Arquitetura SMA para MR híbrida	45
Figura 5 – Curva de operação da MR em função da perda elétrica	53
Figura 6 – Cônica e preferências na caixa de Edgeworth	54
Figura 7 – Modo 1 de configuração do jogo	55
Figura 8 – Modo 2 de configuração do jogo	55
Figura 9 – Conexão do sistema de geração híbrida	65
Figura 10 – Radiação solar horária	72
Figura 11 – Perfil horário de demanda	73
Figura 12 – Rede 13 barras IEEE adaptada	77
Figura 13 – Caixa de Edgeworth de variáveis elétricas para a rede 13 barras modificada	78
Figura 14 – Curvas de contrato de variáveis elétricas	79
Figura 15 – Curva de eficiência de Pareto para MRs, consumidores e concessionária	80
Figura 16 – Desenvolvimento do método e ganho de utilidade dos participantes	81
Figura 17 – Curvas do TNPC	84
Figura 18 – Curvas do COE	85
Figura 19 – TNPC e COE para o caso II com mais restrição de fonte	85
Figura 20 – Despacho - caso V - estações úmida (acima) e seca (abaixo)	87
Figura 21 – Estabilização do despacho - 14h a 15h estação úmida - caso V	88
Figura 22 – Perfis de carga de despejo - caso V - úmido (direita)/seco (esquerda)	88
Figura 23 – Participação percentual do despacho total por fonte - caso V	89
Figura 24 – Comparação entre técnicas - caso V	89
Figura 25 – Diagrama de viabilidade econômica	90
Figura 26 – Diagrama aranha de sensibilidade	92
Figura 27 – Distribuição de parâmetros de projeto e custo para o caso V	92

Lista de tabelas

Tabela 1 – Forma normal do jogo cara ou coroa	38
Tabela 2 – Forma normal do dilema dos prisioneiros	40
Tabela 3 – Informações técnicas e econômicas de fontes da MR híbrida	72
Tabela 4 – Carga e distância da barra 675	78
Tabela 5 – Exemplos de pontos eficientes exclusivos de Nash e Pareto	82
Tabela 6 – Número máximo de instalações	83
Tabela 7 – Custos das MRs híbridas	86
Tabela 8 – Parâmetros de projeto	86

Lista de abreviaturas e siglas

ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
DPP	período de <i>payback</i> descontado
DG	Gerador Diesel
EN	Equilíbrio de Nash
EP	Equilíbrio de Pareto
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GD	Geração Distribuída
KKT	Condições de Karush-Kuhn-Tucker
MUH	Micro Usina Hídrica
MR	Microrrede
OSD	Operador do Sistema de Distribuição
PLD	preço de liquidação das diferenças
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	Fonte solar fotovoltaica
RED	Recurso Energético Distribuído
RD	replicador dinâmico
SMA	Sistema Multi-Agente
TIR	taxa interna de retorno

Lista de símbolos

$Amp_{a,b}$	ampacidade elétrica do condutor entre as barras a e b
Am	área total de painéis solares
α	variável binária
COE	custo nivelado de energia
CV_{bm}	valor calorífico do resíduo de biomassa
CV_{bg}	valor calorífico do resíduo de biogás
Cp_i	custo presente anualizado de i
Cp_{inv}	custo presente anualizado do inversor
C_i^k	custo de capital da fonte i
C_i^{rep}	custo de reposição da fonte i
$C_i^{O\&M}$	custo de operação e manutenção da fonte i
C_i^{slg}	valor residual da fonte i
CRF	fator de recuperação de capital
ΔV	relação da variância da água entre reservatórios
E_{bat}	energia de cada bateria
E_{bat}^{min}	energia mínima em cada bateria
E_{bat}^{max}	energia máxima em cada bateria
ΔV	variação de água entre reservatórios
DOD	profundidade de descarga da bateria
G	número de MRs associadas
H	altura da barragem
$I_{a,b}$	corrente elétrica da barra a para a barra b
M	número real de grande valor absoluto

M_{pv}	radiação solar
M_{bm}	massa de resíduos de biomassa
M_{bg}	massa de resíduos de biogás
N_i^{max}	número máximo de equipamentos de i
N_i	número de instalações de i
N_{inv}	número de inversores
n_{ger}	número de diferentes fontes de geração
n_i	vida útil do equipamento
\bar{n}	tempo de vida do projeto
$P_{loss_{a,b}}$	perda verificada entre as barras a e b
P_{loss}^{min}	perda mínima com MRs operando
$P_{loss \setminus i, -i}$	perda sem a operação das MRs
P_{pv}	potência de saída da unidade PV
P_{bm}	potência de saída da unidade de biomassa
P_{bg}	potência de saída da unidade de biogás
P_{muh}	potência de saída da unidade de MUH
P_{die}	potência de saída da unidade de geração a diesel
$P_d(t)$	potência da bateria descarregada
$P_c(t)$	potência da bateria carregada
P_{bat}	potência fornecida pelo banco de bateria
p_i	potência despachada por i
P_d	demanda de carga
$P_i^{max}(t)$	potência máxima despachada por i
P_i	potência disponível pelo equipamento i
p_e	penalidade monetária
$Q(t)$	fluxo de água da turbina

Q_{rio}	volume de água de entrada no rio
η_{pv}	eficiência do painel solar
η_{inv}	eficiência do inversor
η_{bm}	eficiência da estrutura de biomassa
η_{bg}	eficiência da estrutura de biogás
η_{muh}	eficiência da estrutura MUH
η_{die}	eficiência do gerador diesel
η_d	eficiência de descarga
η_c	eficiência de carregamento
$TNPC$	custo presente líquido total
Rp_{pv}	potência nominal unitária da unidade solar fotovoltaica
Rp_{bm}	potência nominal unitária da unidade de biomassa
Rp_{bg}	potência nominal unitária da unidade de biogás
Rp_{muh}	potência nominal unitária da unidade de MUH
r	taxa de juros
SOC	estado de carga da bateria
SOC^{min}	carga mínima do banco de bateria
SOC^{max}	carga máxima do banco de bateria
T	tempo de operação da MR
U_i	utilidade das MRs associadas
U_{-i}	utilidade da MR grande
V_a	tensão elétrica na barra a
(V_a^{min})	tensão mínima na barra a
(V_a^{max})	tensão máxima na barra a
V	quantidade de água no reservatório
V'	quantidade de água no reservatório na hora anterior

x_i	potência injetada pelas MRs associadas
x_{-i}	potência injetada pela MR grande
y_{-i}	redução da perda elétrica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Desenvolvimento do trabalho	35
2	TEORIA DOS JOGOS	37
2.1	Conceitos e exemplos de jogos	37
3	MODELO MACRO	43
3.1	Revisão da literatura	43
3.1.1	Microrrede (MR)	43
3.1.2	Sistemas Multi-Agente (SMA)	44
3.1.3	Teoria dos Jogos em abordagens de comercialização de energia	46
3.2	Existência do EN para o jogo contínuo sob condições especiais	49
3.3	O Modelo	50
3.3.1	Caracterização do problema	50
3.3.2	Ferramenta Gráfica	53
3.4	Obtendo o EN	56
3.4.1	Abordagem Analítica	56
3.4.2	Singularidade do EN	59
4	MODELO MICRO	61
4.1	Revisão da literatura	61
4.2	Metodologia	64
4.2.1	Conexão e estrutura de controle	64
4.2.2	Modelagem de Fontes	65
4.2.2.1	Sistema de geração solar fotovoltaica (PV)	65
4.2.2.2	Planta de biomassa	66
4.2.2.3	Planta de biogás	66
4.2.2.4	Micro Usina Hídrica (MUH)	67
4.2.2.5	Gerador Diesel (DG)	67
4.2.2.6	Banco de baterias	67
4.3	Formulação do Problema	68
4.3.1	Modelo de Otimização	68
4.3.2	Modelagem de Custos	70
4.4	Metodologia	71
4.4.1	Descrição de dados	71
4.4.2	Proposta da teoria evolucionária de jogos	73

4.4.3	Algoritmo	74
5	ESTUDOS DE CASO	77
5.1	Caso Macro	77
5.1.1	Resultados e Discussão	77
5.2	Caso Micro	82
5.2.1	Qualificação da localização e propostas de projeto	82
5.2.2	Resultados e Discussão	84
5.2.2.1	Análise de viabilidade	90
5.2.2.2	Análise de sensibilidade/incerteza	91
6	CONCLUSÃO	93
7	APÊNDICE	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

A reestruturação do setor elétrico brasileiro iniciada nos anos 90 promoveu uma desverticalização do setor entre as empresas de geração, transmissão, distribuição e comercialização. Os setores de geração e comercialização passaram a operar sob competição, enquanto a transmissão e a distribuição, que dispõem de mecanismos de regulação tarifária são concessões do poder público e operam em regime econômico de monopólio. Não obstante, resultado da fragmentação vertical do setor elétrico, a distribuição obteve especial atenção de pesquisadores e profissionais do setor elétrico em busca de soluções cada vez mais assertivas para os problemas das empresas que atuam nessa esfera.

O crescimento do consumo de energia, a urbanização, a reestruturação do setor elétrico que desmembrou a cadeia produtiva de energia, a perda de economias de escala ¹ pelas gerações centralizadas (LASSETER; PAIGI, 2004), a busca por eficiência energética e sustentabilidade ambiental resultam em oportunidades para os consumidores participarem mais ativamente da rede elétrica por meio de gerenciamento e resposta à demanda, produção de energia e serviços ancilares com base em recursos energéticos distribuídos (REDs). Esses recursos são fontes complementares, despacháveis ou não, que além de atenderem a demanda de potência podem trazer benefícios para a rede, em geral, relacionados à melhoria dos índices de qualidade.

Os REDs participam do mercado de energia diretamente ou por meio de intermediários, individualmente ou por agregação na forma de microrredes (MRs). MRs são subsistemas integrados pertencentes a uma área comum podendo ser compostos por fontes renováveis, geração convencional, recursos de armazenamento e cargas (LASSETER; PAIGI, 2004; MENG et al., 2016). As MRs podem operar conectadas à rede ou de modo isolado. As MRs podem ou não ser autosuficientes para atender sua carga própria e, em sendo superavitárias, podem ainda disponibilizar o excedente para a rede e, neste caso, atuarem como produtor independente (DOU et al., 2019). Desse modo, as MRs podem ser contratadas para o fornecimento de energia para o suprimento de cargas e/ou serviços auxiliares como o incremento da qualidade de tensão e de frequência e o provimento de *backup*.

A demanda por soluções ambientalmente corretas e a "gratuidade" da maioria dos recursos renováveis são razões para o incremento destes à matriz energética no mundo. Há ainda fatores como a redução de custos de geração e de armazenamento que somam-se aos anteriores para intensificar a participação de consumidores como produtores de energia.

Configurações dotadas de mais de um tipo de fonte são ditas unidades híbridas de geração de energia. Em geral, os sistemas híbridos compostos por recursos renováveis aproveitam a complementaridade de fontes e, dessa forma, podem contribuir para a regularidade do forne-

¹ condição da firma que reduz o custo médio quando há aumento da planta produtiva.

cimento do sistema durante sua operação (Street et al., 2011). No Brasil há alguns exemplos de complementaridade de fontes renováveis, e. g., a colheita no setor sucroalcooleiro coincide com o período seco, portanto, é possível um encaixe de períodos de geração para as usinas de biomassa e fonte hídrica (Street et al., 2011). A maioria desses sistemas opta por um sistema de armazenamento para garantir o funcionamento estável e a estratégia de *backup* para a geração (KUANG et al., 2016). Outras configurações consideram a geração convencional como as fontes: térmica, gás, diesel e carvão como reserva. De fato, a hibridização tem a capacidade de contornar o risco de perda de confiabilidade inerente a fontes de natureza estocástica como a solar e eólica (SINGH, 2016). Estas fontes, associadas a estruturas de armazenamento, admitem estratégias de despacho (Zhang et al., 2018; Katiraei et al., 2008) e, inclusive, a exportação de energia para a rede combinada com planejamento de longo prazo (JAYAWARDENA et al., 2015).

Alguns casos de hibridização podem ser citados: associações do tipo solar fotovoltaica (PV), gerador diesel (DG) e baterias em Tazvinga, Zhu e Xia (2015), eólico, PV, hídrica e baterias em Chen et al. (2014), eólica, PV e bateria realizada por Elkazaz, Sumner e Thomas (2020) dentre outras elencadas em Baseer, Alqahtani e Rehman (2019) resumem recentes práticas de sistemas híbridos de energia como opções de atendimento à demanda de modo continuado, satisfação das restrições do sistema e sustentabilidade ambiental. Acerca da configuração da MR, o modo híbrido oferece uma melhor performance econômica que o modo individual, e.g., diesel (SM LIN XN; A, 2015) ou PV e eólico (DAWOUD; LIN; OKBA, 2018).

A agregação de diversos produtores individuais para trabalharem conjuntamente auxilia na redução de uma barreira de entrada que são os custos envolvidos para o surgimento do empreendimento. Neste sentido, uma das formas de concepção da MR é a agregação de prosumidores, i.e., consumidores e produtores ao mesmo tempo (MARTIN-MARTÍNEZ; SÁNCHEZ-MIRALLES; RIVIER, 2016). Estes consumidores que deixam de serem atendidos pela concessionária e compõem uma MR, são, em geral, robustos e constituídos principalmente por grandes clientes (HANNA et al., 2017).

O compromisso dos governos de implantar a mudança de padrão de geração de energia para os sistemas híbridos é um fenômeno irreversível (ROQUES; FINON, 2017). Para alcançar a urbanização ecológica,² os sistemas de energia devem superar os desafios do lado da demanda e da oferta. Do lado da oferta a geração deve priorizar fontes renováveis e do lado da demanda o uso planejado e eficiente de energia é essencial. Espera-se que novas políticas estabeleçam metas ambiciosas como a diretiva da comunidade europeia 2009/72/EC que estabeleceu como objetivo geral obrigatório uma meta de 20% de energia proveniente de fontes renováveis para o consumo final bruto da comunidade até o final do ano de 2020 (EU, 2009; TSAOUSOGLU; MAKRIS; VARVARIGOS, 2017). Em 2019, o consumo bruto da União Europeia atingiu 19,7% proveniente de fontes renováveis e em 2020 a comunidade superou a meta

² patamar em que as cidades tornam-se menos dependentes de recursos de energia fóssil.

em 1,3% (EEA, 2021).

As MRs quando construídas em grande escala podem atender vários consumidores em caso de indisponibilidade de longo prazo da rede principal e aliviar o congestionamento do alimentador durante o pico de carga (WU; ORTMEYER; LI, 2016; MUKHERJEE et al., 2017). Meena, Yang e Zacharis (2019) diferenciam a MR de maior escala da MR convencional devido sua capacidade de replicação em toda a área da comunidade como sistemas de distribuição, essa MR também chamada de comunitária possui em geral alta penetração de energias renováveis locais e a presença de várias partes interessadas.

As MRs, ao participarem do mercado de energia, podem firmar contratos de serviços ancilares operando em diferentes modalidades do mercado: dia seguinte, intradiário, balanceamento e alívio de congestionamento (VERGADOS et al., 2016; TSAOUSOGLU; MAKRIS; VARVARIGOS, 2017). Além do uso intenso de recursos renováveis, as possibilidades crescentes de geração de receita no mercado local estimulam projetos de MRs híbridas em maior escala (MEENA; YANG; ZACHARIS, 2019). Do ponto de vista econômico, Perkins (2018) identifica estas MRs como mais viáveis e apresentando aumento a cadeia de valor da bioenergia devido, respectivamente, aos custos decrescentes do uso da energia solar e do uso da biomassa quando ambos são usados em grande escala.

MRs com autonomia própria e política de exploração de excedentes de energia deverão ser mais frequentes em um mercado cada vez mais descentralizado, pois será atraente remunerar mais rápido o investimento e obter lucros. A disseminação dessas redes e sua atuação como varejistas deverão colaborar com o abastecimento local e a competição no mercado na medida em que concorram entre si.

Do ponto de vista econômico, Hanna et al. (2017) verificou serem vantajosas as mudanças do serviço puro de distribuição (concessionárias) para o sistema diversificado (concessionárias e microrredes).

A viabilidade econômica dos empreendimentos em diversos casos está relacionada ao apoio regulatório de governos (HANNA et al., 2017), não necessariamente financeiro, haja vista a paridade de preço entre a energia solar fotovoltaica gerada e a negociada com um gerador centralizado. Um exemplo de viabilidade é o mercado desregulamentado europeu, onde os custos de construção e operação de sistemas de geração ao longo da rede são cobertos por tarifas de contrato que remuneram o volume de energia fornecido e a capacidade do empreendimento (GONZÁLEZ-ROMERA et al., 2019).

Embora os melhores preços sejam para o mercado à vista (curto prazo) os avanços regulatórios prenunciam cada vez mais a entrada das MRs ao mercado a termo.³ Conectados à rede, o agregado de prosumidores administra os recursos energéticos conforme o preço ou acordo firmado com a rede principal (KONG et al., 2019), desse modo, a remuneração dos agentes

³ espécie de mercado futuro.

com base em contratos bilaterais permite a existência de preços favoráveis à remuneração do investimento.

Do ponto de vista do investidor, a razão viável de existência da MR é atender sua carga própria a um custo menor que o da concessionária. Então, pergunta-se: Por que não oferecer o serviço a outros consumidores e, assim, maximizar os benefícios de todos? A próxima geração de mercado de varejo de eletricidade oferecerá novas oportunidades de negócio aos prosumidores e possibilidades de novos equilíbrios de transação de energia localizados (CHEN et al., 2018). Embora a disseminação de prosumidores pudesse criar um ambiente competitivo no setor, há evidências de poder de mercado: condição a qual alguns agentes conseguem influenciar em parâmetros do mercado como preço, oferta do setor, *share*, entre outros, resultando em redução do bem-estar econômico no segmento (PEREZ; SAUMA; HOBBS, 2016), fatores como o alto investimento e a localização remota de MRs na rede são sugestivos de desigualdade na competição. Observa-se que geradores mais distantes da subestação, portanto mais remotos, têm maior importância operacional do que os mais próximos, porque os primeiros podem melhorar os índices de qualidade da rede em porções menos atraentes para a concessionária investir. Contudo, a geração distribuída (GD) em porção mais remotas da rede sugere um menor número de consumidores vizinhos para serem atendidos porque a GD está mais distante das maiores cargas, logo, menor *share* de mercado que GDs centralmente localizadas na rede que possuem potencialidade de clientes em diversos ramais diretamente conectados.

Atualmente, fatores regulatórios e políticos são preponderantes aos fatores tecnológicos para a implantação de MRs (BURGER; LUKE, 2017). As novas políticas de segurança energética têm dois princípios: coordenação de curto prazo com base no despacho econômico interno e o planejamento de longo prazo por investidores e entidades reguladas (ROQUES; FINON, 2017).

Em um mercado oligopolizado, os produtores podem entrar em acordos implícitos para aumentar os preços da energia fornecida, caso contrário, eles podem se comportar estrategicamente e maximizar seus lucros em um ambiente não cooperativo (Kazempour; Zareipour, 2014). Para este último, a teoria dos jogos é uma das técnicas que pode ser indicada para modelar e estudar o problema.

Os primeiros trabalhos em teoria dos jogos surgem com as publicações de Neumann e Morgenstern (1944) que se dedicaram ao conflito entre dois jogadores no chamado jogo de soma zero que possui aplicação em conflitos estritamente competitivos, posteriormente Nash (1950) generalizou o trabalho para mais jogadores e distinguiu jogos em cooperativos e não cooperativos, obtendo as previsões de comportamento dos agentes para estas abordagens, que passou a ser conhecido com equilíbrio de Nash (EN) e transformou radicalmente a ciência de solução de conflitos. Há que se ressaltar, adicionalmente, que embora Nash (1951) tenha provado que todo jogo possui equilíbrio misto, esta garantia de existência não é verdadeira para a situação pura, na qual os jogadores praticam determinada estratégia com probabilidade igual

a um. Há exemplos desse tipo em jogos que apresentam unicamente estratégias discretas como o jogo *rock-paper-scissors* (Daskalakis; Goldberg; Papadimitriou, 2006).

Em consequência de sua aplicabilidade e relevância, pois o EN é um resultado individual e coletivamente satisfatório, determinadas características da abordagem podem embaraçar profundamente a obtenção do equilíbrio.

O tempo de convergência de um algoritmo para solução de equilíbrio em jogos, em tese, varia conforme o número de agentes envolvidos, a quantidade de opções de decisão, o tipo do jogo, a não linearidade da função de recompensa, o ambiente de decisão que envolve as regras e a estratégia de resolução do conflito, dentre outros fatores (Abbott; Kane; Valiant, 2005). Daskalakis, Goldberg e Papadimitriou (2006) mostram a dificuldade computacional para obter o EN. Essa dificuldade para várias abordagens enseja buscas por soluções aproximadas.

Sob a perspectiva macro, o presente trabalho propõe um modelo de compartilhamento de mercado local de energia entre MRs, de modo que, as mais remotamente instaladas são associadas virtualmente com o objetivo de oferecer justiça ao ambiente concorrencial à medida que são formadas por geradores de maior importância para a rede sob o aspecto da qualidade da energia fornecida. Essas MRs remotas competem com outras localizadas em porções mais centrais na rede. O modelo visa ainda remunerar, além de prosumidores, concessionárias e consumidores.

Inserida no mercado, a MR gerencia sua política energética baseada no preço ou em acordos com a rede principal (KONG et al., 2019). Admitindo a remuneração da potência entregue pela MR baseada em contratos bilaterais com preços conjuntamente pactuados, portanto em condições de remuneração favoráveis aos empreendedores, um modelo macro é proposto através de um jogo gráfico visando a competição entre MRs. O modelo gráfico apoia-se à caixa de Edgeworth, criada por Francis Y. Edgeworth em 1881 e através das condições de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) o jogo é resolvido (EDGEWORTH, 1881). A associação virtual entre MRs menos localmente favorecidas na rede é uma proposta de reparação de competição de mercado em virtude da importância operacional para a rede dessas MRs. Estas MRs associadas competem com outras posicionadas em porções mais centralizada da rede em relação às primeiras. O método é uma ferramenta de decisão de nível que a partir das características de concavidade e convexidade das curvas de potência fornecem o EN e a eficiência de Pareto (EP) em tempo polinomial, i.e., tem execução eficiente. O jogo também satisfaz condições de singularidade de equilíbrio em estratégias puras como a proposta por Rosen (1965).

Sob a perspectiva micro, o presente trabalho busca avaliar, sob atendimento a critérios técnicos, os aspectos econômicos de uma MR híbrida considerando-a exportadora no período de pico da carga da rede. Os critérios técnicos correspondem aos limites elétricos de geração na rede, as características das fontes e os aspectos físicos inerentes à capacidade de geração de energia disponibilizados pelos proprietários de terras. Os aspectos econômicos são a redução do custo de instalação e operação do empreendimento. O planejamento interno da MR híbrida é

estruturado com base na teoria evolutiva de jogos. Uma nova função associada a uma técnica de replicação dinâmica orienta o despacho das fontes de energia cuja finalidade é obter a solução estável para o menor custo de implementação e operação da MR híbrida.

Considerando o Brasil um país com uma grande extensão de terras cultiváveis, uma forte indústria agropecuária e ainda um grande potencial hidráulico através de rios, córregos e demais cursos d'água, o presente trabalho escolhe uma região que contempla tais características. Isto permite a combinação de fontes solar, hidráulica, fóssil e armazenamento. Assim, seleciona-se um estudo de caso localizado na cidade de Rio Verde, no sudoeste do estado de Goiás.

São analisadas cinco configurações de MR híbrida envolvendo os recursos solar fotovoltaico, biomassa, biogás, fonte hídrica, gerador diesel e banco de baterias, cuja finalidade é identificar a combinação mais vantajosa sob o ponto de vista financeiro.

Uma análise econômica avalia o tempo de retorno do investimento e a taxa de remuneração verificando a viabilidade da MR híbrida. Comparativamente a outras funções de alocação do despacho das fontes associadas a replicação dinâmica e outra técnica evolutiva bastante utilizada na literatura, a função proposta, que relaciona produtividade e custo marginal de cada fonte, apresenta resultados econômicos mais vantajosos. Uma análise de sensibilidade mostra que investir em eficiência de sistemas de geração e vida útil de equipamentos reduzem consideravelmente o custo do projeto em termos absolutos. Quando avaliadas variações a taxa concorrente ao projeto, verifica-se que o aumento destas não deve postergar a opção pela escolha do investimento em MRs híbridas.

A principal motivação do trabalho é desenvolver um modelo empregando a teoria de jogos para fornecer soluções justas e eficientes para o ambiente competitivo, interno e externo às MRs. Para o caso macro é possível visualizar a localização dos ENs com base na curva de operação das MRs. A análise apresentada mostra resultados mais justos para a divisão de mercado para as MRs menores. Com relação ao caso micro, avalia-se economicamente a combinação de fontes disponíveis para obter o tamanho ótimo da MR atendendo a demanda proposta. Uma nova função de alocação do despacho avaliada dinamicamente demonstra eficiência superior a outras abordagens. Além destes, outros objetivos são relacionados:

- Fornecer ferramentas para análise do investimento em geração distribuída, especialmente fontes renováveis à medida que as MRs sejam autônomas e possam participar intensivamente do mercado.
- Permitir a avaliação da competição do setor incentivando a entrada de MRs remotamente instaladas à rede em oportunidades de negócios no setor.
- Promover ferramentas de ambiente mercadológico justo à medida que se associa virtualmente MRs menores garantindo um cenário mais democrático de emergência de novos agentes geradores.

- Possibilitar a priorização do mercado local de energia, garantir a redução de perdas elétricas e remunerar a todos os envolvidos.
- Desenvolver uma plataforma gráfica que permita visualizar os EN e Pareto eficiente pontos para um modelo de competição de MRs.
- Avaliar a combinação híbrida de recursos energéticos disponíveis mais viáveis do ponto de vista econômico.
- Quantificar a viabilidade do investimento no projeto da MR híbrida.
- Realizar a análise de sensibilidade dos principais fatores de impacto no custo da MR híbrida.

1.1 Desenvolvimento do trabalho

Essa tese está organizada do seguinte modo:

Capítulo 2: Teoria dos jogos

Neste capítulo são abordados conceitos de teoria dos jogos tais como classificação de jogos, estratégias, modos de representação e exemplos de jogos conhecidos.

Capítulo 3: Modelo Macro

Este capítulo além de uma revisão bibliográfica acerca da teoria de jogos aplicadas a conflitos envolvendo MRs, modela e elenca as condições do jogo gráfico proposto, é ainda apresentada a ferramenta matemática de solução para o caso da MR autossuficiente. O capítulo também explicita a proposta de unicidade para a solução de equilíbrio desejada.

Capítulo 4: Modelo Micro

O capítulo 4 relaciona técnicas e abordagens para solução do problema de despacho econômico para diversas combinações de fontes de MRs híbridas. Aqui, são apresentados a estrutura dos custos de implantação do projeto, o algoritmo e a função de ajuste do despacho proposta.

Capítulo 5: Estudos de Caso

Aqui, uma rede do IEEE por ser conhecida e bastante experimentadas é utilizada para teste abordando o modelo macro. Para o modelo micro, uma MR de grande escala é avaliada para a função exportadora no período de pico de carga. Os casos de hibridização propostos são avaliados economicamente, bem como a viabilidade do empreendimento adicionalmente uma análise de sensibilidade e incerteza demonstram aspectos favoráveis a concepção da MR híbrida.

Capítulo 6: Conclusão

Esta etapa final do trabalho é reservada a sintetizar as principais observações das simulações relacionadas aos objetivos do trabalho e as questões levantadas contextualizando-as à revisão bibliográfica do tema.

2 Teoria dos jogos

A Seção 2.1 trata dos conceitos mais relevantes e necessários para o entendimento da teoria dos jogos. Adicionalmente, exemplos de jogos conhecidos ilustram o processo de obtenção do resultado de um jogo.

2.1 Conceitos e exemplos de jogos

A teoria dos jogos é uma ferramenta para a tomada de decisões considerando a interação existente entre os agentes envolvidos. É entendido como jogo a situação na qual os indivíduos realizam escolhas em que há interdependência entre eles, de modo que os protagonistas também chamados jogadores ou *players* decidem estrategicamente, i.e., considerando as respostas e características dos seus oponentes. Considera-se jogador qualquer indivíduo ou organização inserido no processo estratégico com a finalidade de decidir.

As estratégias ou ações são o conjunto de decisões possíveis que um jogador pode adotar, aquelas são ditas puras quando são escolhidas com probabilidade binária zero ou um e mistas quando são atribuídas qualquer probabilidade possível.

A teoria dos jogos baseia-se em encontrar soluções racionais para agentes envolvidos em situação de conflito. Considera-se racional o *player* que decide a fim de alcançar a maior recompensa possível. Em geral, para o processamento de um jogo admite-se que a racionalidade de todos os envolvidos é de conhecimento comum. O resultado desejado é aquele que oferece o melhor retorno estratégico para cada jogador, e este, é obtido com base em estratégias ótimas.

Os jogadores podem considerar se há ou não desdobramentos de suas decisões ao longo do jogo o que pode influenciar decisões futuras quando o jogo é repetido ou jogado sequencialmente. Um jogo simultâneo ou estático ocorre quando um jogador ignora as decisões anteriores dos outros jogadores, e.g., um jogo que é jogado apenas uma vez, haja vista que não há decisões anteriores para ser ignoradas, em contrapartida, se um jogo se desenvolve em sucessivas etapas, as decisões de alguns jogadores tornam-se conhecidas para outros quando estes decidem, e assim, esse jogo é dito sequencial. Quando os jogadores conhecem o histórico decisório de um jogo sequencial, este, é de informação perfeita, mas se esse histórico não é compartilhado com pelo menos um *player*, diz-se de informação incompleta. Em um jogo simultâneo, se os jogadores conhecem perfeitamente as recompensas de todos os outros jogadores, o jogo é dito de informação completa, caso contrário, o jogo apresenta informação não completas e são chamados de jogos Bayesianos. A premissa da informação não completa em jogos simultâneos não permite uma única modelagem na forma estratégica do jogo (como na Tabela 1), pois se os jogadores não conhecem o modo de manifestação dos oponentes, sujeitam-se a estabelecerem juízos

comumente chamados de crenças sobre seus perfis de atuação. Estes jogos envolvem informações privadas que definem o tipo do jogador, como é o caso do jogo explorado por Liu et al. (2018).

Quanto ao aspecto negocial, se os jogadores firmam acordos em relação às suas estratégias com o objetivo de repartir os benefícios, o jogo é considerado cooperativo, por outro lado, não cooperativo, quando esses acordos não são permitidos. Sob o aspecto do tamanho do conjunto de estratégias disponíveis, há os jogos finitos, quando apresentam um número identificável de estratégias e infinitos quando o espaço de escolha estratégico é contínuo. Em geral, o número de jogadores de um jogo é finito. As recompensas de um jogo também fornecem um modo de classificação: jogos de soma zero ou não. A Tabela 1 apresenta uma típica representação de um jogo de dois jogadores e duas opções de ação em forma estratégica ou normal. Trata-se de um jogo estritamente competitivo ou de soma zero: o jogo cara ou coroa (*matching pennies*).

Tabela 1 – Forma normal do jogo cara ou coroa

		player 2	
		cara	coroa
player 1	cara	(1, -1)	(-1, 1)
	coroa	(-1, 1)	(1, -1)

Um jogo de soma zero é aquele no qual a soma dos pagamentos de uma célula (resultado do jogo) é zero. Neste jogo, dois jogadores jogam, simultaneamente, cada um uma moeda, se o resultado de cada uma for o mesmo o *player 1* recebe uma unidade monetária do *player 2*, se o resultado for diferente, o *player 1* paga 1 ao *player 2*. Essa classe de jogos representam um conflito permanente e, por isso, não possuem equilíbrio em estratégias puras. Para esse tipo de jogo, Neumann e Morgenstern (1944) idealizam soluções de acordo com a estratégia *minimax-maximin* a fim de obter pontos de sela existentes na matriz do jogo considerados também pontos de equilíbrio. Esse tipo de estratégia maximiza o lucro esperado de um *player* sob a suposição de que o outro visa minimizar seu retorno, notadamente, minimizar a recompensa do oponente significa maximizar a sua. Ademais, jogos não estritamente competitivos podem apresentar soluções de Nash sob a hipótese pura.

Um jogo representado pela tripla $\langle N, X, f \rangle$, onde $N = \{1, 2, \dots, n\}$, representa o número de jogadores, sendo que cada jogador possui um conjunto de estratégias puras: $X \equiv \prod_i X_i$ with $X \subseteq \mathfrak{R}_+^2$ e $X_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$ e a função de recompensa para um jogo contínuo $f : X \rightarrow \mathfrak{R}$ onde $X_{-i} \equiv \prod_{j \in N \setminus i} X_j$ e $x_{-i} \equiv (x_j)_{j \in N \setminus i} \in X_{-i}$, tal que $f_i(x_i^k, x_{-i}^k)$ com $k = \{1, 2, \dots, m\}$ é a remuneração do jogador i empregando $x_i^k \in X_i$ contra outro jogando $x_{-i}^k \in X_{-i}$.

Devido ao espaço contínuo de definição de estratégias, assume-se que o jogo não possui estratégias dominantes, i.e., não há x_i que maximiza f_{-i} independente de x_{-i} .

Não é exagero mencionar que o mais importante conceito em teoria de jogos é a condição de equilíbrio formulada por J. Nash em 1951 (NASH, 1951), após o trabalho inicial de

Neumann e Morgenstern (1944). Em homenagem a seu idealizador, essa condição recebe o nome de equilíbrio de Nash (EN) e pode ser assim definida:

Definição 1 *A partir das decisões dos jogadores, um equilíbrio obtido é dito EN, se e somente se, o conjunto de estratégias puras $(x_i^*, x_{-i}^*) \in X_i \times X_{-i}$ satisfaz (2.1) para cada jogador i .*

$$f_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq f_i(x_i, x_{-i}^*) \quad \forall x_i \in X_i \wedge x_{-i}^* \in X_{-i} \quad (2.1)$$

Uma vez que (2.1) é satisfeita, a função de melhor resposta (BR) ou estratégia ótima do jogador i é dada por (2.2). Portanto, o EN é um par de ações escolhidas de forma que nenhum jogador ganhe um benefício ao selecionar unilateralmente uma outra estratégia. Dessa forma, o EN também pode ser definido como o ponto que satisfaz $x_i^* \in \operatorname{argmax}_{x_i^* \in X_i(x_{-i}^*)} [f_i(x_i^*, x_{-i}^*)]$. O EN possui a propriedade da auto-imposição porque os jogadores desejam usar as estratégias de Nash pela simples razão de que é ótimo fazê-lo.

$$BR_i(x_{-i}^*) = x_i^* \quad (2.2)$$

Se o jogo permite, sua solução pode ser encontrada via eliminação iterativa de estratégias estritamente dominadas. Para um jogador i , x_i^* é uma estratégia estritamente dominante a x_i^{**} , se x_i^* maximiza f_i independente de x_{-i} , matematicamente tem-se (2.3). Assim, o jogo é solucionável por dominância e a estratégia é dita racionalizável. É o caso de jogos finitos como o dilema dos prisioneiros, no qual confessar é estratégia racionalizável (BONANNO, 2018). Apesar de ser um dos métodos mais simples de solução de jogos, não pode ser empregado em todas as classes de jogos, e. g., jogos infinitos.

$$f_i(x_i^*, x_{-i}) \geq f_i(x_i^{**}, x_{-i}) \quad \forall x_{-i} \in X_{-i} \quad (2.3)$$

Claramente, nenhum EN pode envolver estratégias dominadas (NASH, 1951).

Uma alocação de EP implica que os recursos sejam distribuídos da melhor maneira possível a todos os envolvidos. Um EN nem sempre é EP, o dilema dos prisioneiros e o modelo de Cournot sem conluio são os exemplos mais conhecidos de jogos em que o EN não é necessariamente EP. O dilema dos prisioneiros é um jogo ao qual o equilíbrio não atende o princípio da otimalidade social, uma vez que não maximiza a soma das remunerações dos jogadores, o mesmo aplica-se ao modelo de Cournot citado. Para jogos cuja solução é EP não é possível uma melhoria de Pareto, ou seja, nenhum objetivo pode ser melhorado sem sacrificar um dos outros. Uma alocação (x_i^*, \bar{x}_{-i}) or (\bar{x}_i, x_{-i}^*) é EP se não há outra opção (x_i, \bar{x}_{-i}) or (\bar{x}_i, x_{-i}) tal que ocorra (2.4) com pelo menos uma das duas desigualdades estritas.

$$f_i(x_i^*, \bar{x}_{-i}) \geq f_i(x_i, \bar{x}_{-i}) \wedge f_{-i}(\bar{x}_i, x_{-i}^*) \geq f_{-i}(\bar{x}_i, x_{-i}) \quad (2.4)$$

Um dos jogos estáticos mais populares é o dilema dos prisioneiros. A narrativa do jogo assenta-se no isolamento e interrogatório de dois ladrões recém-capturados que agiam em conjunto sendo proposto para ambos o seguinte: se um ladrão confessar o crime e outro não, aquele que colaborou com a polícia será liberado enquanto o outro amargará quatro anos de reclusão. Se ambos confessarem, a cooperação individual perde valor e cada um dos ladrões terá uma pena de dois anos de reclusão. Se nenhum confessar, eles terão uma pena de um ano cada. Assim a representação estratégica do jogo é dada pela Tabela 2.

Tabela 2 – Forma normal do dilema dos prisioneiros

		<i>ladrão 2</i>	
		confessa	não confessa
<i>ladrão 1</i>	confessa	$(-2, -2)$	$(0, -4)$
	não confessa	$(-4, 0)$	$(-1, -1)$

A melhor resposta para qualquer um dos dois ladrões é confessar e o outro não confessar, portanto confessar é a estratégia que domina o jogo e guia o equilíbrio. Se agirem racionalmente, cada preso terá uma pena de dois anos. Contudo, a melhor distribuição do resultado para todos os envolvidos se faz com ambos não confessando, a qual se revela como opção não racional para um jogo não cooperativo. Este resultado é Pareto eficiente, mas não é Nash desejado. A ideia do EN é de que cada jogador adota a melhor resposta em relação a escolha dos demais.

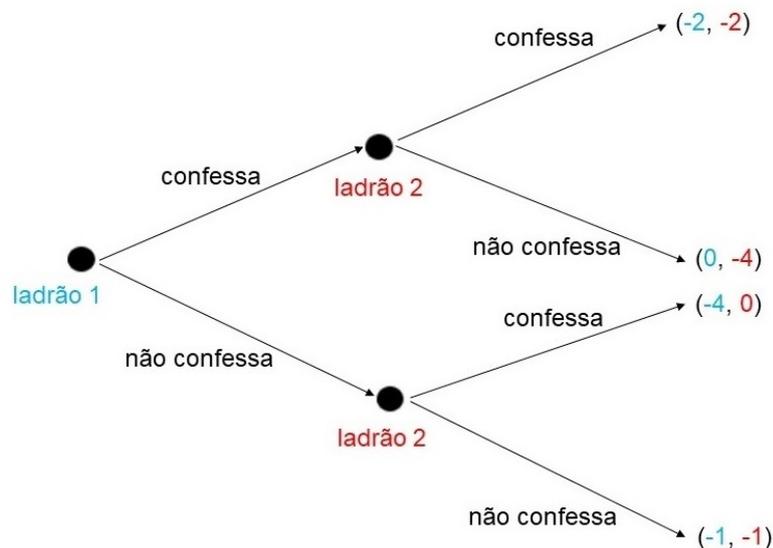


Figura 1 – Dilema dos prisioneiros - modo sequencial

Fonte: Próprio autor

Um jogo sequencial é, em geral, representado na forma estendida. Se jogado sequencialmente o dilema dos prisioneiros é dado conforme a Figura 1. Nesse modo cada nó representa uma etapa do jogo onde um jogador decide. Os ramos, representados por flechas, representam

uma escolha possível para o jogador do nó antecedente. O ladrão 1 decide primeiro e em seguida o ladrão 2. Uma vez que o ladrão almeja à liberdade decidirá por confessar, em seguida o ladrão 2 para ter a pena reduzida deverá confessar também, isso resulta no equilíbrio: $(-2, -2)$.

Jogos maiores podem ser subdivididos, tem-se subjogos, que demandam menor custo computacional de solução, contudo um subjogo é uma parte de um jogo nos quais os jogadores decidem em ordem predeterminada, tipicamente, jogos sequenciais. Esse tipo de jogo pode ser resolvido por indução reversa, cuja técnica assume que as decisões de início levam em consideração as melhores escolhas no futuro (BONANNO, 2018).

Um exemplo muito conhecido de jogo infinito é o modelo de Cournot com duas firmas decidindo simultaneamente a quantidade de produto ofertado. Admite-se que as firmas são concorrentes e operam em um mercado oligopolizado.¹ Cada firma pode obter sua função de produção com base na produção da outra. Se a firma 1 produz q_1 e a firma 2 produz q_2 tem-se as curvas de reação:² $q_1 = f(q_2)$ e $q_2 = f(q_1)$. A Figura 2 ilustra a obtenção do equilíbrio sujeito as curvas de reação. As estratégias q_1^* e q_2^* são consideradas as melhores respostas dentre o conjunto de estratégias possíveis as quais as firmas pode escolher. As estratégias q_1^* e q_2^* são consideradas Nash desejáveis, no entanto, se as firmas firmarem um acordo para produzir menos e aumentar o preço do produto alcançarão lucros maiores.

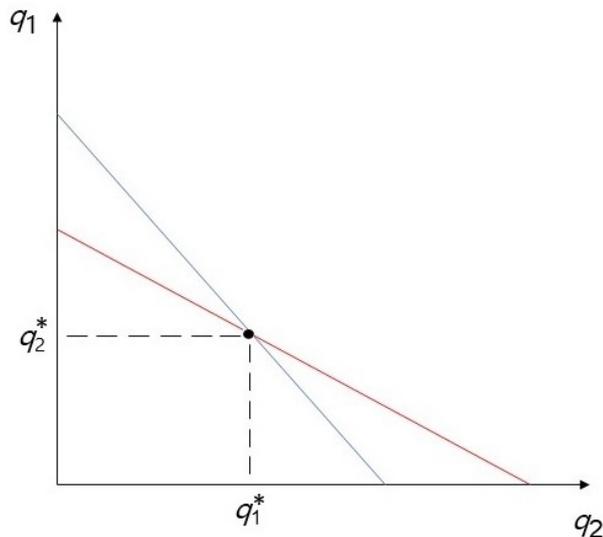


Figura 2 – Solução do modelo de Cournot para duas firmas

Fonte: Próprio autor

¹ mercado com poucos fornecedores, para o caso em questão, apenas dois.

² funções que exprimem a produção de máximo lucro de uma firma em função da produção da outra.

3 Modelo Macro

A Seção 3.1 trata da revisão de conceitos e abordagens relacionadas ao comércio de energia. A ferramenta metodológica empregada ao problema de competição no mercado de energia de MRs encontra-se descrita na Seção 3.2. As Seções 3.3 e 3.4 referem-se, respectivamente, ao formato e premissas do jogo proposto, e a técnica de solução proposta.

3.1 Revisão da literatura

As concessionárias de energia estão passando por um período de transformação em seus modelos de negócios (MIT, 2016). As MRs sucintamente descritas na Subseção 3.1.1 representam uma das novidades dessa transformação. O desenvolvimento de novas funcionalidades e a coordenação em tempo real para a formatação da MR requerem estratégias de monitoramento e execução cuja tecnologia de Sistemas Multi-Agente (SMA) descrita na Subseção 3.1.2 é responsável por implementar.

A revisão de abordagens acerca da teoria dos jogos aplicados a alocação, dimensionamento e divisão de mercado de pequenos sistemas de geração são elencados na Subseção 3.1.3.

3.1.1 Microrrede (MR)

A MR pode ser definida como um conjunto de REDs, sistemas de armazenamento, cargas e agentes coordenados que podem operar conectados ou não à rede, em baixa ou média tensão. Essas redes são especialmente formadas por agregação de prossumidores que rateam o investimento total entre diferentes proprietários. Prossumidores são agentes que trabalham associados em três configurações ao mesmo tempo: consumo, produção e armazenamento (Muzi; de Lorenzo; Consolidani, 2019). Esse tipo de rede tem a capacidade de oferecer aos consumidores qualidade de energia frequentemente sem a necessidade de novos investimentos por parte da concessionária.

A MR híbrida tem a habilidade de gerenciar dinamicamente o fluxo de potência através de protocolos específicos coordenados com sistemas de armazenamento e capacidade de integração a rede (Muzi; de Lorenzo; Consolidani, 2019) em uma abordagem que elimina a necessidade de despacho central (LASSETER; PAIGI, 2004). O controle da MR é, em geral, executado por níveis hierárquicos, os quais são responsáveis por tarefas específicas. Comumente, o nível mais inferior ou primário garante a operação estável dos diversos REDs existentes, enquanto o centro de operação da distribuição situa-se no nível mais alto de controle cuja função é a operação e ajuste da MR com a rede acompanhando os pontos de operação desejados. Neste nível ou

em outro, o gerenciamento de energia é realizado para garantir segurança e economicidade de toda a rede podendo ser centralizado ou descentralizado (LASSETER; PAIGI, 2004).

Um exemplo de planejamento de tamanho e gerenciamento de um MR conectada ou não a rede é otimizado em dois estágios em Meena, Yang e Zacharis (2019), onde os resultados mostram o potencial das modalidades de operação e a geração de benefícios técnicos e econômicos para a comunidade atendida. Em outro exemplo de aplicação orientada para o mercado, Kong et al. (2019) desenvolve um mecanismo de licitação com base em sistemas imunológicos artificiais para remunerar MR híbrida de diversos proprietários e resolver o problema do despacho.

Devido ao crescimento dos REDs, as concessionárias deverão inovar nos modelos de negócios com atividades como: suporte técnico às MRs e garantia de equilíbrio energético. É nessa perspectiva que surge a figura do operador do sistema de distribuição (OSD) que tem a função de gerenciar fluxos e compensação de energia envolvendo MR no mercado de varejo, como na Figura 3, incluindo realizar solicitações preferencialmente de fornecedores que se utilizam de recursos renováveis em seu portfólio. Diferentemente de Boloukat e Foroud (2018) em que o OSD é considerado um protagonista com poder de decisão de potência, nesta abordagem, o OSD é um árbitro dos contratos com competência de liquidação monetária e energética.

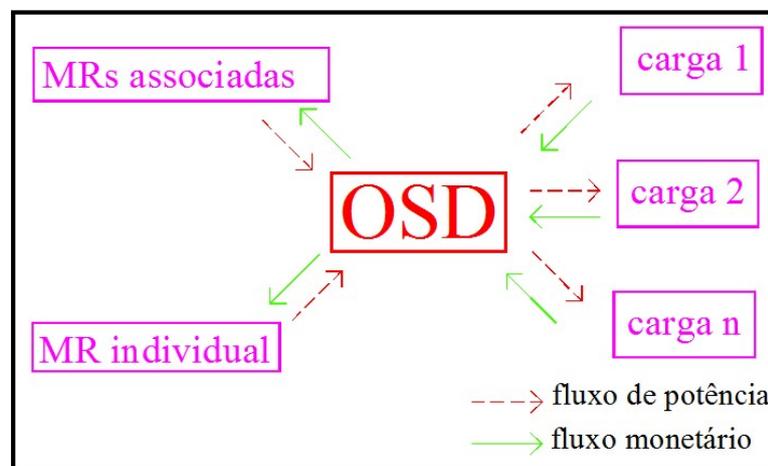


Figura 3 – Topologia de mercado para microrredes exportadoras

Fonte: Adaptado de (Boloukat; Foroud, 2018)

3.1.2 Sistemas Multi-Agente (SMA)

Garantir a confiabilidade do fornecimento de energia e os requisitos de qualidade do sistema elétrico são motivações importantes para a difusão de aglomerados de prossumidores

ao longo da rede e, estes, cada vez mais ativos e organizados em MR necessitam de estruturas de controle e gerenciamento robustas.

A MR pode ser constituída por vários REDs agregados, sistemas de armazenamento e carga que, em geral, pertencem a vários operadores e não podem ser controlados instantaneamente pelas concessionárias. Além disso, a MR precisa de controle avançado para manter o fornecimento ideal e garantir a confiabilidade. Nesse sentido, o modo de controle baseado em sistema multi-agente (SMA) torna-se eficiente para estudos relacionados às MRs. O modo de controle baseado em SMA utilizado para o gerenciamento de MRs permite a operação de sistemas híbridos renováveis integrados sem excluir fontes convencionais.

O SMA é uma tecnologia muito eficiente para a gestão das tarefas internas utilizadas em MRs relacionadas com o abastecimento de energia (KHAN et al., 2019). A estrutura SMA é uma composição de múltiplos agentes inteligentes (máquinas) que interagem entre si oferecendo robustez e flexibilidade ao sistema gerenciado. Esses agentes trabalham de forma autônoma e são empregados para fortalecer o sistema na medida em que resolvem problemas que não poderiam ser resolvidos por um único agente (LASSETER; PAIGI, 2004).

Um modelo interno macro do *design* dessa arquitetura é mostrado na Figura 4, na qual os agentes inteligentes são de modo descentralizado controlado pelo operador da MR híbrida para cada MR.

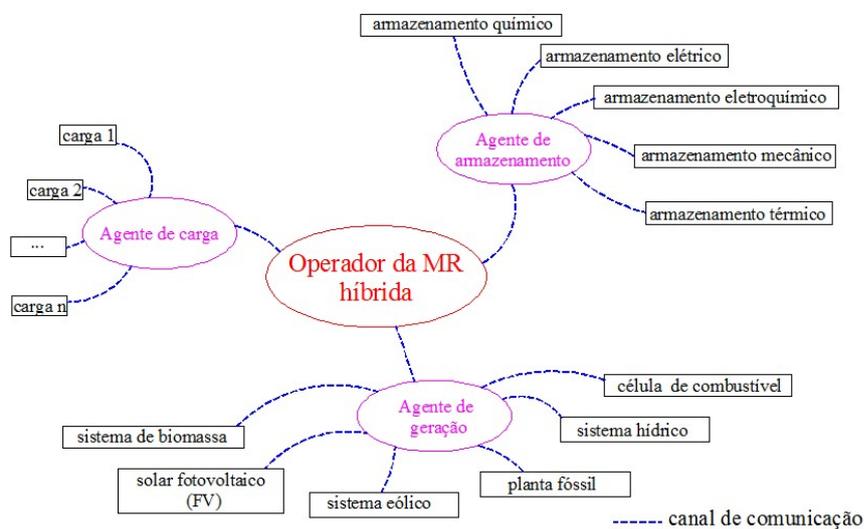


Figura 4 – Arquitetura SMA para MR híbrida

Fonte: Próprio autor

Estes agentes exibem duas características fundamentais: serem capazes de agir de forma autônoma tomando decisões para satisfazer seus objetivos e serem capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interação social inspirados nos humanos. Além destas, a

capacidade de reação instantânea às solicitações e a proatividade são características que tornam o SMA uma das tecnologias mais indicadas para controlar fontes em MRs híbridas.

3.1.3 Teoria dos Jogos em abordagens de comercialização de energia

Quando a interação entre agentes gera conflito, como é o caso das MRs comercializadas de energia que desejam maximizar suas receitas e estão limitadas por legislação, segurança ou qualquer outra arbitragem técnica, esta condição motiva esses agentes a atuarem estrategicamente. Nesse sentido, a teoria dos jogos é uma metodologia que modela esse comportamento, em que as MRs podem ser consideradas jogadores (ou seja, tomadores de decisão estratégica) e o EN é o comportamento mais desejado para todos os participantes.

A força do conceito EN impõe um impasse computacional: nem todos os jogos têm equilíbrio puro, e aqueles que têm podem dar origem a tratamentos computacionais altamente complexos. No problema PPAD, classe de complexidade computacional, Rubinstein (2016) prova que para uma constante $\varepsilon > 0$ é possível encontrar um equilíbrio aproximado para o jogo de dois jogadores no tempo: $n^{\log(1-O(1))n}$ onde n é o número de estratégias. A classe PPAD é constituída por problemas cuja solução é garantida, mas difícil de encontrar (JUSZCZUK, 2019). Prova de baixa eficiência computacional também é encontrada para o equilíbrio estático (Daskalakis; Goldberg; Papadimitriou, 2006). As adaptações de jogos com regras dinâmicas devem diminuir a dureza computacional à medida que relaxam a inflexão matemática de jogos complexos e/ou grandes (Kordonis; Papavassilopoulos, 2017). Técnicas dinâmicas também são empregadas para identificar o equilíbrio local em espaços estratégicos não convexos (Ratliff; Burden; Sastry, 2016).

A não linearidade das funções de *payoff*, o elevado número de estratégias, o número de jogadores, as restrições acopladas e o tamanho do jogo são fontes de complexidade na teoria dos jogos (Abbott; Kane; Valiant, 2005). Portanto, os métodos aproximados (Zarei; Salami, 2016; MARZBAND, 2016; JUSZCZUK, 2019) e o uso do modelo de dois níveis para reduzir o espaço de pesquisa do problema (HINCAPIE; GALLEGO; MANTOVANI, 2019; Wang; Huang, 2018; XU; ZHANG, 2020; QUASHIE et al., 2018; Cui et al., 2019; Lee et al., 2015; TANG et al., 2017) são apresentados.

Uma vez estando em EN, os agentes não possuem incentivos para se desviar, um Nash aproximado significa um baixo incentivo para tal. Para um jogo contínuo, Zarei e Salami (2016) discretizam o espaço de estratégias para minimizar o valor dos lances no mercado de energia por meio de uma reformulação da matriz de pagamentos, que com o uso de um algoritmo adequado gera equilíbrios com baixo incentivo para desviar. Embora a discretização das estratégias seja uma estratégia viável de reduzir o espaço de busca e, portanto, o tempo de processamento, há o risco de perda de alguns equilíbrios. Baseado no conceito de agregador, no qual pequenos prosumidores se reúnem e tornam-se grandes o suficiente para participar do mercado de energia, a função Nikaido-Isoda e o algoritmo de relaxamento são empregados para o mercado

varejista de energia para vender a energia excedente em [Marzband \(2016\)](#), na qual o ganho compartilhado com cada agente está incluído na metodologia de um sistema simplificado. [Juszczuk \(2019\)](#) utiliza-se de um algoritmo evolutivo para obter o ε -EN, i.e., o equilíbrio de Nash aproximado para jogos aleatórios e covariantes mostrando que a técnica evolutiva apresenta melhor competência computacional que os métodos clássicos.

Diversos jogos presentes em situações reais não podem ser analisados de acordo com a hipótese das estratégias discretas sob pena de limitar a observação e inviabilizar a obtenção do EN. O modelo de Cournot é, provavelmente, o mais discutido exemplo clássico de jogo cujas estratégias ocorrem no domínio contínuo. Neste modelo a intersecção das curvas de reação de produção das firmas oligopolistas resulta o EN desejado e, uma vez relaxada à legislação antitruste e, ocorrendo conspiração entre os agentes, obtêm-se soluções Pareto eficiente. Sob a ótica das firmas, o conluio é mais lucrativo que o modelo de Cournot, e este, melhor que a competição perfeita. Nessa perspectiva, o modelo de Stackelberg favorece a firma oligopolista que decide a produção antecipadamente em relação às demais ([JEHLE; RENY, 2011](#)). Esse tipo de otimização, também chamada otimização hierárquica, na qual um dos *players* considerado superior, autoridade ou comandante (líder) decide, para, em seguida, os demais agentes (seguidores) decidirem, é também conhecido como jogo sequencial. Esse processo de hierarquização é empregado ora por razões inerentes aos processos, ora por conveniência computacional, e ainda que a segunda opção seja consequência da primeira, se assim se fizer necessário. O seguidor apenas otimiza sua estratégia em decorrência da opção do líder, e assim reduz o espaço de busca do algoritmo ([HINCAPIE; GALLEGO; MANTOVANI, 2019](#)).

O algoritmo de busca *Tabu* é utilizado para um jogo sequencial para gerir o conflito entre as redes primária e secundária, considerando a definição da localização e o tamanho dos transformadores de distribuição como decisão inicial e, em seguida, a potência injetada por uma GD, cujo objetivo é minimizar o custo do investimento em geradores ([HINCAPIE; GALLEGO; MANTOVANI, 2019](#)). [Wang e Huang \(2018\)](#) desenvolvem como um problema sequencial a interação entre MRs autônomas. Com base na teoria de barganha de Nash o primeiro problema consiste em minimizar os custos sociais envolvidos e a repartição dos benefícios comerciais (negociação e pagamentos) são realizados em segunda análise, os autores objetivam encorajar o comércio proativo e a repartição justa dos benefícios para as MRs. A otimização do despacho entre MRs e a rede de distribuição via duas camadas de decisão é proposta por [Xu e Zhang \(2020\)](#). Em [Quashie et al. \(2018\)](#) um mercado local de energia é planejado como programação bi-nível, na qual o nível superior é ocupado pelo planejamento da MR que decide a configuração dos geradores e a potência injetada, enquanto que para o nível inferior um operador do sistema de distribuição decide sobre a reserva de capacidade.

A partir de uma matriz energética de GD e dispositivos de armazenamento, [Boloukat e Foroud \(2018\)](#) propõem a liderança de um operador externo para decidir a localização e a capacidade de potência que as MRs como seguidores devem fornecer. As condições

de KKT solucionam o problema, uma vez convertido em nível único com base na linearização das variáveis envolvidas. A transformação em um problema de nível único também é realizada por [Cui et al. \(2019\)](#) de um jogo bi-nível de compartilhamento de energia entre prossumidores de uma MR inteligente cujo objetivo é aumentar o consumo de energia proveniente de fontes renováveis e, conseqüentemente, reduzir a dependência da rede principal. Para o mesmo objetivo, uma estrutura de mercado de três níveis é proposta por [Esfahani, Hariri e Mohammed \(2019\)](#): dia seguinte, hora anterior e mercado em tempo real baseado em SMA de múltiplas MRs.

Um jogo de dois níveis é formalizado por [Lee et al. \(2015\)](#) para o comércio entre MRs, onde os líderes são vendedores independentes e decidem a quantidade de energia a ser negociada enfrentando um conflito entre a receita recebida pela venda e o armazenamento para o uso posterior. Compradores são seguidores que oferecem preços, e este parâmetro determina a proporcional alocação de energia. Um modelo SMA ocupa o nível superior em um problema de leilão de energia de dois níveis em [Dou et al. \(2019\)](#), como o mercado é tradicionalmente oligopolizado, as MRs são consideradas produtores independentes e almejam aumentar sua competitividade e obter maiores *share* de mercado. Em [Tang et al. \(2017\)](#) a competição entre múltiplos produtores ocupa o nível superior e as concessionárias como seguidoras atuam como operadoras independente do sistema em um jogo de leilão para obter os equilíbrios aproximados, contudo, o método mantém como questão aberta a unicidade do equilíbrio.

[Fleischhacker et al. \(2019\)](#) discutem um jogo de Stackelberg para energia solar considerando proprietários de GDs em nível superior em relação aos consumidores. [Esfahani, Hariri e Mohammed \(2019\)](#) utilizaram-se de otimização hierárquica para minimizar a incompatibilidade de energia entre MRs, e por teoria de jogos caracterizam o equilíbrio entre compradores e vendedores utilizando o preço como variável principal. Um modelo envolvendo vários agentes de mercado realizado por [Foruzan, Soh e Asgarpour \(2018\)](#) utilizam-se de jogos de Markov associados a um algoritmo de aprendizagem para obter a gestão de energia de equilíbrio entre fornecedores e consumidores que possuam autonomia ao decidir. [Guo et al. \(2021\)](#) obtêm o equilíbrio de Stackelberg em uma abordagem dinâmica de aprendizado de reforço, no qual o OSD toma decisões em um nível superior e as multi-MRs em nível inferior.

Um controle preditivo otimiza a programação econômica de MRs de diversos proprietários operando em modo ilha, cujo leilão bidirecional é modelado como um jogo não cooperativo visando justiça e eficiência ao modelo em [Zhao et al. \(2020\)](#). Já [Lahon, Gupta e Fernandez \(2019\)](#) propõem um modelo cooperativo entre MRs energeticamente superavitárias e deficitárias formando uma só entidade para que integradas à rede maximizem o retorno econômico da coalizão.

3.2 Existência do EN para o jogo contínuo sob condições especiais

Nash (1950) apresentou o teorema da universalidade provando a existência de pelo menos um EN para qualquer jogo finito com os agentes interagindo entre si por meio de suas recompensas. Embora esse equilíbrio possa não ser puro, este foi o padrão pelo qual todos os refinamentos posteriores foram julgados. Posteriormente, Nikaido e Isoda (1955), e.g., continuaram o trabalho de Nash e o estenderam para jogos não-cooperativos para diversos jogadores com infinitas estratégias sob um conjunto convexo.

Suponha um jogo cuja curva de estratégia seja côncava para um jogador e convexa para o outro. Vamos admitir que a curva A seja côncava para o jogador i e convexa para o jogador $-i$. Do mesmo modo a curva convexa B para i e côncava para $-i$. Para algum ponto $P_1 = (x_i, y_i)$ e $P_2 = (x_{-i}, y_{-i})$ se P_1 e $P_2 \in A \cap B$, então $P_1, P_2 \in A$, como A é convexa, $\overline{P_1 P_2} \in A$. Desde que, P_1 e $P_2 \in A \cap B$, então $P_1, P_2 \in B$, portanto, $\overline{P_1 P_2} \in B$ com B convexa. Como $\overline{P_1 P_2}$ está simultaneamente contida em A e B , então $\overline{P_1 P_2} \in A \cap B$. Portanto, $A \cap B$ é convexo. O Teorema 1 ratifica a análise elencada.

Teorema 1 (M.S.BAZARRA; SHERALI; SHETTY, 2006) *A intersecção de conjuntos convexos é um conjunto convexo.*

Com base no Colorário 1, o conjunto obtido é considerado contínuo.

Corolário 1 (ROCKAFELLAR, 1970) *Uma função convexa finita em todo \mathfrak{R}_n é necessariamente contínua.*

Admita a cônica F , resultado da intersecção de um conjunto finito de meio-espacos (A), região fechada em \mathfrak{R}^2 . Desde que (F) constitui um conjunto de estratégias contínuas $X \subseteq \mathfrak{R}_+$ cuja matriz ∇F é positivamente semidefinida para qualquer c , satisfaz (3.1) para o jogador i , o conjunto F é dito de monotonicidade forte.

$$(F(x_i^j) - F(x_i^k))^T (x_i^j - x_i^k) \geq c \|x_i^j - x_i^k\|^2 \forall x_i^j, x_i^k \in X \quad (3.1)$$

Se existem constantes c_i com $i = \{1, 2, \dots, q\}$ de tal modo que, se para $x_i \in X$, então $x_i \leq c_i$, o conjunto $X \subset \mathfrak{R}^2$ é limitado.

Para qualquer coleção $x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m \in X$ com $F : X \rightarrow \mathfrak{R}$ and $\alpha_j, j = \{1, 2, \dots, q\}$ e $\alpha_j \geq 0$ do mesmo modo $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$ se vale a desigualdade: $F(\sum_{j=1}^m \alpha_j x_i^j) \leq \sum_{j=1}^m \alpha_j F(x_i^j) - \frac{c_i}{2} \sum_{j=1}^m \alpha_j (1 - \alpha_j) \sum_{j=1}^{m-1} \|x_i^j - x_i^k\|^2$, o conjunto F é dito fortemente convexo.

Assumindo a função de recompensa $f_i(x_i, x_{-i})$ para o jogador i , se $\lim_{x_i \rightarrow x_i^*} f_i(x_i, x_{-i}) = L$ para algum $\varepsilon > 0$ há um $\delta > 0$, então para todos $x_i \in X_i$ e $0 < |x_i^* - x_i| < \delta$ tem

$|f_i(x_i, x_{-i}) - L| < \varepsilon$, então, f_i é contínuo em todo o conjunto X_i . A função $f_i(x_i, x_{-i})$ é considerado estritamente monótona se satisfaz (3.2) com $x_i^j \neq x_i^k$.

$$\sum_{i \in N} (\nabla_i f_i(x_i^j) - \nabla_i f_i(x_i^k))^T (x_i^j - x_i^k) < 0 \forall x_i^j, x_i^k \in X \quad (3.2)$$

Ao assumir x_i^* como máximo absoluto, a função $f_i(x_i, x_{-i})$ tem um gradiente estritamente monótono, pois satisfaz (3.3), o que implica uma concavidade da função de recompensa de cada jogador em sua própria estratégia.

$$\nabla(f_i(x_i^*, x_{-i}))(x_i - x_i^*) \leq 0 \forall x_i, x_{-i} \in X \quad (3.3)$$

Os Teoremas 2 e 3 garantem a existência do EN sob condições especiais.

Teorema 2 (*NASH, 1950*) *Sejam N jogadores cujo espaço estratégico é não vazio, compacto, i.e., fechado e limitado, monotônico e convexo X com função de pagamento $f_i : X \rightarrow \mathfrak{R}$ continuamente diferenciável com $X = \prod_{i \in N} X_i$ e $\forall x_{-i} \in X_{-i}, f_i(x_i, x_{-i})$ é côncava em X_i , então o jogo tem um EN.*

Teorema 3 (*Rosen, 1965*) *Um ponto de equilíbrio existe para todo jogo côncavo.*

Do mesmo modo, um F um conjunto não vazio, contínuo, compacto, convexo e quase-côncavo em x_i para o jogador i , são condições suficientes para o teorema de ponto fixo de Kakutani com x_i^* o ponto máximo de $f_i(x_i, x_{-i})$ (*Rosen, 1965*).

O Teorema 2 é também aplicável se $f_i(x_i, x_{-i})$ é convexa em X_i (*COMINETTI; FACCHINEI; LASSERRE, 2012*).

3.3 O Modelo

O desenvolvimento de novas funcionalidades do OSD e a operação inteligente da rede abre novas possibilidades de monitoramento da rede em tempo real. Isso tornou possível a gestão de variáveis de decisão como a potência despachada de GDs presente em MRs.

O problema da obtenção do EN para MRs compreende duas fases: a primeira é a preparação das curvas de operação, essenciais para a configuração do jogo e, em seguida, a resolução do mesmo. A Subseção 3.3.1 descreve a primeira fase e o algoritmo de resolução, enquanto a Subseção 3.3.2 apresenta a ferramenta gráfica para análise do jogo.

3.3.1 Caracterização do problema

Diversos problemas de integração de prosumidores podem ser solucionados a partir de métodos convencionais de otimização cujo objetivo é o consumo e o gerenciamento de energia

(CHEN et al., 2018). Em um sistema com múltiplas MRs pertencentes a diversos proprietários considera-se difícil a cooperação fora do ambiente interno de cada MR, por isso, propõe-se um modelo não-cooperativo por considerar o caráter competitivo ao qual as MRs relacionam-se entre si. Assume-se que o desejo de remunerar é estritamente crescente por parte dos prossumidores porque participam de um mercado que remunera seus investimentos de acordo com suas aspirações.

Para otimizar um modelo com mais de um objetivo, e em geral, objetivos conflitantes, os modelos multi-objetivos são indicados para encontrar soluções não dominadas.

Considerando uma combinação híbrida a fim de superar a indisponibilidade de REDs de natureza intermitente associada à motivação econômica para o despacho, propõe-se o problema de otimização multi-objetivo (3.4) para maximizar a potência injetada x_i e x_{-i} respectivamente para G MRs associadas e uma grande MR para um sistema elétrico com p nós, cujo problema satisfaz as restrições físicas e de capacidade de linhas da rede. Comparando com MRs instaladas remotamente, assume-se que a MR mais localmente centralizada é considerada a grande MR. Devido a posição privilegiada, esta MR tem acesso a um maior número de cargas, e por esse aspecto, é considerada maior em relação às demais. A abordagem analisa o instante de exportação das MRs considerando a associação virtual das G MRs remotas. O perfil de perdas para a operação de uma MR em um ramal da rede elétrica é mostrado na Figura 5, em que o modo de exportação é considerado como a parte crescente da curva localizada entre a perda mínima (P_{loss}^{min}) e o mesmo valor de perda obtido sem os agentes de injeção de potência ($P_{loss \setminus i, -i}$), área hachurada da figura.

$$\begin{aligned}
 & \underset{X}{\text{maximize}} && [x_i, x_{-i}] \\
 & \text{sujeito a} && I_{a,b} \leq Amp_{a,b}, a = \{1, 2, \dots, p\}; b = \{2, 3, \dots, p-1\} \\
 & && P_{loss}^{min} \leq \sum_{a=1}^p \sum_{b=2}^{p-1} P_{loss_{a,b}} \leq P_{loss \setminus i, -i}, \\
 & && V_a^{min} \leq V_a \leq V_a^{max}, a = \{1, 2, \dots, p\}, \\
 & && x_i = \sum_{g=1}^G x_{ig}, \\
 & && P_{loss} = \min(P_{loss}, x_i | x_{-i})
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$I_{a,b}$ é a corrente da barra a para a barra b , $Amp_{a,b}$ e $P_{loss_{a,b}}$ são respectivamente a ampacidade elétrica do condutor e a perda verificada entre os barramentos a e b . P_{loss}^{min} é a mínima perda verificada na presença das MRs, $P_{loss \setminus i, -i}$ é a perda da rede negligenciando a operação das MRs. V_a é a tensão na barra a por unidade (pu) cujo limite mínimo é (V_a^{min}) e o máximo é (V_a^{max}), x_i é a potência injetada pelas MRs associadas e x_{-i} a potência da MR grande. Para a mesma potência total injetada, a configuração de menor perda é selecionada.

O problema multiobjetivo tem solução proposta pelo Algoritmo 1 a partir da definição

da localização das MRs e seus respectivos fatores de potência. Um vetor \ddot{X} inicialmente composto da menor carga dentre as MRs analisadas, tem tamanho correspondente ao número de MRs: $G + 1$. Esta medida garante a inicialização do algoritmo nas proximidades a esquerda do ponto P_{loss}^{min} da Figura 5.

Algoritmo 1: Procedimento de solução do problema (3.4)

Entrada $X = [X_i, X_{-i}]$, $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iG}]$, $X_{-i} = [x_{-i}]$, $\ddot{X}_0 \leftarrow \ddot{X}$, $\Delta \leftarrow 50$, $Amp_{a,b}$, $a = \{1, 2, \dots, p\}$; $b = \{2, 3, \dots, p-1\}$, $V_a^{min} \leftarrow 0.93$, $V_a^{max} \leftarrow 1.05$, $p_{mg} \leftarrow 0$
 Saída: $[\ddot{X}, P'_{loss}]$

// Início

1. Rode o caso base (sem MRs) e obtenha $P_{loss \setminus i, -i}$;

2. **Enquanto** ($p_{mg} < G + 1$)

3. Rode o fluxo de potência para \ddot{X} ;

4. Obtenha P_{loss} ;

5. $(G+1) \leftarrow \ddot{X}(G+1) + \Delta$;

6. Rode o fluxo de potência para \ddot{X} ;

7. Obtenha $P'_{loss}, I_{a,b}, V_a$;

// Verificação de decrescimento da perda

8. **Se** ($P'_{loss} < P_{loss}$)

9. $P_{loss} \leftarrow P'_{loss}$;

10. retorne ao passo 5;

// Verificação das restrições de (3.4)

11. **Se** ($P_{loss} \leq P'_{loss} \leq P_{loss \setminus i, -i}$ & $I_{a,b} \leq Amp_{a,b}$ & $V_a^{min} \leq V_a \leq V_a^{max}$)

12. Obtenha $[\ddot{X}, P'_{loss}]$;

13. $P_{loss} \leftarrow P'_{loss}$;

14. retorne ao passo 5;

15. **Senão**

16. $p_{mg} \leftarrow p_{mg} + 1$;

17. $(G+1-p_{mg}) \leftarrow \ddot{X}(G+1-p_{mg}) + \Delta$;

18. **Para** ($k \leftarrow 0 : p_{mg} - 1$) faça

19. $\ddot{X}(G+1-k) \leftarrow \ddot{X}_0(G+1-k)$;

20. retorne ao passo 3;

Para o algoritmo $\sum_{a=1}^p \sum_{b=2}^{p-1} P_{loss_{a,b}}$, $a = \{1, 2, \dots, p\}$; $b = \{2, 3, \dots, p-1\}$ assume-se como P_{loss} ou P'_{loss} . O passo de geração de resultados, Δ é escolhido com base no tempo de execução do algoritmo e adequação dos resultados para posterior ajuste não linear das curvas de operação.

A subseção seguinte apresenta o modelo gráfico que requer dois bens, assim, é necessário substituir a perda pela redução da perda (y_i) para cada possível (x_i). A redução da perda pode ser obtida por (3.5). Analogamente, (y_{-i}) pode ser obtida.

$$y_i = \left(\frac{\sum_{a=1}^n \sum_{b=2}^{n-1} P_{loss_{a,b}} - P_{loss \setminus i, -i}}{P_{loss \setminus i, -i}} \mid x_{-i} \right) \quad (3.5)$$

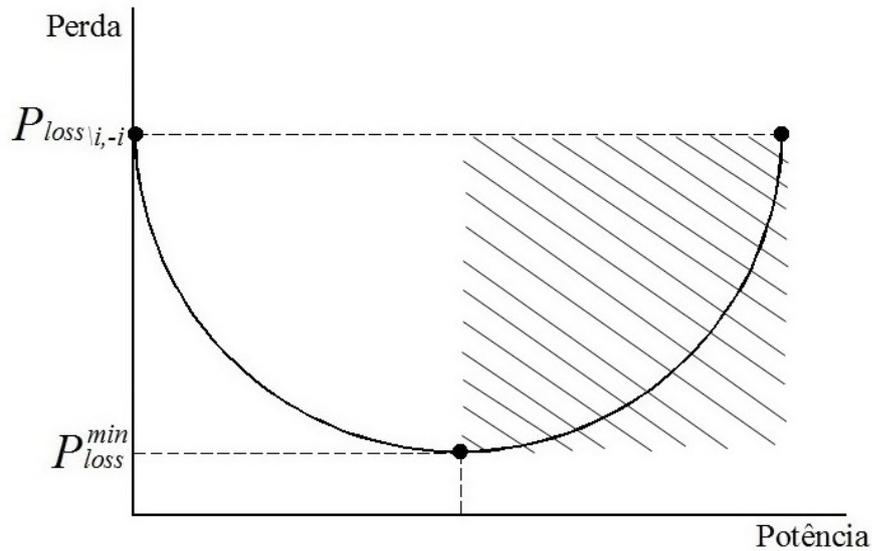


Figura 5 – Curva de operação da MR em função da perda elétrica

Fonte: Próprio autor

3.3.2 Ferramenta Gráfica

A representação da forma normal como da Tabela 1 é a mais tradicional forma de representação de jogos. Esta forma corresponde a uma matriz de recompensas multidimensional associada as possíveis estratégias dos jogadores. Para jogos discretos ou contínuos discretizados aplicados a métodos como o algoritmo de Lemke-Howson, cada célula na matriz precisa ser visitada. Cada célula contém n valores, onde n é o número de jogadores, se cada jogador tem m estratégias, o número de células a serem analisadas é $(m^n)n$ (JUSZCZUK, 2019). Notadamente, não é viável organizar na forma normal em estratégias puras jogos infinitos. Por isso, propõe-se um método clássico para encontrar a solução EN e EP, que em condições especiais não torna exponencialmente difícil a busca por soluções exatas.

A caixa de Edgeworth da Figura 6 é uma visualização gráfica que representa todas as alocações possíveis de bens (EDGEWORTH, 1881). Ao solucionar (3.4) fixando uma potência injetada de cada agente (associadas e grande MRs) curvas operacionais típicas como A e B da Figura 6 são obtidas. Para o eixo i (lado esquerdo inferior da caixa) a curva côncava A corresponde a operação das MRs associadas para uma potência constante x_{-i} . Do mesmo modo,

para o eixo $-i$ (lado direito superior da caixa) a curva côncava B corresponde a operação da MR grande para uma potência constante x_i .

No modelo, a perda é uma restrição imposta pelo planejador para atender às concessionárias e consumidores. As MRs fornecem externalidades interessantes, ou seja, benefícios que podem ser rateados a todos os participantes da rede, como suporte de tensão local, aumento da confiabilidade do sistema, segurança energética, qualidade da energia, benefícios ambientais quando compostos por recursos renováveis e redução das perdas elétricas, porém, esta, é considerada aqui como o benefício mais facilmente valorizado em termos econômicos.

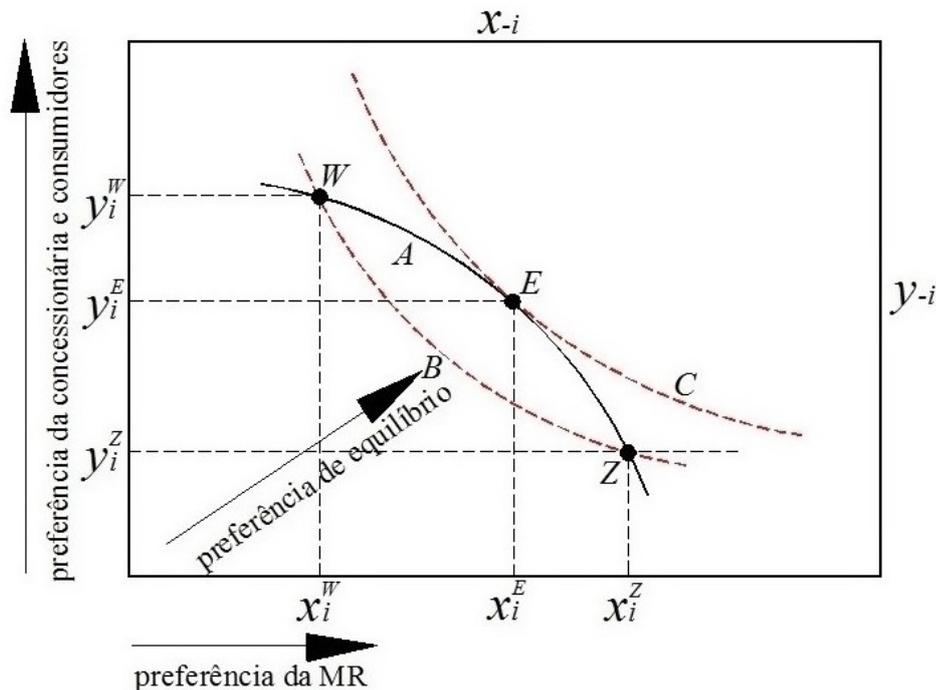


Figura 6 – Cônica e preferências na caixa de Edgeworth

Fonte: Próprio autor

Como as MRs ganham com a venda de energia, estes agentes preferem operar na direção mostrada na Figura 6 com $x_i^Z > x_i^E > x_i^W$. As concessionárias ganham em qualidade, imagem, melhoria e solução de problemas operacionais que evitam sanções impostas pelo agente regulador ou autoridade competente. Os consumidores se beneficiam de contas de energia reduzidas devido ao menor custo da perda que é repassado a eles. Assim, empresas de serviços públicos e consumidores preferem perfis de operação de alta redução de perdas, conforme mostrado na Figura 6 com $y_i^W > y_i^E > y_i^Z$.

Assume-se que a curva convexa em relação a cada eixo fornece a utilidade. As curvas B e C determinam a utilidade do jogador i e a curva A , a utilidade do jogador $-i$. Assim, os pontos médios são preferíveis aos extremos. Na Figura 6, para o jogador do eixo i observa-se que: $U_i(x_i^E, y_i^E) > U_i(x_i^Z, y_i^Z)$ and $U_i(x_i^E, y_i^E) > U_i(x_i^W, y_i^W)$, porque a curva C fornece maior utilidade

do que B , cujo ponto E corresponde à máxima utilidade possível, porque está de acordo com a direção do equilíbrio, que atende aos interesses da MR, das concessionárias e dos consumidores. A mesma análise é admitida para o jogador do eixo $-i$.

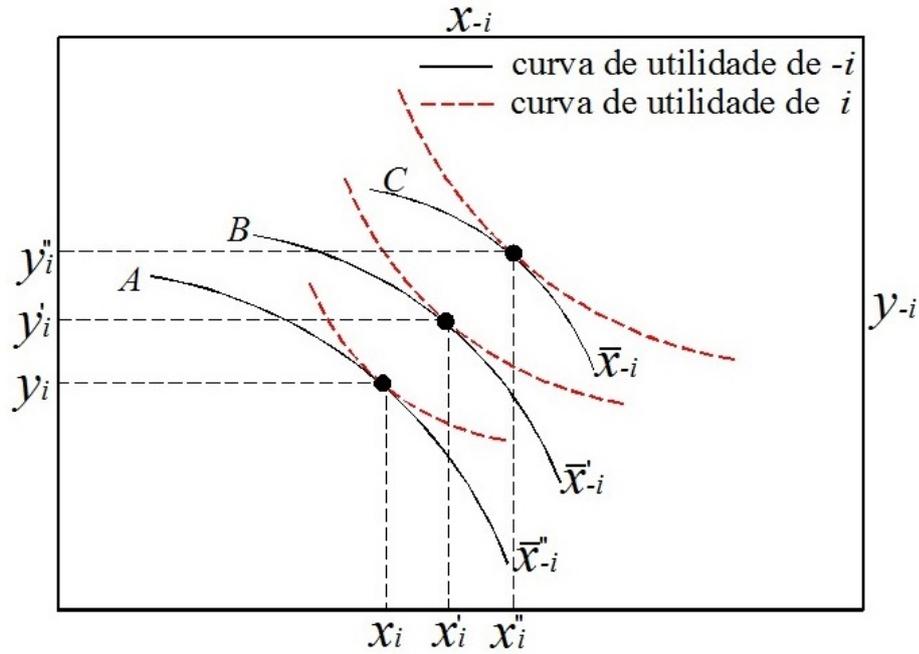


Figura 7 – Modo 1 de configuração do jogo

Fonte: Próprio autor

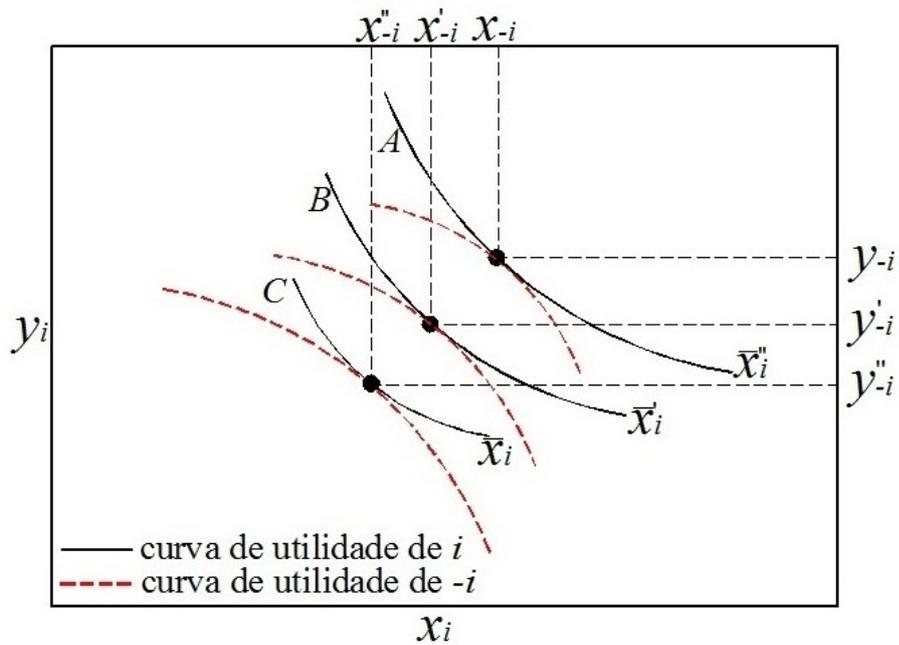


Figura 8 – Modo 2 de configuração do jogo

Fonte: Próprio autor

De acordo com o Miller (2000) e o Teorema 1, uma cônica formada na Figura 6 pelas curvas A e B é uma união finita de cascos convexos. Os pontos W e Z correspondem ao vértice da cônica obtida pela intersecção das curvas mais distantes, A e B em relação ao eixo para o qual são côncavas. Uma vez que os agentes são racionais, um vetor ortogonal dos pontos W e Z em direção ao centro da cônica é desejável para todos os jogadores, pois aumenta a utilidade destes e resulta em um equilíbrio estável, já que um ponto como E dentro da cônica é um ponto máximo para todos.

Neumann e Morgenstern (1944) definem jogo como a totalidade das regras que o descrevem. Quer sejam jogos de tabuleiro, desportivos ou comerciais, a existência de regras é a primeira condição de um ambiente competitivo e inclusivo. Regras são comandos absolutos que se violados, a transação deixa de ser um jogo, em muitos casos, é fisicamente impossível violá-las. Estas devem ser em número, o mínimo suficiente para obter equilíbrio do jogo.

Nesse modelo, a operação pode ser dada pela curva côncava ou convexa, mas a utilidade apenas pela convexa. Cada ponto de operação de equilíbrio tem duas formas possíveis de operação. O ponto E da Figura 6 corresponde a dois pontos EN, denominados modo 1 e 2.

- O modo 1 ilustrado na Figura 7 cujo jogador i (MRs associados) opera pelo eixo i da caixa com $x_i'' > x_i' > x_i$ e $y_i'' > y_i' > y_i$ para a utilidade da concessionária e consumidores. A MR grande (jogador do eixo $-i$) opera pelas curvas: A , B e C com $\bar{x}_{-i}'' > \bar{x}_{-i}' > \bar{x}_{-i}$.
- Para o modo 2, o jogador $-i$ opera através do eixo $-i$ da caixa com $x_{-i}'' > x_{-i}' > x_{-i}$ e $y_{-i}'' > y_{-i}' > y_{-i}$ para a utilidade da concessionária e consumidores como mostra a Figura 8. As MRs associadas (jogador do eixo i) opera pelas curvas: A , B e C com $\bar{x}_i'' > \bar{x}_i' > \bar{x}_i$.

3.4 Obtendo o EN

A formulação matemática do problema e a metodologia de solução são relatadas na subseção 3.4.1 e as condições para a unicidade do EN são relacionadas em sequência (subseção 3.4.2).

3.4.1 Abordagem Analítica

A partir do fluxo de potência e da perspectiva gráfica da caixa de Edgeworth como na Figura 6, é possível, $(x_i, x_{-i}) \Rightarrow (y_i, y_{-i})$ e, portanto, $(x_i, x_{-i}) \triangleq (x_i, y_i)$. Os ganhos de utilidade dos jogadores são mutuamente exclusivos, i.e., se a potência injetada de um aumenta, a utilidade do outro diminui e vice-versa. A função de utilidade corresponde a função de *payoff* de cada jogador. Adicionalmente, como a utilidade de um agente (MR) ou conjunto de agentes (MR, concessionárias e consumidores) é dada pela curva convexa ao seu respectivo

eixo, portanto, $U_i = \mathbf{f}(x_{-i}, y_{-i})$ e $U_{-i} = \mathbf{f}(x_i, y_i)$. A partir da normalização de \ddot{X} e, por aproximação não linear, a função de utilidade da caixa do eixo i pode ser dada por $U : \Re^{\bar{n}} \rightarrow \Re$ $U_i(x_{-i}, y_{-i}) = \frac{1}{\mathbf{X}_{-i}^T A_{-i} \mathbf{X}_{-i}} = \bar{x}_i$ onde $\mathbf{X}_{-i} = [x_{-i}, y_{-i}, 1]^T$ e A_{-i} é $(\bar{n}+1) \times (\bar{n}+1)$ matriz com o terceiro termo da terceira linha nulo. Da mesma forma, a função de utilidade da caixa do eixo $-i$ é dada por: $U : \Re^{\bar{n}} \rightarrow \Re$ $U_{-i}(x_i, y_i) = \frac{1}{\mathbf{X}_i^T A_i \mathbf{X}_i} = \bar{x}_{-i}$ onde $\mathbf{X}_i = [x_i, y_i, 1]^T$ e A_i é $(\bar{n}+1) \times (\bar{n}+1)$ matriz com o terceiro termo da terceira linha nulo. A expressão analítica da cônica da Figura 6 é $B = \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} \\ B_{2,1} & B_{2,2} \end{bmatrix}$, uma $\bar{n}+1 \times \bar{n}+1$ matriz bloco simétrica, com $B_{1,1}$ an $\bar{n} \times \bar{n}$ submatriz simétrica positivamente definida, dado por $g(x, y) = \mathbf{X}^T B \mathbf{X}$ a composição da curva convexa do jogador i , i.e., $g(x, y) = \text{sub}(U_{-i}(x_{-i}, y_{-i}) | \min(x_{-i})) \cap \text{epi}(U_i(x_i, y_i) | \min(x_i))$. Conforme técnica descrita no Apêndice, a figura cônica é classificada como uma elipse. O jogador que busca máxima recompensa atua racionalmente e conforme as funções U_i e U_{-i} possuem características de concavidade e convexidade, portanto o problema de otimização multiobjetivo é dado por (3.6) (NEUMANN; MORGENSTERN, 1944). A restrição, $g(x, y)$, é uma restrição compartilhada, pois significa um conjunto comum para todos os perfis de estratégia do jogador. O problema multi-objetivo de maximizar funções côncavas ou convexas sobre um conjunto convexo é chamado de problema convexo.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{X}}{\text{maximize}} && [U_i, U_{-i}] \\ & \text{sujeito a} && g(x, y) \leq 0, \\ & && x_i, x_{-i}, y_i, y_{-i} > 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Como $g(x^*, y^*) = 0$, o jacobiano de $g(x^*, y^*)$ é completo e de acordo com o Teorema 4, o problema (3.6) satisfaz as condições KKT, de modo que, (3.7)-(3.15) solucionam o problema, e μ é chamado multiplicador de Lagrange, e ainda, $g(x, y) \triangleq g_i(x_i, y_i) \triangleq g_{-i}(x_{-i}, y_{-i})$.

Teorema 4 (M.S.BAZARRA; SHERALI; SHETTY, 2006) *Se o problema (3.6) é convexo, então as condições de KKT são suficientes para obter o máximo global.*

$$x_i \left(\frac{\partial U_{-i}(x_i, y_i)}{\partial x_i} - \mu_{x_i} \frac{\partial g_i(x_i, y_i)}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3.7)$$

$$y_i \left(\frac{\partial U_{-i}(x_i, y_i)}{\partial y_i} - \mu_{y_i} \frac{\partial g_i(x_i, y_i)}{\partial y_i} \right) = 0 \quad (3.8)$$

$$x_{-i} \left(\frac{\partial U_i(x_{-i}, y_{-i})}{\partial x_{-i}} - \mu_{x_{-i}} \frac{\partial g_{-i}(x_{-i}, y_{-i})}{\partial x_{-i}} \right) = 0 \quad (3.9)$$

$$y_{-i} \left(\frac{\partial U_i(x_{-i}, y_{-i})}{\partial y_{-i}} - \mu_{y_{-i}} \frac{\partial g_{-i}(x_{-i}, y_{-i})}{\partial y_{-i}} \right) = 0 \quad (3.10)$$

$$\mu_{xi}(g_i(x_i, y_i)) = 0 \quad (3.11)$$

$$\mu_{yi}(g_i(x_i, y_i)) = 0 \quad (3.12)$$

$$\mu_{x-i}(g_{-i}(x_{-i}, y_{-i})) = 0 \quad (3.13)$$

$$\mu_{y-i}(g_{-i}(x_{-i}, y_{-i})) = 0 \quad (3.14)$$

$$x_i, y_i, \mu_{xi}, \mu_{yi}, \mu_{x-i}, \mu_{y-i} \geq 0 \quad (3.15)$$

O Algoritmo 2 é baseado em uma sequência de decrescimento do volume da elipse preservando o centro geométrico da cônica original. Como $B_{1,1}$ é uma submatriz simétrica positivamente definida, o volume inicial da elipse é dada por $V(E_0) = \det(B_{1,1}^{1/2} \cdot \omega_n)$, onde ω_n é o volume de \bar{n} dimensões de uma bola unitária observada em [Guler \(2010\)](#) e $D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{\bar{n}}, \lambda_{\bar{n}+1})$ com os primeiros \bar{n} elementos positivos e $\bar{n} + 1$ negativo. Tem-se $1/\sqrt{\lambda_i}$ with $i = 1, \dots, \bar{n}$ como o raio da cônica, a redução de volume aplicada a λ_i para dimensionar \bar{n} espaços pode ser dado por $c_{\bar{n}} = \frac{\bar{n}}{\bar{n}+1} \left(\frac{\bar{n}^2}{\bar{n}^2-1} \right)^{\frac{(\bar{n}-1)}{2}} < 1$, empregado em [\(SHAH; MITCHELL; KUPFERSCHMID, 2001\)](#).

Além da colinearidade entre os gradientes dos vetores U e g , os pontos obtidos no Algoritmo 2, geometricamente, são caracterizados por (3.16), que é condição necessária e suficiente para alocações EN e EP. Os pontos obtidos criam a curva de contrato que é a solução da equação cúbica em (3.17), para o jogador i , ou do mesmo modo (3.18) para os outros jogadores, cujos coeficientes a , b e c são obtidos por regressão não linear, conforme observado por [Mochaourab e Jorswieck \(2012\)](#).

$$\frac{\partial(U_{-i}(x_i, y_i))}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial(U_i(x_{-i}, y_{-i}))}{\partial y_{-i}} = \frac{\partial(U_{-i}(x_i, y_i))}{\partial y_i} \cdot \frac{\partial(U_i(x_{-i}, y_{-i}))}{\partial x_{-i}} \quad (3.16)$$

$$a_i \cdot x_i^3 + b_i \cdot x_i^2 + c_i \cdot x_i + d_i = 0 \quad (3.17)$$

$$a_{-i} \cdot x_{-i}^3 + b_{-i} \cdot x_{-i}^2 + c_{-i} \cdot x_{-i} + d_{-i} = 0 \quad (3.18)$$

Algoritmo 2: Procedimento para obtenção de pontos de equilíbrio

Entrada: $B, \bar{n} \leftarrow 2, k \leftarrow 0$

Saída: $[x_i^k, x_{-i}^k, y_i^k, y_{-i}^k]$

// Início

1. Faça $\lambda_i^0 = P^{-1}BP$, onde P é uma matriz ortogonal;

2. Aplique (3.7)-(3.15);

// Atualize a restrição e resolva o problema multiobjetivo

3. **Enquanto** $\exists \mu : \mu \in \mathfrak{R}_+$

4. $k = k + 1$;

5. $\lambda_i = \lambda_i^0 / \left(c_{\bar{n}}^k \right)^{1/\bar{n}+1} \quad i = \{1, \dots, \bar{n}\}$;

6. $B_{B_{i,j} \in B \setminus B_{\bar{n}\bar{n}}} = P^{-1}DP$;

7. Aplique (3.7) – (3.15)

3.4.2 Singularidade do EN

Os jogos multiequilíbrio diminuem o valor preditivo do conceito de EN, portanto, a unicidade aspira mais funcionalidade ao equilíbrio obtido. Alguns jogos possuem apenas um EN em estratégias puras, é o caso de jogos bem conhecidos como o dilema dos prisioneiros e o jogo Cournot, respectivamente para jogos discretos e contínuos (Contreras; Klusch; Krawczyk, 2004). A existência de estratégias dominantes fornece o único equilíbrio no jogo do dilema do prisioneiro e o jogo de Cournot típico que devido às suas restrições lineares tem um equilíbrio único sob suposições leves (PRAŽÁK; KOVÁRNÍK, 2018). Outro modo característico de unicidade do EN ocorre em jogos cooperativos, pois eles substituem um ganho individual por um valor de coalizão (Chen et al., 2014).

Em jogos com restrição acoplada, o equilíbrio único não é exclusivo. Um caso notável de EN generalizado é apresentado por Rosen (1965) e denominado jogo restrito acoplado, no qual a restrição é combinada no espaço estratégico de todos os jogadores. Rosen (1965) propõe um modelo de equilíbrio único para jogos côncavos sob certas condições. Como as estratégias dos jogadores são representadas em um espaço euclidiano E^2 e são limitadas por um conjunto convexo e compacto, uma soma não negativa ponderada da função $U_i(x, y)$ é dada por (3.19).

$$\sigma(x, y, r) = \sum_{i=1}^{\bar{n}} r_i U_i(x, y), r_i \geq 0 \quad (3.19)$$

Se $\sigma(x, y, r)$ é diagonalmente estritamente côncavo (ou seja, estritamente monótono de acordo com (3.1)) para todos $r \in F$, onde F é um conjunto convexo em um plano euclidiano positivo, então para cada r , x^* é um único EN com base no trabalho de ponto fixo de Kakutani verificado em (Rosen, 1965) chamado de equilíbrio único normalizado de acordo com o Teorema 5.

Teorema 5 (Rosen, 1965) *Se $\sigma(x, y, r)$ é diagonalmente estritamente côncavo para r . Então, para cada $r > 0$ há um EN normalizado único.*

Para qualquer distribuição de peso viável (r) na função de pagamentos conjuntos $\sigma(x, y, r)$, o jogo tem um equilíbrio único para cada distribuição. Para um valor fixo de $r \in F$ e um problema de otimização multiobjetivo implícito, *maximize* $\sigma(x, y, r)$, o jogo tem uma única restrição acoplada para cada configuração r que relaciona os multiplicadores do problema original com um multiplicador comum (μ^0) associado ao problema matemático implícito por colinearidade: $\mu_{xi} = \frac{\mu^0}{r_i}$ para $i = 1, \dots, \bar{n}$, cuja existência de (μ^0) também é relatada por Cominetti, Facchinei e Lasserre (2012) e Kulkarni e Shanbhag (2012) como equilíbrio variacional.

4 Modelo Micro

Além da eficiência a que os mercados locais devem fazer justiça, sob o aspecto interno de uma MR, a eficiência é, em geral, avaliada por meio da solicitação das fontes a um menor custo possível, comumente chamado de despacho econômico. Neste capítulo uma abordagem evolutiva de teoria dos jogos associada a uma função de custo e benefício é proposta a fim quantificar a alocação das fontes disponíveis dentro de uma MR.

A seguir uma revisão acerca do emprego de MRs híbridas ao sistema elétrico é relacionado na Subseção 4.1.

4.1 Revisão da literatura

As fontes renováveis são inesgotáveis e ambientalmente corretas, razões pelas quais sua utilização deve ser intensificada. Instantes de escassez de geração de uma fonte intermitente como solar e eólica são parcialmente superados pela construção de usinas híbridas, nas quais a fonte de um recurso energético é consumida para compensar a indisponibilidade da outra (KHAN et al., 2019). Do ponto de vista econômico, os REDs híbridos oferecem uma melhor relação desempenho/custo do que os sistemas fotovoltaicos e fazendas eólicas individuais (DAWOUD; LIN; OKBA, 2018).

Uma MR híbrida pode ser composta por várias fontes renováveis ou não renováveis, fontes renováveis e não renováveis, fontes renováveis e armazenamento, fontes não renováveis e armazenamento ou todas estas conjuntamente. O papel fundamental do armazenamento em rede é fornecer a energia necessária no momento necessário. Além de atender às necessidades de lucro do proprietário, Zeng et al. (2018) mostra que o armazenamento de energia ajuda a promover a concorrência, pois mitiga o monopólio de produtores estabelecidos há muito tempo. Conforme observado por González-Romera et al. (2019) a cooperação de mais de um recurso de energia tem vantagens para a incompatibilidade de demanda de geração dentro da MR pelo gerenciamento de prossumidores fotovoltaicos com sistemas de armazenamento.

O fundamental papel do sistema de armazenamento na rede é prover a energia necessária no tempo indicado. Como tecnologias de armazenamento mais comuns, pode-se citar: baterias de estado sólido, baterias de fluxo, ar comprimido, volantes de inércia, termelétricas e hidráulicas bombeadas. O uso de bateria para contornar desequilíbrios entre a oferta de demanda de energia e como planejamento de *backup* é proposto por Kong et al. (2019). Para apoiar a energia extra de recursos renováveis e reduzir problemas de penetração de fontes intermitentes o sistema de armazenamento de energia é utilizado por Tabar e Abbasi (2019). A confiabilidade é também um benefício garantido por gerações com sistema de armazenamento incorporado, in-

dependente se a fonte é combustível fóssil ou células de combustível (TABAR; ABBASI, 2019; DAWOUD; LIN; OKBA, 2018).

Como notado por González-Romera et al. (2019) a cooperação de mais de uma fonte de energia tem a vantagem de reduzir a incompatibilidade com a demanda da rede, para demonstrar isso, os autores utilizam-se de algoritmo genético (GA - *genetic algorithm*) para gerir prossumidores fotovoltaicos e sistema de armazenamento. Do mesmo modo, um sistema PV, eólico e armazenamento por baterias de alta penetração na rede opera favoravelmente de modo conectado e ilhado em Michalitsakos, Mihet-Popa e Xydis (2017).

O despacho ideal de uma MR autônoma composta por módulos fotovoltaicos, geração eólica, gerador a diesel e banco de baterias é equacionado por Henao-Muñoz, Saavedra-Montes e Ramos-Paja (2018). Um sistema solar fotovoltaico, micro gerador diesel e baterias tem a operação otimizada em dois estágios e Meena, Yang e Zacharis (2019) mostram o potencial de viabilidade do investimento para contratos de longo prazo de uma MR operando conectada à rede. Turbinas eólicas, armazenamento de ar comprimido e gerador a diesel combinado com poder calorífico é despachado através de uma programação bi-nível para fornecer potência confiável com base na programação do OSD como observado por Quashie et al. (2018). Uma política de despacho de uma rede eólica e dois tipos de armazenamento: armazenamento hídrico bombeado e sistema de baterias para cumprir as ordens de despacho do operador do sistema é reportada por Psarros e Papathanassiou (2020). A partir de um sistema de fontes fotovoltaica, eólica, armazenamento em baterias e hídrico que possibilita alto estoque de combustível, Guezgouz et al. (2019) mostram o crescimento da confiabilidade de fornecimento por um custo menor do que o de um sistema que utilize apenas uma tecnologia.

Um estudo de um sistema de armazenamento de energia de ciclo de hidrogênio é utilizado como *back-up* de uma MR com fonte eólica e bateria, este sistema de armazenamento possui facilidade de instalação e grande capacidade de reserva contribuindo para a melhor performance da MR, inclusive obtendo altos lucros (Zhang et al., 2018).

A redução dos custos de instalação e operação de uma MR híbrida é um objetivo central de qualquer planejamento cuja implementação pode compreender diversas técnicas matemáticas. Amrollahi e Bathaee (2017) fazem uso da programação linear inteira mista (PLIM) para determinar o tamanho de uma rede híbrida com fonte PV, eólica e sistema de baterias. Com base nessa mesma técnica Henao-Muñoz, Saavedra-Montes e Ramos-Paja (2018) tornam mais híbrido o perfil da rede ao incluírem o gerador diesel à matriz energética renovável. Para uma rede composta por fontes: eólica, hídrica bombeada e sistemas de bateria, Psarros e Papathanassiou (2020) maximizam a remuneração da rede híbrida sujeita a ordens de despacho do operador do sistema. Com base na disponibilidade dos recursos: PV, eólico, bateria e diesel, Fazelpour, Farahi e Soltani (2016) avaliam a combinação mais econômica de acordo com o *software hybrid optimization model for electric renewable* (HOMER) (HOMER, 2020), ferramenta

matemática cujo objetivo principal é a solução de questões econômicas em modelos elétricos envolvendo diferentes fontes energéticas. A partir desse mesmo *software*, a performance de um sistema fotovoltaico de rastreador de eixo é avaliada por [Al Garni, Awasthi e Ramli \(2018\)](#).

Uma estação híbrida composta por fontes PV, eólica e hídrica com estrutura de armazenamento bombeado instalada na China tem sua capacidade otimizada a fim de obter o máximo fator de carga de atendimento com redução do custo de energia utilizando como técnica a otimização por enxame de partículas (PSO - *particle swarm optimization*) ([XU et al., 2020](#)). Utilizando uma variação de GA, [Meena, Yang e Zacharis \(2019\)](#) propõe o *design* de MRs híbridas comunitárias em duas etapas: tamanho e operação ideal visando minimizar o custo de operação para os seguintes recursos: PV, bateria e micro geradores a diesel. Para um rede com recursos PV, eólico e bateria, a técnica de enxame de partículas é empregada por [Ali et al. \(2020\)](#) para um jogo teórico cooperativo para o planejamento da rede visando o lucro máximo.

Garantindo a sobrevivência de pequenos prosumidores, [Amin et al. \(2020\)](#) desenvolvem um comércio de eletricidade P2P baseado em distribuir a receita entre os agentes, os autores mostram que em um ambiente de competição justa, o modelo de jogo não cooperativo converge para o modo cooperativo. Híbridizando um sistema com fontes solar, eólica e bateria, [Liu et al. \(2019\)](#) visam reduzir drasticamente o risco hidrológico de uma usina hidrelétrica especialmente durante a estação seca. Através de um algoritmo de relaxamento aplicado à função Nikaido-Isoda, [Marzband \(2016\)](#) formula um jogo para avaliar o lucro de um distrito de energia composto por fontes PV, eólica, um sistema de micro turbinas e um sistemas de armazenamento operando no mercado de varejo. Para geradores de fontes não específicas, [Pantoja e Quijano \(2011\)](#) e [Mojica-Nava, Barreto e Quijano \(2015\)](#) propõe a estratégia dinâmica do replicador, respectivamente, baseada na função de aptidão logística e quadrática para o problema do despacho energético com o objetivo de maximizar a utilidade da MR e, por consequência, reduzir os custos de geração. A partir de técnicas como a colônia artificial de abelhas (ABC - *artificial bee colony*), um otimizador inspirado no comportamento da formiga-leão, GA, entre outras, [Mohseni e Brent \(2019\)](#) qualificam o algoritmo *moth-flame* como o mais eficiente para otimizar o custo de instalação de uma MR híbrida envolvendo o hidrogênio como uma das fontes.

Além da fonte solar, eólica, hidráulica e armazenamento hidráulico e por baterias, existe a possibilidade de utilizar resíduos vegetais e animais que são, em geral, descartados. Fontes de energia como o biogás podem ser integradas ao sistema elétrico com garantia de confiabilidade ([SARKAR et al., 2019](#)). Utilizando ABC, [Singh \(2016\)](#) otimiza o tamanho de uma MR híbrida independente formada de recursos: PV, eólico, biomassa e bateria conectada à rede para atender uma aldeia na Índia. Um projeto de PV, biogás e gerador diesel conectado à rede é configurado por [Kasaeian et al. \(2019\)](#) para atender uma vila comunitária no leste do Irã especialmente em horário de pico. [Bhatt, Sharma e Saini \(2016\)](#) estudam uma combinação técnica e econômica de PV, biomassa, biogás, gerador diesel, bateria e fonte hídrica com bombeamento para uma área rural da Índia usando o *software* HOMER cujos objetivos são reduzir os custos presente

líquido do empreendimento e de energia. Para o mesmo *software*, [Sarkar et al. \(2019\)](#) avaliam a viabilidade de uma MR de fontes PV, eólica, biogás e bateria a partir do cálculo da taxa de retorno e do tempo de maturação do investimento, e, dado os indicadores satisfatórios, opinam favoravelmente a instalação da MR híbrida. Diversas combinações híbridas envolvendo PV, eólica, biomassa, diesel e bateria são avaliadas por [Sawle, Gupta e Bohre \(2018\)](#) para quatro diferentes técnicas: PSO, otimização por estruturas de borboletas, GA e otimização baseada em aprendizagem do professor, a qual é qualificada como a técnica de melhor convergência para atender os requisitos técnicos, econômicos e sociais, tais como: fator de atendimento de carga, custo de energia e criação de empregos.

4.2 Metodologia

A MR híbrida deve possuir a capacidade de gerenciar o despacho das fontes dinamicamente. O modelo de conexão e controle das fontes é relacionado na subseção 4.2.1. A modelagem ativa das fontes encontra-se elencada na subseção 4.2.2.

4.2.1 Conexão e estrutura de controle

O modo mais comum de compor uma MR híbrida é por meio da agregação de prossumidores. Como já mencionado, esses agentes estão associados a até três configurações ao mesmo tempo: consumo, produção e armazenamento ([Muzi; de Lorenzo; Consolidani, 2019](#)).

A estrutura de conexão da rede entre seis fontes renováveis e não renováveis está resumida na Figura 9. Este estudo aborda a possibilidade de geração de energia a partir de fonte solar, biomassa, biogás, diesel, banco de baterias e micro-fontes hídricas. Como apenas cargas CA são permitidas, as fontes solar e bateria requerem um conversor de energia CC/CA. O banco de baterias precisa de um controlador de carga específico para manter o status de carga da bateria adequado. As outras fontes têm uma conexão imediata com a rede. A carga de despejo compreende a energia descartada pela fonte solar, que não é usada para carregar o banco de baterias.

Devido à variedade de proprietários da MR híbrida, um controle autônomo, inteligente e exclusivo é necessário para atender aos pedidos de despacho instantâneo. Como as instalações híbridas incorporam vários ativos de geração e armazenamento, elas precisam ser totalmente controláveis e despacháveis ([PSARROS; PAPATHANASSIOU, 2020](#)). Em uma MR híbrida a coordenação entre as tecnologias de geração de energia, dispositivos de armazenamento e carga pode ser realizada por alguns protocolos, um dos mais sofisticados é o SMA. Assim como mencionado no capítulo anterior, o SMA gerencia com eficiência as tarefas internas da MR híbrida a partir de uma abordagem de controle distribuída sendo capaz de trabalhar com questões complexas como gestão precisa de energia e controle de distúrbios e falhas internas ([KHAN et al., 2019](#)). Características como autonomia, reatividade, flexibilidade, extensibilidade, proatividade

e cooperação entre agentes para resolver problemas que não podem ser resolvidos por apenas um são vantagens da aplicação desta tecnologia em MR híbrida. Mais detalhes desta arquitetura são apresentados nos trabalhos de [Khan e Wang \(2017\)](#) e [Khan et al. \(2019\)](#).

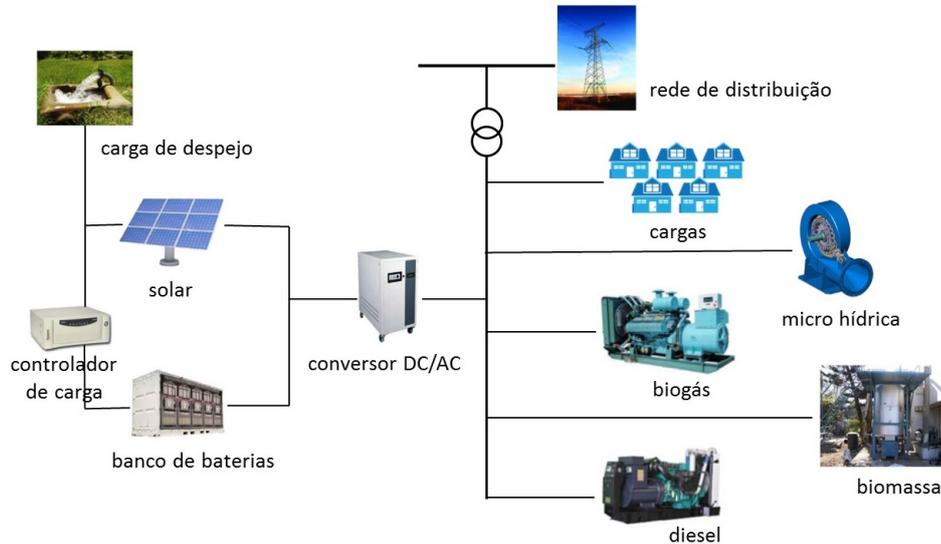


Figura 9 – Conexão do sistema de geração híbrida

Fonte: Próprio autor

4.2.2 Modelagem de Fontes

As estruturas de geração de energia de MR híbrida são modeladas matematicamente nas subseções seguintes.

4.2.2.1 Sistema de geração solar fotovoltaica (PV)

O sistema solar fotovoltaico compreende os painéis solares, o inversor, as estruturas de instalação e a ocorrência de radiação solar utilizável para geração de energia. A radiação solar compreende a radiação refletida, direta e difusa, sendo as duas últimas utilizáveis para geração de energia elétrica ([MALEKI; HIZAM; GOMES, 2017](#)).

A potência fornecida por uma unidade PV, no instante t , é dada por (4.1).

$$P_{pv}(t) = Rp_{pv}\eta_{pv}AmM_{pv}(t)\eta_{inv} \quad (4.1)$$

Rp_{pv} , η_{pv} , η_{inv} , Am , $M_{pv}(t)$ são respectivamente a potência nominal unitária (kW), a eficiência do painel solar e do inversor, a área total de painéis solares (m^2) e a radiação solar (W/m^2).

Para esta análise, o efeito da temperatura na produção do sistema é negligenciado. Fatores controláveis que reduzem o desempenho dos painéis, como excesso de acúmulo de poeira e outras substâncias, podem ser superados através de uma manutenção preventiva adequada.

4.2.2.2 Planta de biomassa

Em geral, as tecnologias de geração de energia a partir da biomassa são compostas por pequenos sistemas de gaseificação (até 200 kW) e ciclos de vapor (acima de 200 kW) (SITUMORANG et al., 2020). As fontes de produção em grande escala são geralmente de fazendas agrícolas de alta tecnologia. Bagaço, vinhaça e palha de cana, resíduo de madeira, sabugo, caule, folhas e palha de milho, cascas de arroz, soja e resíduos de sorgo são amplamente utilizados como matéria-prima para geração de energia (SITUMORANG et al., 2020).

Matematicamente, a energia fornecida no instante t por um gaseificador de biomassa é dada por (4.2).

$$P_{bm}(t) = \frac{Rp_{bm}\eta_{bm}1000CV_{bm}M_{bm}(t)}{3,6} \quad (4.2)$$

Rp_{bm} é a potência nominal unitária (kW), η_{bm} é a eficiência do gerador de biomassa, CV_{bm} é o valor calorífico da biomassa (MJ/kg) e $M_{bm}(t)$ a biomassa em toneladas.

4.2.2.3 Planta de biogás

Resíduos como esterco de bovinos, suínos, aves e outros são importantes matérias-primas para a produção de biogás. O gado de corte é considerado o de maior potencial de geração de biogás: $268m^3$ de biogás por ano por animal. Porém, a organização da matéria é a principal dificuldade para a criação extensiva (FREITAS et al., 2019). Esta dificuldade é mais facilmente superada na suinocultura de criação intensiva e com rendimento da ordem de $46,8m^3$ de biogás por ano por animal (FREITAS et al., 2019).

O potencial de um sistema de biogás é medido por (4.3). A potência nominal é dada por Rp_{bg} (kW), CV_{bg} é o valor calorífico do biogás da ordem de $4700kcal/m^3$ (BHATT; SHARMA; SAINI, 2016), $M_{bg}(t)$ é a quantidade de esterco animal (kg), η_{bg} é a eficiência do sistema e 0,036 é considerado o rendimento de gás.

$$P_{bg}(t) = \frac{Rp_{bg}\eta_{bg}0,036CV_{bg}M_{bg}(t)}{860} \quad (4.3)$$

Um estudo abordando aspectos técnicos e econômicos da produção de energia a partir do biogás pode ser encontrado em Freitas et al. (2019).

4.2.2.4 Micro Usina Hídrica (MUH)

A tecnologia MUH usa a energia potencial armazenada em uma base hidráulica de cursos de água para gerar energia por meio de uma turbina. A potência de saída é dada por (4.4), onde a potência nominal de MUH é Rp_{muh} (kW), η_{muh} é a eficiência geral composta de turbina, gerador e eficiência de transmissão, $Q(t)$ é o fluxo de água da turbina (m^3/h) considerando o volume do reservatório superior e H sendo a altura da barragem (m).

$$P_{muh}(t) = Rp_{muh} \eta_{muh} Q(t) H \quad (4.4)$$

Associado à estrutura de geração, existe um arranjo de armazenamento. A base de armazenamento de água consiste em um reservatório superior canalizado para outro inferior em uma determinada altura ao longo dos cursos d'água. Um pequeno arranjo de bateria armazena o excedente de energia de uma fonte renovável cuja função é bombear água do reservatório inferior para o superior nos momentos em que o MUH não funciona. Ao contrário da fonte solar, o armazenamento de água em um reservatório superior permite o despacho da fonte. Mais detalhes sobre a construção do MHP podem ser encontrados em [Xu et al. \(2020\)](#).

Geralmente, os reservatórios são cúbicos e o volume de água variável no reservatório superior é dado por (4.5), onde V' é a quantidade de água na hora anterior (m^3), Q_{rio} é o volume de entrada do rio e a relação da variância da água com o reservatório inferior é ΔV .

$$V = V' + Q_{rio} + \Delta V \quad (4.5)$$

4.2.2.5 Gerador Diesel (DG)

O diesel é um combustível acessível e apesar das recentes altas de preço, ainda é economicamente possível seu emprego em geração de energia. Os modelos mais populares de geradores a diesel têm capacidade nominal de 1 a 100 kW.

A seguinte expressão (4.6) modela a potência de saída, de forma que Rp_{die} representa a potência nominal de um gerador (kW) cuja eficiência é η_{die} .

$$P_{die} = Rp_{die} \eta_{die} \quad (4.6)$$

4.2.2.6 Banco de baterias

O estado de carga em um instante de tempo $t + 1$ é função da energia de carga/descarga e o estado de armazenamento no instante anterior t de acordo com (4.7). $P_d(t)$ e $P_c(t)$ (KW) são, respectivamente, potência descarregada e carregada, da mesma forma, η_d e η_c são as eficiências de descarga e de carga do banco, Δt é considerado o intervalo de tempo. A potência descarregada é aquela que, através da bateria, atende a carga no instante t . A energia que carrega a bateria é

proveniente de fontes renováveis, geralmente solar, que excedem instantaneamente a ordem de despacho para a fonte.

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \left(\eta_c P_c(t) - \frac{P_d(t)}{\eta_d} \right) \Delta t \quad (4.7)$$

Para não prejudicar a vida útil da bateria é necessário observar a carga mínima do banco em todos os momentos. Esta carga é constante e é obtida por (4.8) e (4.9), onde DOD é a profundidade da descarga e E_{bat}^{max} (KWh) é o máximo permitido de energia em cada bateria, o que equivale ao estado de carga máxima da unidade da bateria. A energia da unidade no instante t deve atender (4.10).

$$E_{bat}^{min} = (1 - DOD) E_{bat}^{max} \quad (4.8)$$

$$SOC^{min} = (1 - DOD) SOC^{max} \quad (4.9)$$

$$E_{bat}^{min}(t) \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat}^{max}(t) \quad (4.10)$$

A carga máxima do banco de bateria (4.11) é uma função do número máximo de dispositivos N_{bat}^{max} . A potência fornecida pelo banco ($P_{bat}(t)$) para atender a carga em qualquer t pode ser dada por (4.12).

$$SOC^{max} = N_{bat}^{max} E_{bat}^{max} \quad (4.11)$$

$$SOC^{min} \leq \frac{P_{bat}(t)}{\eta_{inv}} \leq SOC^{max} \quad (4.12)$$

4.3 Formulação do Problema

Um dos principais objetivos da análise de viabilidade de um projeto é identificar o custo para implementá-lo. A técnica de estudo mais conhecida é avaliar seu custo atual para o período do projeto. As seções 4.3.1 e 4.3.2 mostram como este problema é formulado.

4.3.1 Modelo de Otimização

Embora as unidades geradoras possam ter proprietários diferentes, elas operam sob um único contrato, por isso exibem comportamento cooperativo dentro da MR híbrida. O problema do despacho econômico, cujo objetivo é minimizar o custo de geração, distribui a demanda pelas unidades geradoras disponíveis, fazendo uso das fontes sujeitas a limitações técnicas em tempo

real. O problema de otimização (4.13) visa minimizar o custo presente líquido total (TNPC) do sistema.

$$\begin{aligned}
& \text{minimize} && \left[\text{TNPC} \right] \\
& \text{sujeito a} && \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{ger}} (p_i(t) - Pd(t)) = 0, \\
& && 0 \leq p_i(t) \leq P_i^{max}(t), \forall i, \forall t \\
& && SOC^{min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC^{max}(t), \forall t \\
& && P_c(t) \leq MP_d(t), \forall t \\
& && P_c(t), P_d(t) \geq 0 \forall t
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$p_i(t)$ representa a potência despachada pela fonte i no tempo t . A demanda de carga instantâneo é $Pd(t)$. Assumindo M como um grande número real, a restrição em questão impede o carregamento e o descarregamento simultâneos da bateria. A potência máxima que pode ser despachada pela fonte i no instante t corresponde a $P_i^{max}(t)$ e é dada por (4.14).

$$P_i^{max}(t) = N_i^{max} P_i(t) \tag{4.14}$$

N_i^{max} é o número máximo de unidades de equipamento da fonte i , obtido de acordo com o espaço físico e recurso natural disponível. $P_i(t)$ coincide com a potência disponível da fonte i no tempo t .

O número de diferentes fontes de geração é n_{ger} e T é o tempo de operação da MR em horas. TNPC corresponde ao custo presente total de todas as fontes e é dado por (4.15), onde Cp_i e Cp_{inv} são respectivamente o custo presente anualizado de instalação de cada fonte i e inversor. O número de instalações da fonte i e o número necessário de inversores são respectivamente N_i e N_{inv} . Como o controlador de carregamento está conectado apenas ao banco de baterias, seu custo está incluído nesta estrutura. Além disso, α é uma variável binária ativada quando qualquer restrição de (4.13) é violada e p_e é a penalidade aplicada.

$$TNPC = \sum_{i=1}^{n_{ger}} (Cp_i N_i) + Cp_{inv} N_{inv} + \alpha p_e \tag{4.15}$$

Uma vez otimizado (4.13), por um ano o custo nivelado de energia (COE) (4.16) endereçado em Sawle, Gupta e Bohre (2018) também é minimizado. O fator de recuperação de capital (CRF) (4.17) atualiza o custo, que é de natureza periódica, com r , a taxa de juros e \bar{n} , o tempo de vida do projeto.

$$COE = \frac{TNPC}{\sum_{t=1}^{8760} Pd(t)} CRF(r, \bar{n}); \tag{4.16}$$

$$CRF(r, \bar{n}) = \frac{r(1+r)^{\bar{n}}}{(1+r)^{\bar{n}} - 1} \quad (4.17)$$

4.3.2 Modelagem de Custos

Os custos dos equipamentos são compostos por uma estrutura que decorre de sua vida útil, utilização e duração do empreendimento. O custo total considera o seguinte: custo de capital C_i^k , custo de reposição C_i^{rep} , operação e manutenção $C_i^{O\&M}$ e valor residual C_i^{slg} . Assim, o custo presente anualizado de cada fonte é definido por (4.18), onde Cp_i^k é o custo presente de capital da fonte i e, da mesma forma, para os outros tipos de custos.

$$Cp_i = Cp_i^k + Cp_i^{rep} + Cp_i^{O\&M} - Cp_i^{slg} \quad (4.18)$$

O custo presente de capital é realizado apenas uma vez no início do projeto, portanto (4.19).

$$Cp_i^k = C_i^k \quad (4.19)$$

O custo de reposição é necessário quando a depreciação do equipamento atinge seu máximo e ele precisa ser substituído quantas vezes for necessário para finalizar o tempo de vida do projeto. Matematicamente, este custo presente é dado por (4.20), onde n_i representa a vida útil do equipamento i calculada pelo projeto.

$$Cp_i^{rep} = C_i^{rep} \sum_{m=0}^{\left[\frac{\bar{n}}{n_i} - 1 \right]} \frac{1}{(1+r)^{m \times n_i}} \quad (4.20)$$

O custo de operação e manutenção que tem periodicidade anual inclui o custo de troca de peças, mão de obra, manutenção preventiva e outros necessários ao bom funcionamento da estrutura de geração de energia. Este custo deve levar em consideração a média horária diária de uso do equipamento, h_i , e o modo presente é obtida por meio de (4.21).

$$Cp_i^{O\&M} = \frac{C_i^{O\&M} h_i}{CRF(r, \bar{n})} \quad (4.21)$$

O custo residual presente em (4.22) é aquele que representa um *payoff* na estrutura de custos, pois corresponde ao valor do equipamento não totalmente depreciado no final do projeto. A vida útil restante do componente ao final da vida útil do projeto é dada por (4.23), onde a vida útil do equipamento é l_i .

$$Cp_i^{slg} = C_i^k \frac{l_{rei}}{l_i} \frac{1}{(1+r)^{\bar{n}}} \quad (4.22)$$

$$l_{rei} = l_i - \left[\left(\frac{\bar{n}}{n_i} \right) - \text{trunc} \left(\frac{\bar{n}}{n_i} \right) \right] n_i \quad (4.23)$$

4.4 Metodologia

O dimensionamento dos componentes da MR híbrida requer informações técnicas e considerações gerais abordadas na Seção 4.4.1. O escalonamento do despacho das fontes é essencial para este dimensionamento e para isso a metodologia de abordagem matemática (RD) e o algoritmo proposto são discutidos, respectivamente nas Seções 4.4.2 e 4.4.3.

4.4.1 Descrição de dados

Por razões técnicas e econômicas dos consumidores, da rede elétrica e dos prossumidores associados, as seguintes suposições são estabelecidas.

- O sistema é considerado em regime permanente.
- O funcionamento da MR híbrida é monitorado 24 horas por dia.
- Os geradores podem operar simultaneamente de acordo com sua disponibilidade, exceto banco de baterias, DG e MUH que operam apenas em períodos de pico de carga.
- Os períodos de pico de carga considerados são entre 13h e 16h.
- Apenas energia fotovoltaica é usada para carregar o banco de baterias.
- Apenas cargas AC estão presentes.
- O intervalo de tempo é definido como 1 hora, portanto, durante este intervalo de tempo, as fontes e cargas não variam.
- Toda a carga é suprida.

As informações técnicas e econômicas dos elementos da MR híbrida necessários para a simulação estão listadas na Tabela 3 obtidas e estimadas com base em [Ghenai e Bettayeb \(2019\)](#), [Bhatt, Sharma e Saini \(2016\)](#), [Mohseni e Brent \(2019\)](#) e [Singh \(2016\)](#), cujos custos são indicados em dólares americanos. O custo de operação e manutenção é considerado anualizado para uma hora por dia. A vida útil do equipamento é fornecida em anos (a) ou horas (h). Um painel fotovoltaico policristalino com capacidade nominal de 1kW foi adotado como unidade para o sistema de geração solar. A eficiência de carga e descarga do banco de baterias é a mesma

Tabela 3 – Informações técnicas e econômicas de fontes da MR híbrida

Informação	Parâmetro	Valor dos componentes						
		Solar	Bio-massa	Biogás	Diesel	MUH	Bateria	Inversor
Técnica	Potência nominal (<i>kW</i>)	1	16	6	40	20	106	1200
	Eficiência	0,18	0,0035	0,1	0,30	0,70	0,90	0,96
Econômica	Custo de capital (por <i>kW</i>)	700	830	650	900	1110	100	30
	Custo de reposição (por <i>kW</i>)	700	830	650	800	1110	100	30
	Custo de operação e manutenção (por <i>kW</i>)	4	7,3	5,475	27,87	16,27	0,94	0,55
	Vida útil	20 a	20000 h	20000 h	15000 h	25 a	4000 h	25 a

e de acordo com a tabela e é considerada como 0,9. A taxa de juros de 5% ao ano e o prazo de 20 anos para o projeto completam as informações econômicas.

Considerando o valor calorífico de $40MJ/litro$ para o diesel, um gerador a diesel de $40kW$ terá o consumo de 11,2 litros por hora. O custo do diesel é considerado em $U\$0,76/litro$.

A análise é realizada para dois períodos típicos do ano no Brasil: estação chuvosa e seca. A primeira compreende o período entre os meses de outubro a março e a segunda, de abril a setembro.

A Figura 10 mostra a radiação solar horária estimada para a cidade de Rio Verde, localizada na região centro-oeste do Brasil (latitude $-17^{\circ}47'52''$ longitude $50^{\circ}55'40''$) (LABSOL, 2020). Os painéis têm um ângulo de inclinação de 45° .

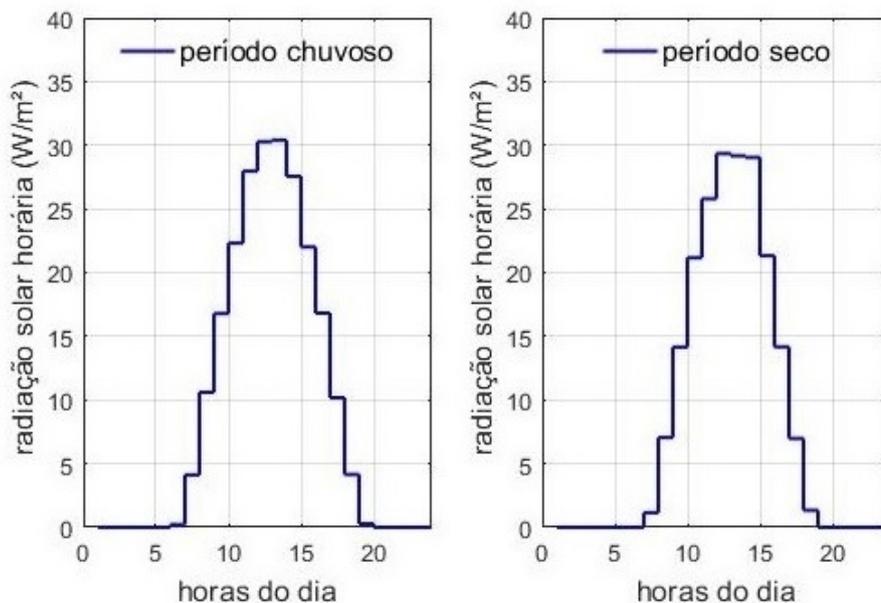


Figura 10 – Radiação solar horária

Tomando o fluxo do rio, o volume do reservatório e a capacidade da turbina da MUH,

as taxas de fluxo médias para as estações chuvosa e seca são consideradas como sendo $50m^3/h$ e $42m^3/h$, respectivamente, para uma MUH com 3 horas de operação dia e uma barragem de 7m de altura.

As usinas de biomassa e biogás permitem 0,04 toneladas e 50 kg de matéria-prima por hora, por equipamento de geração.

Em relação ao banco de baterias, a profundidade de descarga adotada é 0,8 e a eficiência de carga e descarga é de 90%.

O perfil de demanda horária é mostrado na Figura 11. O período das 13h às 16h compreende o pico de demanda, cuja MR híbrida atende sua carga e exporta para a rede. Neste período é permitida a operação de todas as fontes, os demais períodos do dia são exclusivos das fontes: PV, biomassa e biogás.

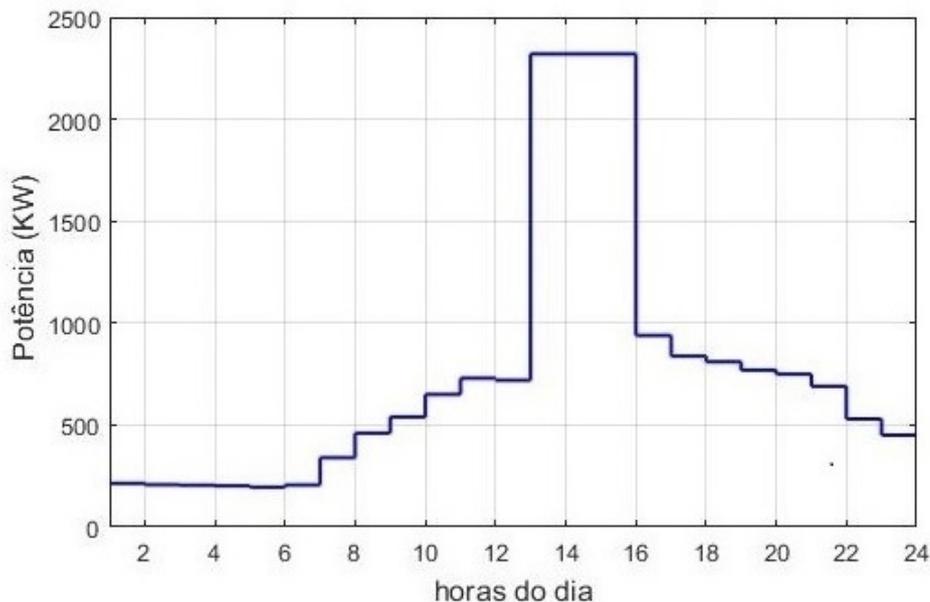


Figura 11 – Perfil horário de demanda

4.4.2 Proposta da teoria evolucionária de jogos

Baseado na seleção natural, uma proposta teórica de jogo evolucionária considera o despacho de uma fonte (indivíduo) replicando de acordo com o resultado que a estratégia retorna.

O parâmetro de avaliação de todas as estratégias é dado por uma função *fitness* média (4.24), onde $f_i(p_i(t))$ é a função de aptidão da estratégia p do indivíduo de fonte i no instante t .

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{Pd(t)} \sum_{i=1}^{n_{ger}} [p_i(t) f_i(p_i(t))] \quad (4.24)$$

O RD é apresentado de acordo com a equação diferencial (4.25). Assim, a taxa de crescimento per capita de cada população varia em função do tempo e é dada pela diferença

entre a aptidão do indivíduo i e a aptidão média da população. A frequência de i muda conforme seu condicionamento difere da média populacional.

$$\dot{p}_i(t) = p_i(t) [f_i(p_i(t)) - \bar{f}(t)] \quad (4.25)$$

O RD sujeito às restrições de (4.13) produz a curva que aloca várias combinações de fontes de energia para atender a carga solicitada. A replicação se estabiliza, ou seja, o despacho ao longo do tempo e os parâmetros de planejamento do projeto tornam-se constantes quando não é mais possível reduzir o custo da instalação. Em termos evolucionários, a estabilização ocorre quando todos os tipos de população tem a mesma taxa de reprodução, assim, a composição da mesma permanece inalterada após determinado instante. Este critério atendido resulta em um ponto ótimo. Neste ponto, não há mudança no planejamento de despacho ou nas instalações físicas. Observa-se o maior retorno para a coalizão da MR híbrida de prosumidores e nenhum desvio produz um melhor resultado, portanto, este, é um ponto EN cooperativo estável.

4.4.3 Algoritmo

Uma estimativa inicial do despacho horário em função da potência máxima de cada fonte é obtida por (4.26). O procedimento de avaliação do problema é listado através do Algoritmo 3. O algoritmo requer como dados de entrada as quantidades de recursos energéticos das fontes como radiação solar, resíduos de animais e plantas e fluxo de água, potência nominal unitária dos geradores, eficiências, carga da bateria e outros. Os dados econômicos listados na Tabela 3 também são necessários. Um s (tamanho do passo) de 0,1 e um intervalo (f_{seg}), que permite a segurança operacional da rede da ordem de 20kW para geradores demandados em seu limite são também utilizados. Em termos de convergência e adequação algorítmica, quanto mais curto for o passo (s), mais rápida será a convergência, porém maior deverá ser a faixa de segurança para a operação segura dos geradores.

$$p_i(t) = \frac{N_i^{max} P_i(t)}{\sum_{i=1}^{n_{ger}} (N_i^{max} P_i(t))} Pd(t) \quad (4.26)$$

No algoritmo, após cálculos preliminares - etapas 1 a 3, de $P_i(t)$, ou seja, a potência de uma unidade de equipamento i e despacho ($p_i(t)$), o número ótimo de equipamentos é obtido na etapa 5 para a bateria (N_{bat}) e para as outras fontes (N_i). As horas médias diárias de uso (h_i) e a vida útil (n_i) em anos de equipamento no projeto são usados para identificar os custos de reposição e residuais, sendo calculados nas etapas 6 e 7, respectivamente. Esses parâmetros também são calculados para o inversor ($n_{ger} + 1$).

A função *fitness* ($f_i(t)$) (4.27) adotada na etapa 13 envolve a relação benefício-custo de cada fonte em cada instante para todo o período analisado. Essa relação é a razão entre a produtividade marginal e o custo instantâneo para cada estratégia de despacho dado por (4.28).

As fontes de energia têm produtividade marginal constante para o mesmo período do ano, exceto a fonte solar, que varia de acordo com a radiação horária ao longo do dia.

Algoritmo 3: Procedimento de solução do problema (4.13)

Entrada: $M_{pv}(t), M_{bm}(t), M_{bg}(t), Q(t), DOD, R_{pv}, R_{pbm}, R_{pbg}, R_{pdie}, R_{pmhp}, R_{pbat}, R_{pinv}, \eta_{pv}, \eta_{bm}, \eta_{bg}, \eta_{die}, \eta_{mhp}, \eta_{bat}, \eta_{inv}, l_{pv}, l_{bm}, l_{bg}, l_{die}, l_{mhp}, l_{bat}, l_{inv}, Am, CV_{bm}, CV_{bg}, E_{bat}^{min}, E_{bat}^{max}, H, N_{pv}^{max}, N_{bm}^{max}, N_{bg}^{max}, N_{die}^{max}, N_{mhp}^{max}, N_{bat}^{max}, N_{inv}^{max}, c_{pv}^k, c_{bm}^k, c_{bg}^k, c_{die}^k, c_{mhp}^k, c_{bat}^k, c_{inv}^k, c_{pv}^{rep}, c_{bm}^{rep}, c_{bg}^{rep}, c_{die}^{rep}, c_{pv}^{O\&M}, c_{mhp}^{rep}, c_{bat}^{rep}, c_{inv}^{rep}, c_{bm}^{O\&M}, c_{bg}^{O\&M}, c_{die}^{O\&M}, c_{mhp}^{O\&M}, c_{bat}^{O\&M}, c_{inv}^{O\&M}, Pd(t), \bar{n}, r, n_{ger}, s, f_{seg}, T \leftarrow 24, p_e \leftarrow 10^6, M \leftarrow 10^3$

Saída: $N_{pv}, N_{bm}, N_{bg}, N_{die}, N_{mhp}, N_{bat}, N_{inv}, N_{pv}^{bat}, h_{pv}, h_{bm}, h_{bg}, h_{die}, h_{mhp}, h_{bat}, h_{inv}, n_{pv}, n_{bm}, n_{bg}, n_{die}, n_{mhp}, n_{bat}, n_{inv}, TNPC, COE$

// Início

1. Calcule a capacidade de cada unidade de geração por meio de : (4.1) - (4.12);
2. Calcule a máxima potência de cada fonte por meio de : (4.14);
3. Gere uma solução inicial ($p_i^0(t)$) por meio de : (4.26);
3. **Para** ($k \leftarrow 1$: iterações) faça
4. **Para** ($i \leftarrow 1$: $n_{ger} + 1$) faça
5. $N_i^k = \frac{\max(p_i(t))}{P_i(t)|_{\text{argmax}(p_i(t))}}$; $N_{bat}^k = \frac{\sum_{t=1}^T (p_{bat}(t))}{P_i(t)}$;
6. $h_i^k = \frac{\sum_{i=1}^{24} P_i^{max} P_i(t)}{\sum_{i=1}^{24} P_i(t)}$;
 $N_i = \frac{\sum_{i=1}^{24} P_i(t)}{\sum_{i=1}^{24} P_i(t) \neq 0}$
7. $n_i^k = \frac{l f_i}{365 h_i}$;
8. Calcule o custo total de acordo com (4.15) - (4.23);
9. **Para** ($t \leftarrow 0$: T) faça
10. **Para** ($i \leftarrow 1$: $n_{ger} | P_i(t) \neq 0$) faça
11. $c_i^{hour} = \frac{C p_i}{p_i(t)}$;
12. $f_i(t) = \frac{P_i(t)}{c_i^{hour}}$;
13. **Se** ($p_i(t) > P_i^{max}(t) - f_{seg}$)
14. *Matenha* $p_i(t)$ e conte i ;
15. $Pd(t) = Pd(t) - \sum_{i=1}^{i \text{ count}} p_i(t)$;
16. *Para as outras fontes*
17. $(t) = p_i(t) f_i(t) \frac{1}{Pd(t)}$;
18. **Senão**
19. $\bar{f}(t) = \sum_{i=1}^{n_{ger}} p_i(t) f_i(t) \frac{1}{Pd(t)}$;
- // Atualize o despacho
20. $p_i^k(t) = \frac{\frac{1}{s} + f_i(t)}{\frac{1}{s} + \bar{f}(t)} p_i^{k-1}(t)$;

$$f_i(t) = \frac{P_i(t)}{c_i^{hour}}; \quad (4.27)$$

$$c_i^{hour} = \frac{C p_i}{p_i(t)}; \quad (4.28)$$

Como prioridade, o carregamento do banco de baterias é realizado no instante t quando ocorre o excesso de geração solar, ou seja, $N_{pv}P_{pv}(t) > p_{pv}(t)$. Se o banco de baterias estiver totalmente carregado e ainda houver energia restante, o excesso de geração é descartado. Se não houver excesso ou não for suficiente para o carregamento máximo do banco, uma estrutura de geração PV (N_{pv}^{bat}) é projetada exclusivamente para carregar a bateria de acordo com (4.29).

$$N_{pv}^{bat} = \frac{\sum_{t=1}^T [SOC(t) - (N_{pv}P_{pv}(t) - p_{pv}(t))]}{\sum_{t=1}^T P_{pv}(t)} \quad (4.29)$$

5 Estudos de Caso

Uma investigação aplicada a uma rede elétrica e considerando um mercado local constituído por MRs é o objeto da Seção 5.1 para a abordagem macro cujo objetivo é a alocação eficiente dos bens entre os agentes. Com base no resultado desta, um perfil de demanda é um dos requisitos de entrada para a avaliação da abordagem micro que visa uma nova função de aptidão para quantificar o despacho da MR híbrida abordado na Seção 5.2

5.1 Caso Macro

Um mercado local de MRs é constituído para uma rede de distribuição cuja eficiência e justiça de mercado é obtida a partir do emprego da teoria de jogos associada a uma ferramenta gráfica. Os resultados dessa abordagem são discutidos na Subseção 5.1.1.

5.1.1 Resultados e Discussão

Uma rede de distribuição de 13 barras modificada é apresentada na Figura 12 obtida em IEEE (2020), sendo utilizada para o estudo do caso macro.

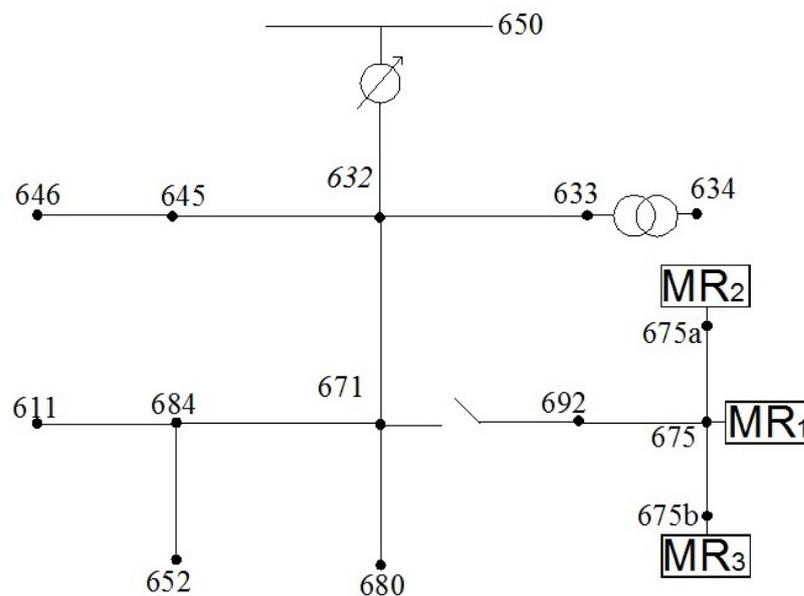


Figura 12 – Rede 13 barras IEEE adaptada

A microrrede 1, MR_1 , é conectada ao barramento 675 e fornece a carga do barramento original. Como 675 é o maior barramento trifásico de carga da vizinhança, esta é a barra escolhida para a conexão das MRs. A microrrede MR_1 tem maior proximidade a carga da barra em questão, e por isso, é considerada a MR grande, além disso, MR_1 está localizado na parte central

do ramal 671-675. As outras MRs adicionadas, MR₂ e MR₃, são instalados mais remotamente em relação a MR₁, por isso, são consideradas MRs associadas (jogadores associados). Essas três MRs constituem o mercado local em análise.

Um cenário de carregamento para as barras cujas MRs estão conectadas é observado na Tabela 4. A distância citada na tabela refere-se ao barramento 675 da rede, i.e., o quanto cada MR dista do ponto central do barramento citado. As MRs operam com fator de potência unitário e a chave localizada entre as barras 671 e 692 opera fechada.

Assumimos que as MRs são híbridas, portanto, esses agentes são capazes de sustentar os contratos de venda lastreados em um *mix* de recursos renováveis e não renováveis. Na caixa de Edgeworth, um possível conjunto de curvas de operação para o problema (3.4) e o conjunto de otimização convexa para o sistema em estudo são ilustrados na Figura 13. O eixo das ordenadas relaciona a redução da perda total de acordo com (3.5). O conjunto convexo de otimização da figura é formado pela curva côncava mais distante: a azul contínua do eixo *i* e a vermelha descontínua do eixo *-i*. Por ajuste não linear, essas curvas são dadas por (5.1) e (5.2) conforme mencionado na Subseção 3.4.1. A cônica inicial possui a matriz normalizada (5.3).

Tabela 4 – Carga e distância da barra 675

Microrrede	Carga						Distância (ft)
	fase a		fase b		fase c		
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	
MR ₁	480	190	68	60	290	212	50
MR ₂	185	90	48	40	210	92	600
MR ₃	125	90	38	20	110	72	400

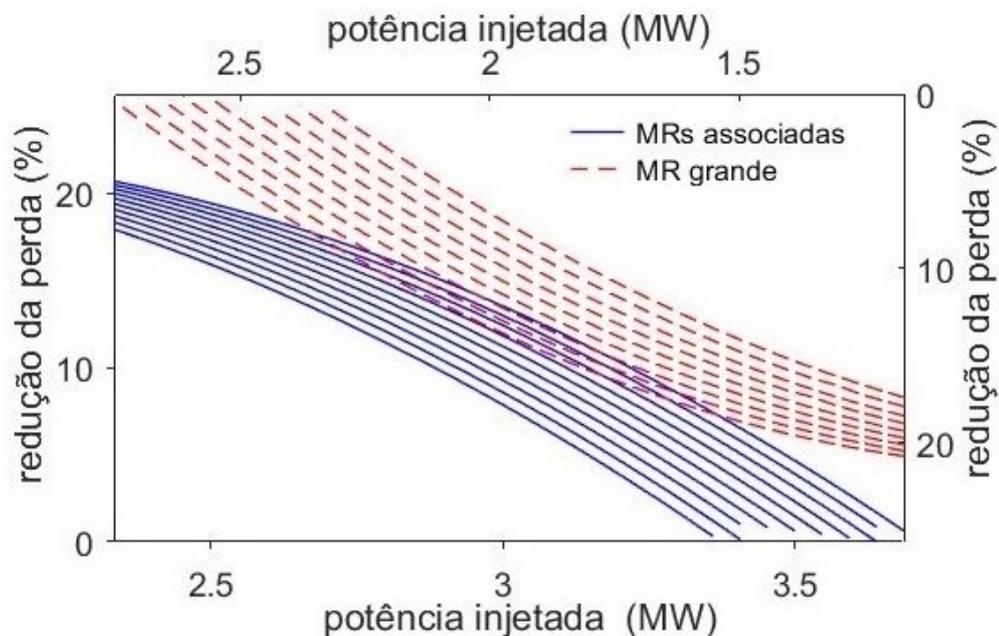


Figura 13 – Caixa de Edgeworth de variáveis elétricas para a rede 13 barras modificada

$$A_i = \begin{bmatrix} -2.7841 & -0.8322 & 2.5805 \\ -0.8322 & -0.3065 & 0.7912 \\ 2.5805 & 0.7912 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$A_{-i} = \begin{bmatrix} -4.4332 & -1.8075 & 2.1630 \\ -1.8075 & -3.6532 & 3.1952 \\ 2.1630 & 3.1952 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9341 & 0.3207 & -0.9455 \\ 0.3207 & 0.1190 & -0.3365 \\ -0.9455 & -0.3365 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Pressupõe-se que a remuneração (preço) da MR está de acordo com o seu planejamento, portanto as MRs competem em potência injetada. Um processo iterativo de condições de KKT do Algoritmo 2 é aplicado ao segundo problema de otimização multiobjetivo (3.6). Para cada sequência limitada, existe x_i, x_{-i}, y_i, y_{-i} , que satisfaz as condições KKT.

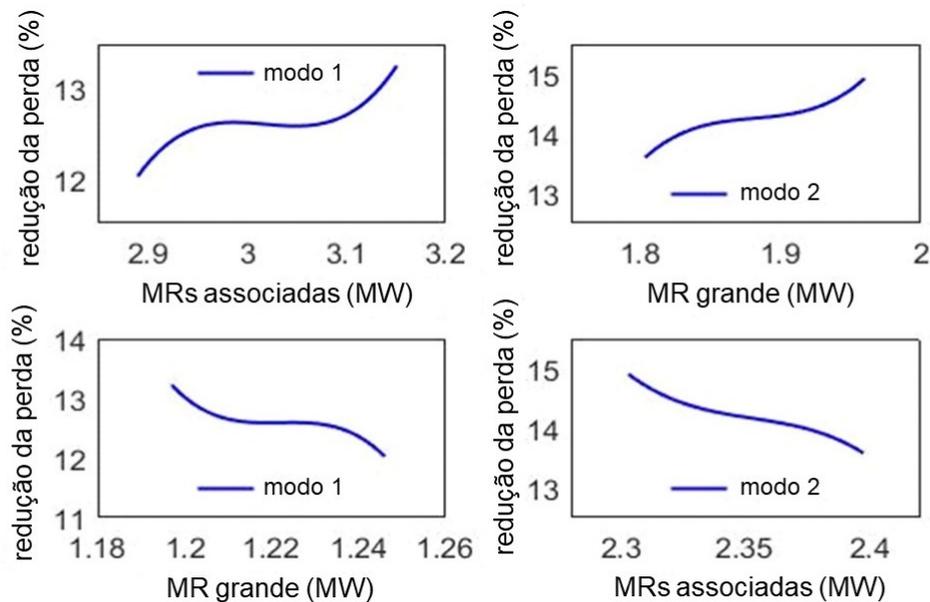


Figura 14 – Curvas de contrato de variáveis elétricas

Uma vez que o EN também pode ser obtido por teoremas de ponto fixo (Rosen, 1965), pode-se esperar que todos os EN obtidos sejam também não degenerados. Assim, o ponto E da Figura 6 é obtido para todas as curvas, este resultado pode ser observado na Figura 14 para

os modos 1 e 2 de operação, e é chamada de curva de contrato. Esta curva contém todos os pontos de EN e EP e mostra o perfil de operação das MRs e os benefícios das concessionárias e consumidores para os dois modos de operação. Qualquer ponto EN oferece duas possibilidades de operação, de modo que ao OSD é permitido escolher o melhor modo para o sistema. Para o modo 1 de operação, as MRs associadas podem gerar de 2,90 a 3,14 MW, para a MR grande a faixa de potência é de 1,19 a 1,24 MW e a faixa de redução de perdas é de 12,12 % a 13,24 %. Da mesma forma, para o modo 2, as MRs associadas operam de 2,30 a 2,41 MW, a MR grande de 1,80 a 1,95 MW e a redução de perdas é de 13,60 % a 14,93 %.

A posição central oferecida às MRs associadas favorece sua considerável participação de mercado, inclusive ultrapassando a participação da MR grande, beneficiando operacionalmente a rede e promovendo justiça para o mercado local de energia, pois favorece os prosumidores menores, aqui consideradas as MRs associadas.

A presente simulação foi realizada em um computador processador Intel Core i5 com 3,1 Ghz de velocidade de processamento e 16 GB de memória RAM, com tempo médio aproximado de 580s para solução de processos multiobjetivo: (3.4)e(3.6)

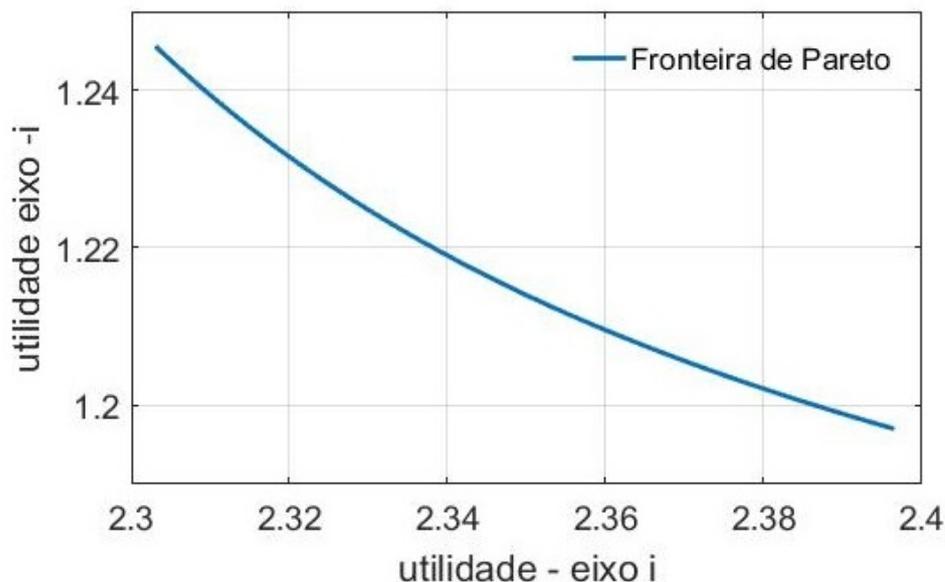


Figura 15 – Curva de eficiência de Pareto para MRs, consumidores e concessionária

Seja qualquer ponto sob a curva de contrato, nenhum agente pode aumentar sua utilidade a menos que diminua a de outros. Pontos EP assim como EN representam um conceito forte, pois significa que os ganhos comerciais mútuos se esgotaram. A fronteira EP é aquela que contém as funções objetivo de valores não dominados, ilustrados na Figura 15 cujos eixos representam a utilidade. Como o eixo i corresponde as MRs associadas, o outro (eixo $-i$) representa a MR grande junto as concessionárias e consumidores. De outra forma, o eixo $-i$ representa

apenas a MR grande e o eixo i agrega as utilidades das MRs associadas, concessionárias e consumidores, de acordo com os modos de operação relatados na Subseção 3.3.2.

Os ganhos de Nash são mutuamente vantajosos para os agentes envolvidos. O maior ganho de utilidade para todos é observado quando eles estão localizados na intersecção das curvas de menor utilidade, ou seja, pontos como W ou Z na Figura 6. Usando a técnica de redução de volume cônica proposta para resolver o problema (3.6) um caminho ortogonal interno, move esses pontos em direção a um EN localizado no centro da figura. Esses ganhos de utilidade são os maiores possíveis para ambos os eixos e são mostrados na Figura 16, assim como o processo de redução de volume da cônica. Outros ganhos de utilidade são verificados para qualquer ponto de operação possível em que um caminho de alocação se mova em direção à curva de contrato. Como a utilidade do eixo i envolve a participação das MRs associadas, estes também são privilegiados pelo modelo para obtenção de maior ganho de utilidade. Para este exemplo, o ganho de utilidade envolvendo as MRs associadas é 88% maior do que envolvendo MR grandes.

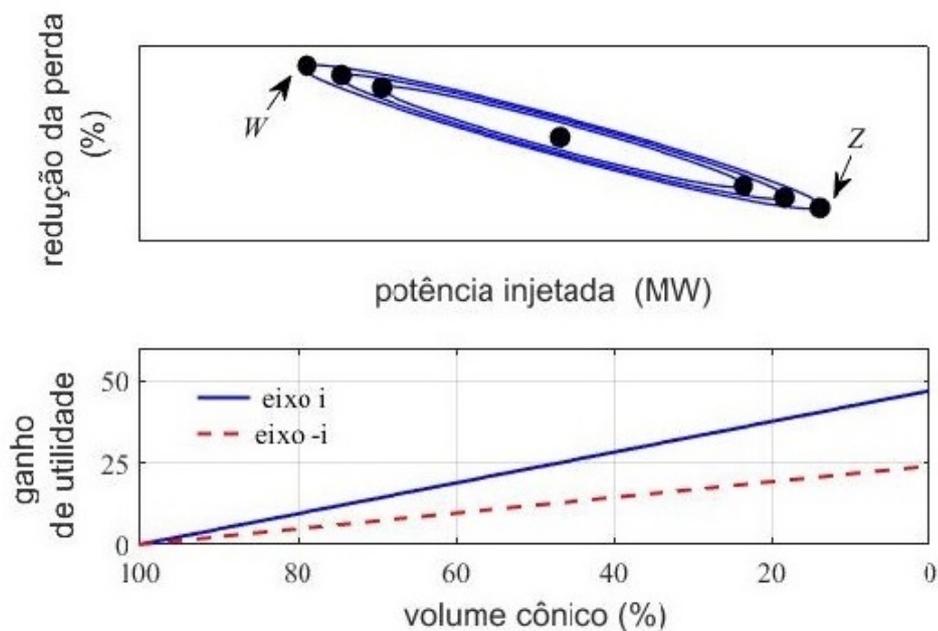


Figura 16 – Desenvolvimento do método e ganho de utilidade dos participantes

Como em Nash, todas as soluções de Pareto são igualmente importantes, todas são não dominadas. Como mencionado anteriormente, um aspecto prático e interessante da eficiência de Nash e Pareto é a exclusividade de equilíbrio. Aplicada a região elíptica inicial, qualquer combinação convexa da função de peso com $\sum_{i=1}^{\bar{n}} r_i = 1$ fornece uma operação da curva de contrato.

A distribuição discriminatória de $r = [r_i, r_{-i}]$ e a escolha booleana para o modo de configuração do jogo listado na subseção 3.3.2 não é apenas um mecanismo de equilíbrio exclusivo,

mas também um meio pelo qual o regulador pode modificar as utilidades dos *stakeholders*, inclusive, favorecendo as MRs associadas, se assim desejar para a política local. A Tabela 5 relaciona alguns equilíbrios normalizados escolhendo os pesos: $1^-; 0,75; 0,5; 0,25; 0^+$ para a utilidade do eixo i . A utilidade do eixo $-i$ é igual a operação (injeção de potência) da MR grande para o modo 1 de configuração do jogo, o mesmo ocorre para o eixo i se o modo 2 for arbitrado. Por exemplo, em $r_i = 1^-$ e se o modo 1 for selecionado pelo regulador, as MRs associadas e a MR grande injetam na rede, respectivamente, 3,14 e 1,19 MW, sendo este último a utilidade da MG grande. A utilidade das MRs associadas, concessionárias e consumidores é de 2,39. A operação dos agentes resulta em 13,24% de redução de perdas para a rede. Nesse sentido, conforme Rosen (1965), esses pontos são estáveis e a análise pode ser realizada quando o jogo é considerado convexo, ou mesmo côncavo-convexo, como é o caso deste.

Tabela 5 – Exemplos de pontos eficientes exclusivos de Nash e Pareto

Peso (r_i)	Modo do jogo	Utilidade do eixo i	Utilidade do eixo $-i$	Potência injetada pelas MRs associadas (MW)	Potência injetada pelas MR grande (MW)	Redução da perda (%)
1^-	1	2,3971	1,1972	3,1494	1,1972	13,24
0,75	2	2,3738	1,2097	2,3738	1,8341	14,02
0,50	1	2,3502	1,2214	3,0021	1,2214	12,65
0,25	2	2,3268	1,2336	2,3268	1,9158	14,37
0^+	1	2,3035	1,2465	2,9030	1,2465	12,12

5.2 Caso Micro

Algumas combinações de fonte de uma MR híbrida instalada em uma área agroindustrial são propostas na seção 5.2.1, os resultados obtidos para a região em análise são relacionadas em 5.2.2. Uma análise de viabilidade do empreendimento é realizada na Subseção 5.2.2.1, sequencialmente uma análise de sensibilidade e incerteza acerca do custo do projeto é discutida em 5.2.2.2.

5.2.1 Qualificação da localização e propostas de projeto

Uma pré-condição para a produção de energia elétrica em larga escala a partir da biomassa é a existência de uma região com grande área plantada fornecedora de matéria-prima para a usina. O estudo de caso analisado compreende a cidade de Rio Verde localizada no sudoeste do estado de Goiás, região centro-oeste do Brasil. A cidade tem uma população de quase 250 mil habitantes, sendo o maior produto interno bruto agrícola do estado e um dos maiores do Brasil (IBGE, 2020). Em sua área rural, no entorno da área urbana, são instaladas empresas de manejo agrário e animal, com ênfase em empresas de suinocultura e processamento de grãos.

Rio Verde é o maior produtor goiano de soja e sorgo. Para esses grãos, Rio Verde é, respectivamente, nono e primeiro lugar em produção no Brasil (IBGE, 2020). Na pecuária, é a primeira cidade do estado em produção de cabeças de suínos e frangos, além de possuir um grande rebanho bovino. Na suinocultura ocupa a segunda posição no Brasil, sendo destaque nacional para a balança comercial nesse quesito (IBGE, 2020). A região sudoeste goiana possui grande disponibilidade de cursos d'água (INPE, 2020). Além disso, a região centro-oeste do Brasil apresenta o melhor índice pluviométrico do país, 2500mm -3000mm por ano (INPE, 2020).

A colheita da soja ocorre de janeiro a abril e a colheita do sorgo ocorre de junho a agosto. Resíduos de soja e sorgo são usados para produção de energia nas estações chuvosa e seca, respectivamente.

Os valores caloríficos para soja e sorgo são considerados 18 MJ/kg e 17 MJ/kg, respectivamente (OMAFRA, 2020).

Cinco casos são propostos, a fim de analisar o despacho econômico. A configuração assumida para cada caso é fornecida abaixo.

- Caso I: PV/biomassa/biogás/DG.
- Caso II: PV/biomassa/biogás/MUH.
- Caso III: PV/biomassa/biogás/banco de baterias.
- Caso IV: PV/biomassa/biogás/DG/banco de baterias.
- Caso V: PV/biomassa/biogás/DG/MUH/banco de baterias.

Tabela 6 – Número máximo de instalações

Casos	Fontes						
	Solar	Biomassa	Biogás	Diesel	MUH	Bateria	Inversor
I	18000	60	80	30	-	-	5
II	18000	60	80	-	50	-	5
III	18000	60	80	-	-	18	5
IV	18000	60	80	15	-	18	5
V	18000	60	80	10	20	18	5

Considerando uma área média de 2,2 m^2 para cada estrutura de painel, uma área de 39,600 m^2 é destinada para a finalidade de geração solar. Com base na produtividade dos grãos utilizados e rejeitos animais, uma área de 10 ha é destinada para o plantio de grãos e para geração de biogás é utilizado um rebanho de 30.000 suínos (FREITAS et al., 2019; BHATT; SHARMA; SAINI, 2016; IBGE, 2020). A capacidade da planta de MHP é de até 1200

kW . Duas áreas, cada uma com $600 m^2$, destinam-se à geração a diesel e armazenamento por baterias. Com base nessas condições, o número máximo permitido de instalações de cada fonte (N_i^{max}) é apresentado na Tabela 6.

5.2.2 Resultados e Discussão

Uma vez aplicado o Algoritmo 3 para as configurações de MR híbrida elencadas na subseção 5.2.1, as Figuras 17 e 18 mostram o processo de estabilização das curvas, respectivamente para as curvas de custo TNPC e COE. Por meio dessas curvas e, mais precisamente, da Tabela 7, fica claro que o caso V tem o melhor desempenho econômico, seguido pelos casos II, III, IV e I para TNPC e COE.

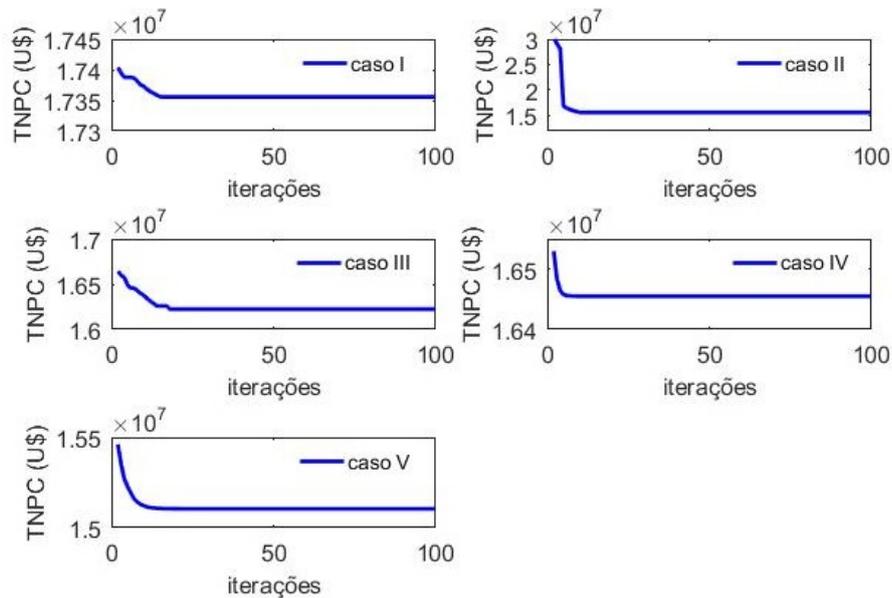


Figura 17 – Curvas do TNPC

O Caso V compreende a utilização de fontes de PV, biomassa, biogás e alternativamente a DG, o banco de baterias e a MUH, seguido do caso II que considera apenas o MUH como fonte alternativa para o período de exportação. Entre esses casos a diferença de custo de projeto (TNPC) e custo nivelado (COE) é de 3,45%, esse percentual revela-se maior quando compara-se o caso III ou com os demais casos analisados que não envolvem o número de alternativas de fontes que o caso V possui. O caso I, que alternativamente inclui apenas o DG, apresenta-se como o menos desejado economicamente.

Na Figura 18 para o caso V o ponto de menor custo na curva COE corresponde a US\$ 187,40/MWh, este é o menor custo possível de energia entre os casos analisados. Deve-se notar que este cálculo do COE não leva em consideração a carga de despejo de acordo com (4.16), caso contrário, esse custo seria ainda menor. Os preços praticados nos mercados brasileiros não conseguem remunerar os investimentos da MR, contudo a permanente redução dos custos dos equipamentos e as novas estratégias de remuneração poderão incluir valoração para o descon-

gestionamento de rede, redução de tarifa de uso da rede, redução das perdas elétricas e ganhos de imposto verde (créditos de carbono) tendem a permitir a viabilidade do investimento.

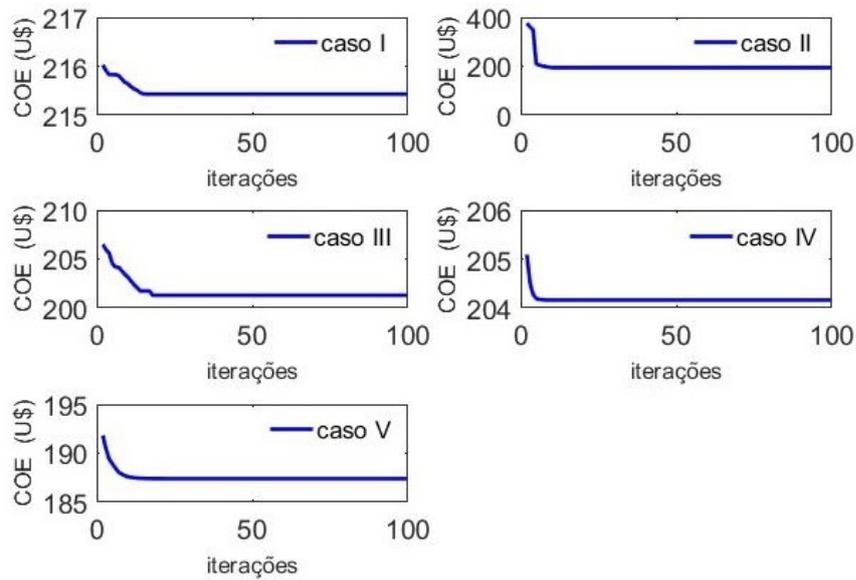


Figura 18 – Curvas do COE

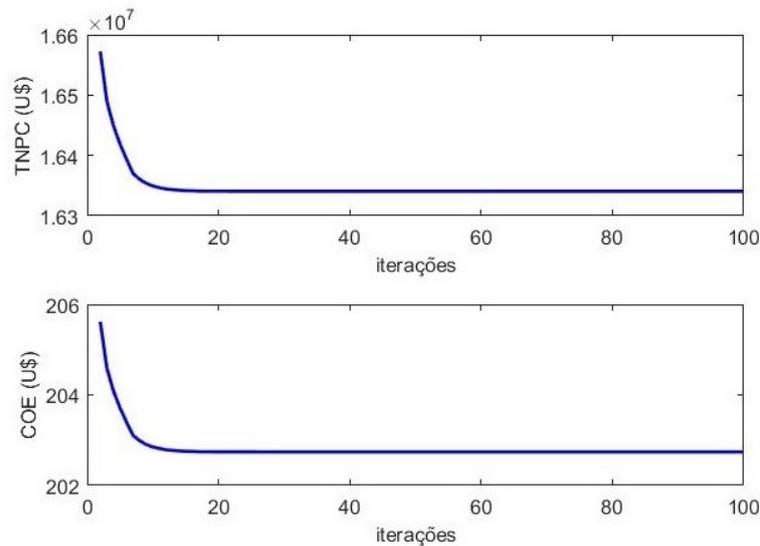


Figura 19 – TNPC e COE para o caso II com mais restrição de fonte

Um caso mais restritivo do caso II é apresentado na Figura 19. Nesse caso a vazão combinada do rio e do sistema de armazenamento é reduzida a metade para as duas estações: úmida e seca. O custo total (TNPC) estabiliza-se em US\$ 16.340 milhões e o COE em US\$ 202,74, ou seja, 4.45% acima do custo obtido para o caso mais favorável de recurso hídrico disponível para o horário de pico.

A Tabela 8 lista para cada caso os parâmetros calculados no Algoritmo 3: o número necessário de equipamentos (N), a vida útil média de cada equipamento (n) em anos e as horas

Tabela 7 – Custos das MRs híbridas

Casos	Custos	
	TNPC (em milhões US\$)	COE (em US\$/MWh)
I	17.356	215,43
II	15.640	194,10
III	16.224	201,29
IV	16.452	204,16
V	15.101	187,40

Tabela 8 – Parâmetros de projeto

Caso	Parâmetro	Fontes						
		Solar	Biomassa	Biogás	DG	MUH	Bateria	Inversor
I	N	14316	46	69	19	-	-	2
	n	20	4,0945	4,4567	16,4194	-	-	25
	h	7,7253	13,3825	12,2945	2,5029	-	-	3,8804
II	N	14497	47	63	-	47	-	2
	n	20	5,0105	5,1666	-	24,057	-	25
	h	7,6262	10,936	10,606	-	3,1121	-	3,6229
III	N	14039	45	71	-	-	18	2
	n	20	4,0151	4,5342	-	-	11,2563	25
	h	8,0314	13,6621	12,0852	-	-	0,9736	4,0389
IV	N	12665	46	65	11	-	13	2
	n	20	4,0603	4,2784	14,565	-	11,253	25
	h	8,5946	13,495	12,809	2,8062	-	0,9784	4,3051
V	N	11372	45	66	6	14	14	2
	n	20	4,1956	4,5572	16,054	26,553	11,763	25
	h	8,2309	13,0671	12,073	2,556	2,8239	0,9316	4,1241

médias de uso por dia para uma unidade de geração (h). Quando o sistema apresenta uma única fonte extra para os horários de pico (casos I, II e III), essa fonte é utilizada em sua capacidade máxima ou próxima a ela: Para o caso I, 19 DG são utilizados em 30 possíveis, para o caso II, 47 MUH são usados em 50 e para o caso III, todas (18) as unidades de bateria permitidas são empregadas. Também é possível observar o intensivo uso da bateria, que é utilizada próxima do máximo possível para todos os casos que estão disponíveis. Além desta, a MUH é também empregada de modo intensivo para o caso V, 70% das unidades disponíveis são empregadas, o DG emprega 60% e o banco de baterias, 77,77% da disponibilidade para o caso em questão.

Do ponto de vista econômico, observando especialmente os casos I, II e III para o período de pico de carga, a ordem de melhores escolhas envolve primeiramente a MUH, em seguida o banco de baterias e, por fim, o DG, o que é observado também para a condição do caso V.

A vida útil dos equipamentos no projeto em anos é calculada de acordo com a média de horas diárias de uso de cada unidade. Para o caso V, cada DG precisa ser substituído após 16,054 anos e opera em média 2,556 horas por dia, uma unidade de bateria tem uma vida útil de 11,763 anos operando a 0,9316 horas no dia. Vale ressaltar que a MUH, o PV e o inversor não requerem custos de reposição no projeto, ou seja, n_{mhp} , n_{pv} e n_{inv} são maiores que \bar{n} .

A estratégia de despacho para o caso V para as estações chuvosa e seca é mostrada na Figura 20. Nesta figura, é possível identificar a intensa operação da fonte solar para o período de pico/exportação (13h às 16h), observa-se também que o funcionamento da bateria, do DG e da MUH estão restritos a este período. Por razões de segurança e preservação da vida útil das baterias, estas não são carregadas enquanto estão descarregando, a possibilidade de carregar aquelas que já foram descarregadas durante o período de pico também não é possível porque a carga de despejo neste período é insuficiente. Portanto, economicamente, o banco de baterias é despachado no esquema 4/4/6, ou seja, 4 unidades no primeiro intervalo de exportação (13h às 14h), 4 unidades no segundo (14h às 15h) e 6 unidades na terceira (15h às 16h). Durante o período de exportação há uma prevalência do despacho do banco de baterias e da MUH, este sendo mais intenso no período chuvoso: 526 MW, 527MW e 533 MW para os intervalos horários do período de pico da carga, para a mesma estação o DG despacha 63,45 MW, 63,58 MW e novamente 63,74 MW, mantendo patamares ligeiramente inferiores a esses para a estação seca, o mesmo ocorre para o banco de baterias que torna-se mais solicitado em decorrência da redução do volume de água disponível na estação, o banco despacha 236 MW, 247 MW e 463 MW para os intervalos horários de exportação durante a estação de menor índice pluviométrico. Nos períodos de indisponibilidade de energia solar, ocorre o despacho mais intenso de geradores de biomassa e biogás, principalmente à noite, que se caracteriza pela segunda maior demanda do dia. Entre estes, a contribuição da biomassa é sempre maior ao longo do dia.

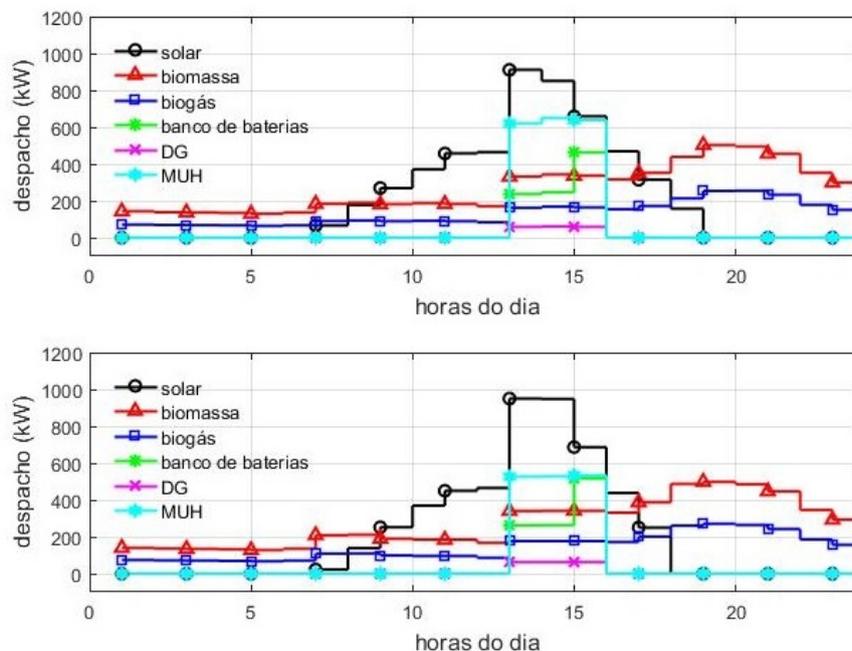


Figura 20 – Despacho - caso V - estações úmida (acima) e seca (abaixo)

Um exemplo de estabilização de despacho para cada agente é mostrado na Figura 21 para o período entre 14h e 15h do dia da estação chuvosa. Para melhor visualização, a solicitação em p.u. é adotada considerando o despacho obtido na Figura 20 como base. A replicação garante a estabilidade de todas as fontes em aproximadamente 15 iterações.

O perfil de carga de despejo para o caso V é mostrado na Figura 22, para as estações chuvosa e seca. A carga total de despejo sem o banco de baterias para as estações chuvosa e seca são, respectivamente, 3271,8 kW e 2602,5 kW. Quando o banco de baterias está presente, os valores obtidos são 2226,1 kW e 1449,6 kW, respectivamente para as estações supracitadas. Esses resultados mostram uma redução na carga de despejo de 31,96% para a estação úmida e 44,29% para a seca.

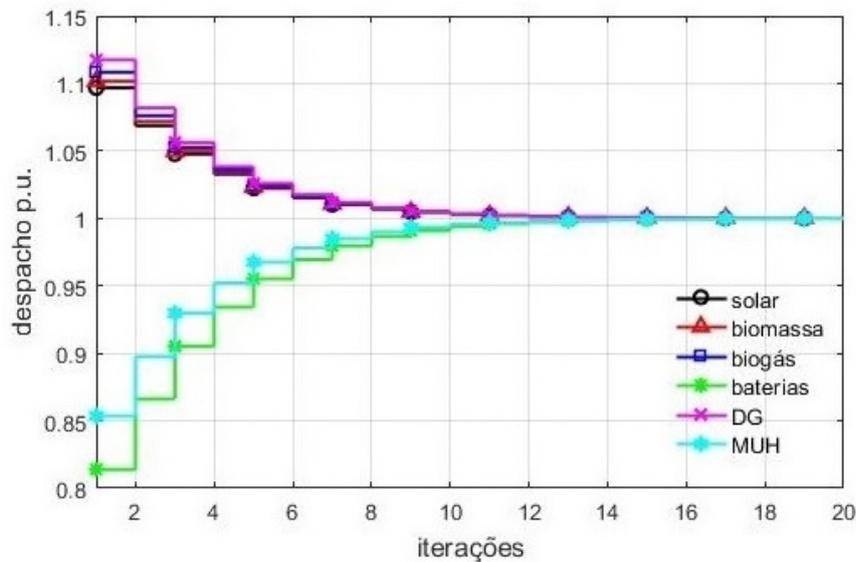


Figura 21 – Estabilização do despacho - 14h a 15h estação úmida - caso V

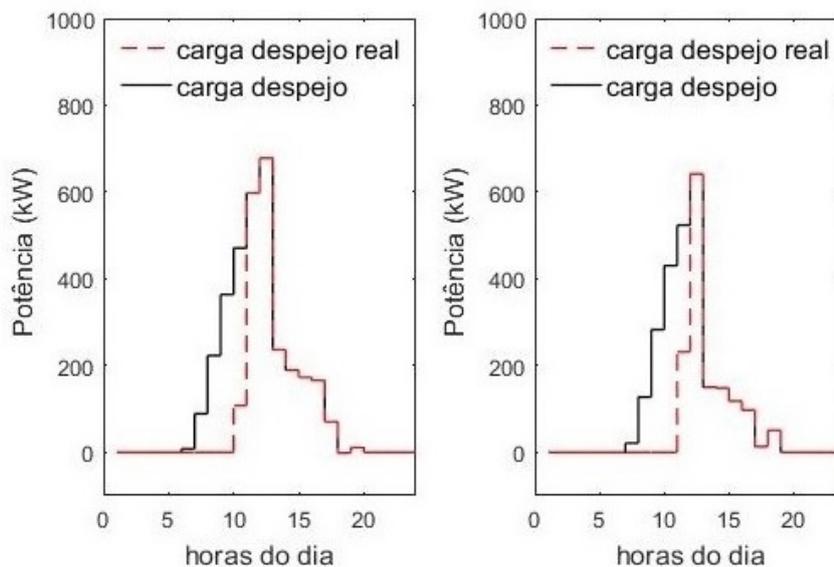


Figura 22 – Perfis de carga de despejo - caso V - úmido (direita)/seco (esquerda)

O carregamento do banco de baterias ocorre principalmente no período da manhã das 6h às 11h para o período úmido e de 7h às 11h para o período seco. Por motivos operacionais, o banco de baterias não é carregado após as 16h, período de baixa radiação solar.

Para os casos envolvendo estrutura de baterias, o excesso de potência fornecido pelo sistema fotovoltaico projetado pode abastecer o banco de baterias por completo, sem a necessidade de um sistema acoplado para esta finalidade, ou mesmo complementação.

A porcentagem do despacho total para ambos os períodos por fonte para o caso V é mostrada na Figura 23. Observa-se que prevalecem as fontes biomassa de origem vegetal (36,19% do total), animal (18,57%) e solar (28,67%), o banco de baterias participa com 5,63% do total de potência, a MUH corresponde a 9,88% e apenas 1,04% para o DG, dessa forma o sistema é fortemente renovável, um dos objetivos desejados na ideia inicial de projeto.

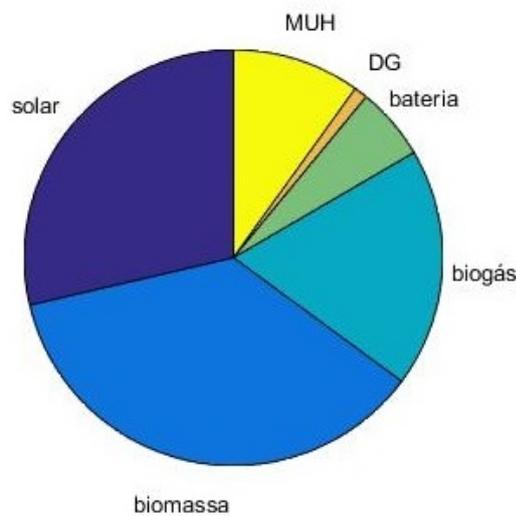


Figura 23 – Participação percentual do despacho total por fonte - caso V

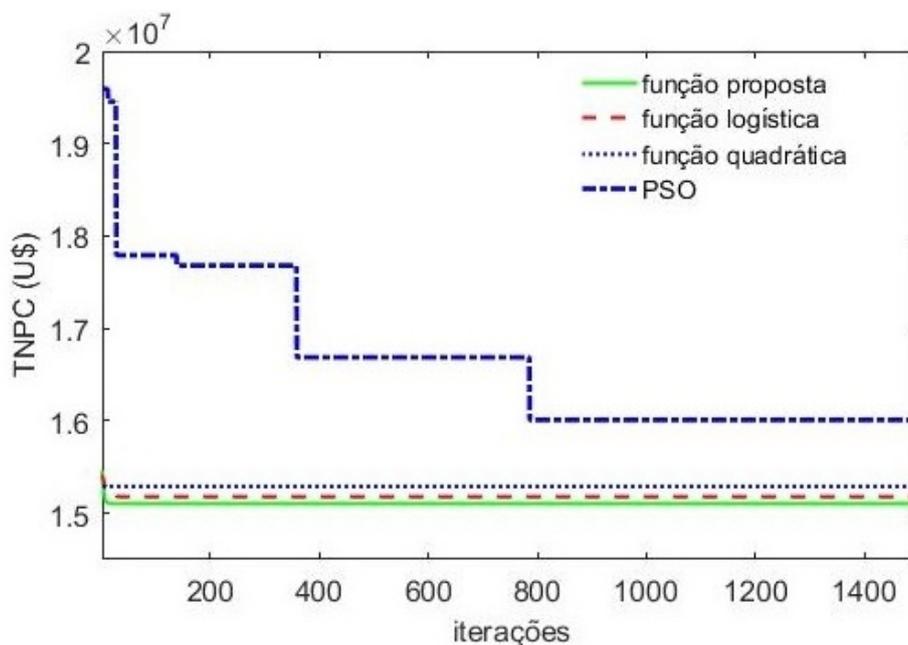


Figura 24 – Comparação entre técnicas - caso V

Para o Algoritmo 3 e caso V, a função de aptidão proposta apresenta melhor TNPC do que as funções logísticas e quadráticas endereçadas respectivamente em (Pantoja; Quijano, 2011) e (Mojica-Nava; Barreto; Quijano, 2015). O RD associado a função *fitness* adotada mostrou-se mais eficiente que o PSO. Devido à aleatoriedade da técnica, o PSO apresenta uma convergência mais lenta e um TNPC superior, como pode ser visto na Figura 24.

5.2.2.1 Análise de viabilidade

Considerando o fluxo de caixa, o período de *payback* descontado (DPP), inicialmente proposto por Fisher (1930), identifica a data (t em anos) a partir da qual o projeto se torna lucrativo, ou seja, todo o investimento é amortizado, esta data pode ser obtida por (5.4).

$$\sum_{t=1}^{DPP} S_{ft}(1+r)^{-t} - TNPC = 0 \quad (5.4)$$

S_{ft} é a renda anual obtida por (5.5).

$$S_{ft} = \sum_{t=1}^T Pd(t)P_r \quad (5.5)$$

O preço para o contrato, (P_r), foi estimado com base nos preços contratados para a tarifa azul no período de pico da concessionária local.

Se DPP é igual ao tempo de vida do projeto (20 anos), a taxa interna de retorno (TIR) pode ser obtida por (5.4).

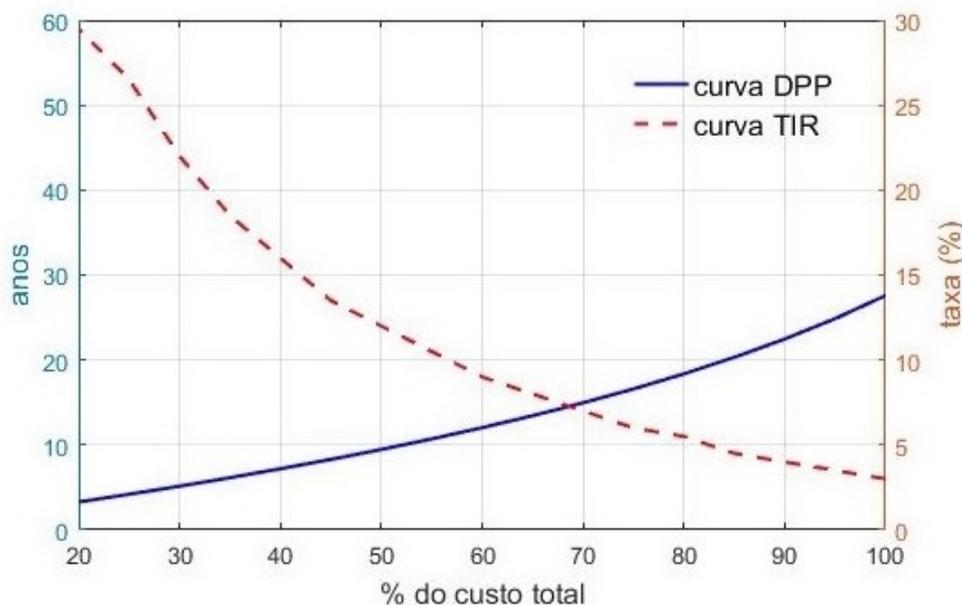


Figura 25 – Diagrama de viabilidade econômica

Nesta análise o preço de venda considerado é de US\$ 160/MWh. O eixo das abscissas a esquerda considera o período em anos de retorno do projeto, o eixo a direita considera a taxa de remuneração do projeto, o eixo das ordenadas o percentual do custo do projeto. Para um DPP de 20 anos, o custo do projeto para a MR híbrida sugere um fator de 84,4% sobre o custo do projeto obtido para o caso mais econômico, caso V, conforme mostrado na Figura 25. Pela mesma figura, sob a ótica da TIR, um custo de 82,6% do custo obtido (US\$ 15.101 milhões) é necessário para viabilizar o investimento. Esses índices mostram que sob essas condições de preço e custo, o investimento ainda não é viável. Contudo, a redução dos custos das tecnologias de geração e armazenamento tendem a tornar o investimento atrativo financeiramente. Avaliando somente o custo de capital das placas solares, uma redução a partir de 53,5% viabiliza o projeto, quando inclui-se o custo da bateria essa redução torna-se 47,5%, considerando todos as fontes um decréscimo de 28,2% para seus respectivos custos de capital torna o investimento financeiramente viável.

5.2.2.2 Análise de sensibilidade/incerteza

Uma análise de sensibilidade é apresentada na Figura 26 cuja abscissa apresenta a variação percentual dos parâmetros e a ordenada, a variação do custo (TNPC). Como pode ser visto na Figura 26, uma variação positiva na taxa de juros mostra uma redução no custo presente do investimento, o que encontra-se de acordo com o fator de desconto ($1/(1+r)$), um aumento na taxa reduz os pagamentos periódicos, a redução do custo presente atinge 2,45% para uma taxa de desconto de 6,5%. Se o projeto tiver uma vida útil mais longa, mais trocas de equipamentos e manutenção serão necessárias, pois o custo será maior, caso contrário, se a vida útil do projeto diminuir, o TNPC será menor.

Mudanças na eficiência das fontes também causam variações no custo, por exemplo, uma variação positiva de aproximadamente 10% na eficiência do PV e 10% no gerador de biogás, respectivamente resulta em uma redução de mais de 3,3% e 1,7% no custo total do projeto. A vida do equipamento também é sensível ao custo, uma variação negativa e positiva de 10% para o gerador de biomassa, varia em aproximadamente 1%, respectivamente, para mais e para menos o TNPC.

O método de Monte Carlo é empregado para ilustrar uma análise de incerteza sobre os parâmetros de projeto do sistema híbrido. Admitem-se amostras geradas aleatoriamente em torno da média da irradiação solar para a geração por painéis fotovoltaicos e o fluxo hídrico que envolve a geração através da MUH. Um cenário de mil ensaios é avaliado para obter a distribuição dos parâmetros mais significativos de projeto e custo total, os quais são apresentados na Figura 27. Observa-se que o custo de projeto pode variar de US\$ 11.501 milhões a US\$ 16.798 milhões, prevalecendo o TNPC aproximado de US\$ 12.240 milhões para um cenário mais favorável de recursos naturais. Com base nos valores esperados, pode-se observar que prevalece para a capacidade instalada PV de 7.906 painéis fotovoltaicos, 44 geradores com base em biomassa

e todos os cenários com 76 geradores a base de biogás. O banco de baterias prevalece em 19 unidades, 4 a 7 unidades de geradores a diesel e de 20 a 22 usinas hidráulica, prevalecendo em 21. O resultado da análise mostra a possibilidade de redução do custo de instalação do empreendimento para os cenários gerados e o método direcionando a capacidade instalada das fontes conforme a disponibilidade do recurso em questão torna-se mais favorável.

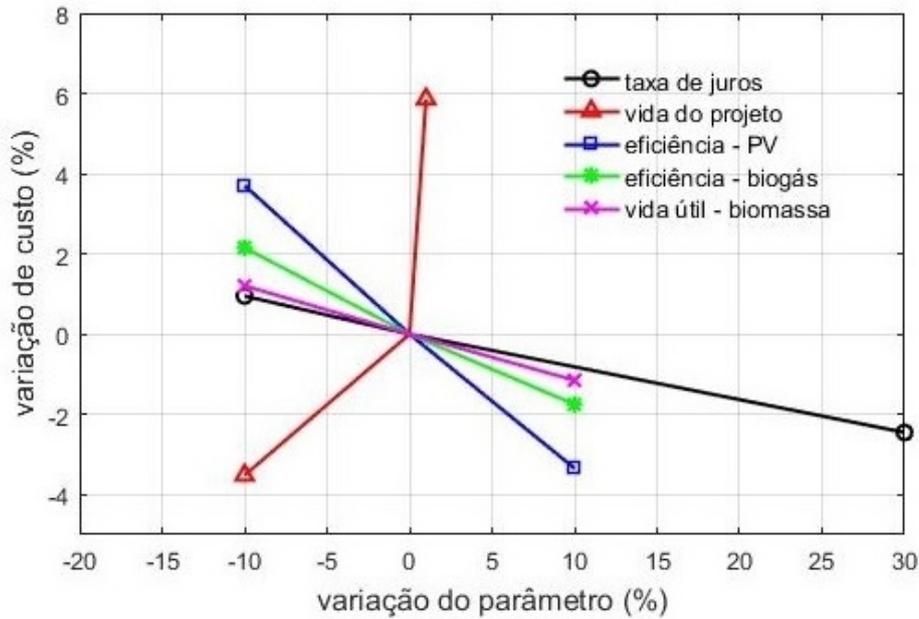


Figura 26 – Diagrama aranha de sensibilidade

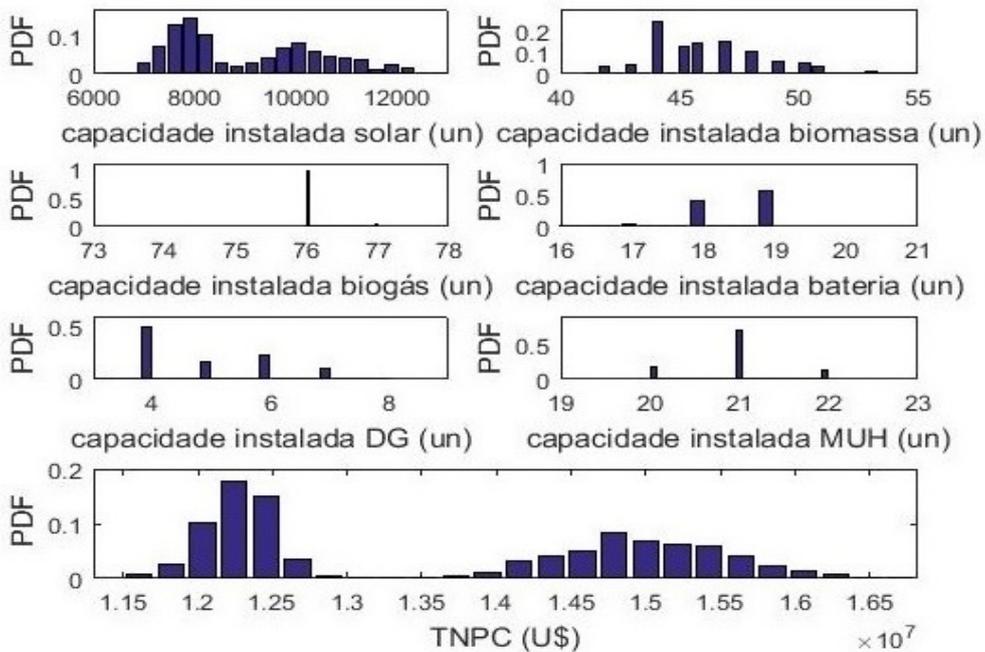


Figura 27 – Distribuição de parâmetros de projeto e custo para o caso V

6 Conclusão

Os sistemas de energia do futuro estão planejados para abranger várias entidades autônomas que interagem entre si, com a rede e outros consumidores. A redução dos custos envolvidos nesses sistemas híbridos devido à rápida expansão dos mercados globais deve ampliar os investimentos em geração com foco na comercialização de energia. Baseado na política de descentralização da geração de energia, às MRs podem ser atribuídas reduções de investimento das concessionárias e governamentais em geração de energia e solução de problemas operacionais.

A metodologia de competição proposta para o caso macro visa tratar as MRs de acordo com suas desigualdades. A caixa Edgeworth como ferramenta de alocação de mercado e o ambiente virtual de conluio para MRs instalados remotamente na rede visam às condições mais equitativas de competição pela demanda da rede com as MRs locais mais privilegiadas.

Em questões que envolvem conflitos, a otimização multiobjetivo é um modelo muito utilizado para atender os interesses das partes envolvidas, resultado deste, o EN é um conceito estrategicamente forte para a solução do problema competitivo.

No caso de jogos infinitos, o espaço de busca de estratégia geralmente é grande, portanto, são necessárias técnicas especiais para realizar a busca. No presente trabalho, a condição côncava/convexa da função operação/utilidade em uma otimização convexa associada a uma representação gráfica fornece mecanismos computacionalmente tratáveis para a obtenção de resultados analíticos de EN e EP.

Detectar múltiplos equilíbrios é mais difícil do que encontrar apenas um. A obtenção de mais de um EN também é comum em jogos não cooperativos, mas a concavidade estrita ou convexidade da função de pagamentos restrita a uma cônica convexa associada à presença de um agente regulador (OSD), que determina a participação e o modo de operação dos agentes pois o mercado local contorna a ausência de singularidade do EN para o caso macro analisado.

O despacho econômico interno da MR modelado pelo RD com base na função de *fitness* adotada permite identificar rapidamente o menor custo de planejamento e operação da MR híbrida. Uma comparação com outras funções de aptidão e técnica de otimização biológica mostra a eficiência da abordagem. Dentre as diversas fontes, qualifica-se como a melhor opção a combinação de caso V que envolve o banco de baterias, o gerador diesel e a micro usina hídrica como alternativas para o período de exportação associados à fonte solar, biomassa e biogás, comum para todos os casos analisados.

Acredita-se que novas valorações da rede associadas a presença da MR híbrida e especialmente a redução de custos dos equipamentos, fenômeno que encontra-se em curso, deva proporcionar, respectivamente, um incremento ao fluxo de caixa e a redução dos custos de projeto

permitindo a viabilidade econômica do empreendimento. O alto investimento que a instalação da MR requer é superado através do rateio entre os prossumidores investidores.

As análises de sensibilidade mostram que, *ceteris paribus*, investir em eficiência e aumentar a vida útil dos equipamentos reduz o custo de planejamento e operação da MR. O estudo de atratividade do projeto mostra que não justifica o adiamento do investimento com base no aumento da taxa de juros.

Embora o caso estudado envolva uma região com características agroindustriais sólidas, outras regiões do mundo com disponibilidade de recursos energéticos podem aplicar os sistemas híbridos propostos sob a condição de minimizar custos na escala permitida.

A perspectiva de incrementar o fluxo de caixa com novas valorações de benefícios da MR híbrida para a rede elétrica, a análise de sensibilidade do preço de combustíveis como diesel e adotar novas configurações de MR híbrida são alguns dos tópicos vislumbrados como trabalhos futuros.

7 Apêndice

Verificação cônica

O método de rotação e translação verifica se a cônica é uma elipse.

Definição 2 Uma cônica em \mathcal{R}^2 é um conjunto de pontos cujas coordenadas em relação à base canônica satisfazem a definição algébrica (7.1), onde os termos não lineares são diferentes de zero

$$\mathbf{X}_i^T B_i \mathbf{X}_i = 0 \quad (7.1)$$

a qual a matriz com $\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$ e a matriz B é dada por (7.2).

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} \\ b_{3,1} & b_{3,2} & b_{3,3} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

A partir da matriz de rotação (R) dada por (7.3), o sistema rotacionado é $\mathbf{X}_i^T \cdot R^{-1} \cdot B \cdot R \cdot \mathbf{X}_i = 0$ pertencente ao sistema $x'Oy'$ ou da mesma forma $\mathbf{X}_i^T \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \alpha \\ 0 & \lambda_2 & \beta \\ \alpha & \beta & f \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_i$ com $\alpha = b_{1,3} \cos(\theta) - b_{2,3} \sin(\theta)$ and $\beta = b_{1,3} \sin(\theta) + b_{2,3} \cos(\theta)$, onde λ_1 e λ_2 são autovalores da submatriz B de ordem 2x2.

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

A partir da matriz de translação T em (7.4), o centro da cônica pode corresponder à origem do sistema de coordenadas: $x''Oy''$ by $\mathbf{X}_i^T \cdot T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \alpha \\ 0 & \lambda_2 & \beta \\ \alpha & \beta & f \end{bmatrix} \cdot T \cdot \mathbf{X}_i = 0$ ou de outro

modo (7.5).

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\alpha}{\lambda_1} \\ 0 & 1 & -\frac{\beta}{\lambda_2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

$$\mathbf{X}_i^T \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & f' \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_i \quad (7.5)$$

Se os autovalores λ_1 and λ_2 tem o mesmo sinal e este sinal é diferente de f' , a cônica é uma elipse.

Referências

Abbott, T.; Kane, D.; Valiant, P. On the complexity of two-player win-lose games. p. 113–122, Oct 2005. ISSN 0272-5428. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 46.

Al Garni, H. Z.; AWASTHI, A.; RAMLI, M. A. Optimal design and analysis of grid-connected photovoltaic under different tracking systems using homer. *Energy Conversion and Management*, v. 155, p. 42 – 57, 2018. ISSN 0196-8904. Citado na página 63.

ALI, L. et al. Optimal planning of clustered microgrid using a technique of cooperative game theory. *Electric Power Systems Research*, v. 183, p. 106262, 2020. ISSN 0378-7796. Citado na página 63.

AMIN, W. et al. A converging non-cooperative cooperative game theory approach for stabilizing peer-to-peer electricity trading. *Electric Power Systems Research*, v. 183, p. 106278, 2020. ISSN 0378-7796. Citado na página 63.

AMROLLAHI, M. H.; BATHAEE, S. M. T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response. *Applied Energy*, v. 202, p. 66 – 77, 2017. ISSN 0306-2619. Citado na página 62.

BASEER, M.; ALQAHTANI, A.; REHMAN, S. Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities: case study of jubail industrial city. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, p. 117806, 2019. ISSN 0959-6526. Citado na página 30.

BHATT, A.; SHARMA, M.; SAINI, R. Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in uttarakhand state, india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 53 – 69, 2016. ISSN 1364-0321. Citado 4 vezes nas páginas 63, 66, 71 e 83.

Boloukat, M. H. S.; Foroud, A. A. Multiperiod planning of distribution networks under competitive electricity market with penetration of several microgrids, part i: modeling and solution methodology. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 11, p. 4884–4894, Nov 2018. ISSN 1941-0050. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 47.

BONANNO, G. Game theory. Independent Publishing Platform, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.

BURGER, S. P.; LUKE, M. Business models for distributed energy resources: A review and empirical analysis. *Energy Policy*, v. 109, p. 230 – 248, 2017. ISSN 0301-4215. Citado na página 32.

Chen, H. et al. Autonomous demand side management based on energy consumption scheduling and instantaneous load billing: an aggregative game approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1744–1754, July 2014. ISSN 1949-3061. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 59.

CHEN, T. et al. The next-generation u.s. retail electricity market with customers and prosumers—a bibliographical survey. *Energies*, v. 11, n. 1, 2018. ISSN 1996-1073. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 51.

- COMINETTI, R.; FACCHINEI, F.; LASSERRE, J. Computation of generalized Nash equilibria: recent advancements. In: modern optimization modelling techniques. Springer, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 60.
- Contreras, J.; Klusch, M.; Krawczyk, J. B. Numerical solutions to nash-cournot equilibria in coupled constraint electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 1, p. 195–206, Feb 2004. ISSN 1558-0679. Citado na página 59.
- Cui, S. et al. A two-stage robust energy sharing management for prosumer microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 5, p. 2741–2752, May 2019. ISSN 1941-0050. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- Daskalakis, C.; Goldberg, P. W.; Papadimitriou, C. H. The complexity of computing a nash equilibrium. p. 258–265, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 46.
- DAWOUD, S. M.; LIN, X.; OKBA, M. I. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2039 – 2052, 2018. ISSN 1364-0321. Citado 3 vezes nas páginas 30, 61 e 62.
- DOU, C. et al. Multi-agent-system-based bi-level bidding strategy of microgrid with game theory in the electricity market. *Electric Power Components and Systems*, Taylor Francis, v. 47, n. 8, p. 703–719, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 48.
- EDGEWORTH, F. *Mathematical Psychics*. [S.l.]: London: C. K. P., 1881. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 53.
- EEA. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from>, 2021. Citado na página 31.
- ELKAZAZ, M.; SUMNER, M.; THOMAS, D. Energy management system for hybrid pv-wind-battery microgrid using convex programming, model predictive and rolling horizon predictive control with experimental validation. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 115, p. 105483, 2020. ISSN 0142-0615. Citado na página 30.
- Esfahani, M. M.; Hariri, A.; Mohammed, O. A. A multiagent-based game-theoretic and optimization approach for market operation of multimicrogrid systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 1, p. 280–292, Jan 2019. ISSN 1941-0050. Citado na página 48.
- EU. *DIRECTIVE 2009/ 72/ European Community of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/ 54/ EC*. 2009. Citado na página 30.
- Fazelpour, F.; Farahi, S.; Soltani, N. *Techno-economic analysis of hybrid power systems for a residential building in Zabol, Iran*. 2016. 1-6 p. Citado na página 62.
- FISHER, I. The theory of interest as determined by impatience to spend income and opportunity to invest it. Macmillan, 1930. Citado na página 90.
- FLEISCHHACKER, A. et al. Sharing solar pv and energy storage in apartment buildings: resource allocation and pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 4, p. 3963–3973, 2019. Citado na página 48.

- FORUZAN, E.; SOH, L.-K.; ASGARPOOR, S. Reinforcement learning approach for optimal distributed energy management in a microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 33, n. 5, p. 5749–5758, 2018. Citado na página 48.
- FREITAS, F. et al. The brazilian market of distributed biogas generation: overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 146 – 157, 2019. ISSN 1364-0321. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 83.
- GHENAI, C.; BETTAYEB, M. Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar pv/fuel cell/diesel generator power system for university building. *Energy*, v. 171, p. 180 – 189, 2019. ISSN 0360-5442. Citado na página 71.
- GONZÁLEZ-ROMERA, E. et al. Advantages of minimizing energy exchange instead of energy cost in prosumer microgrids. *Energies*, v. 12, n. 4, 2019. ISSN 1996-1073. Citado 3 vezes nas páginas 31, 61 e 62.
- GUEZGOUZ, M. et al. Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, v. 199, p. 112046, 2019. ISSN 0196-8904. Citado na página 62.
- GULER, O. Foundations of optimization, graduate texts in mathematics. Springer, New York, NY, USA, 2010. Citado na página 58.
- GUO, C. et al. Optimal energy management of multi-microgrids connected to distribution system based on deep reinforcement learning. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 131, p. 107048, 2021. ISSN 0142-0615. Citado na página 48.
- HANNA, R. et al. Evaluating business models for microgrids - interactions of technology and policy. *Energy Policy*, v. 103, p. 47 – 61, 2017. ISSN 0301-4215. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- HENAO-MUÑOZ, A.; SAAVEDRA-MONTES, A.; RAMOS-PAJA, C. Optimal power dispatch of small-scale standalone microgrid located in colombian territory. *Energies*, v. 11, n. 7, 2018. ISSN 1996-1073. Citado na página 62.
- HINCAPIE, R. A.; GALLEGO, R. A.; MANTOVANI, J. R. A decomposition approach for integrated planning of primary and secondary distribution networks considering distributed generation. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 106, p. 146 – 157, 2019. ISSN 0142-0615. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- HOMER. Hybrid optimization model for electric renewable. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html/> - Acesso em : 31 de agosto de 2020, 2020. Citado na página 62.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/rio-verde/> - Acesso em : 10 de agosto de 2020, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 83.
- IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/> - Acesso em : 15 de fevereiro de 2020, 2020. Citado na página 77.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <https://clima1.cptec.inpe.br/evolucao/pt/> - Acesso em : 11 de fevereiro de 2020, 2020. Citado na página 83.

- JAYAWARDENA, A. et al. Microgrid capability diagram: a tool for optimal grid-tied operation. *Renewable Energy*, v. 74, p. 497 – 504, 2015. ISSN 0960-1481. Citado na página 30.
- JEHLE, G.; RENY, P. Advanced microeconomic theory. Prentice Hall, 2011. Citado na página 47.
- JUSZCZUK, P. A novel approximate method of computing extended nash equilibria. *Applied Soft Computing*, v. 76, p. 682 – 696, 2019. ISSN 1568-4946. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 53.
- KASAEIAN, A. et al. Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: a case study. *Energy Conversion and Management*, v. 198, p. 111810, 2019. ISSN 0196-8904. Citado na página 63.
- Katiraei, F. et al. Microgrids management. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 6, n. 3, p. 54–65, 2008. ISSN 1558-4216. Citado na página 30.
- Kazempour, S. J.; Zareipour, H. Equilibria in an oligopolistic market with wind power production. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, n. 2, p. 686–697, March 2014. ISSN 1558-0679. Citado na página 32.
- KHAN, M. W.; WANG, J. The research on multi-agent system for microgrid control and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 1399 – 1411, 2017. ISSN 1364-0321. Citado na página 65.
- KHAN, M. W. et al. Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustainable Cities and Society*, v. 44, p. 855 – 870, 2019. ISSN 2210-6707. Citado 4 vezes nas páginas 45, 61, 64 e 65.
- KONG, X. et al. A multi-agent optimal bidding strategy in microgrids based on artificial immune system. *Energy*, v. 189, p. 116154, 2019. ISSN 0360-5442. Citado 4 vezes nas páginas 31, 33, 44 e 61.
- Kordonis, I.; Papavassilopoulos, G. P. Games on large networks: information and complexity. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 62, n. 7, p. 3178–3192, July 2017. ISSN 2334-3303. Citado na página 46.
- KUANG, Y. et al. A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 504 – 513, 2016. ISSN 1364-0321. Citado na página 30.
- KULKARNI, A. A.; SHANBHAG, U. V. On the variational equilibrium as a refinement of the generalized nash equilibrium. *Automatica*, v. 48, n. 1, p. 45 – 55, 2012. ISSN 0005-1098. Citado na página 60.
- LABSOL. Laboratório de energia solar da UFRGS. <http://www.solar.ufrgs.br/> - Acesso em : 11 de agosto de 2020, 2020. Citado na página 72.
- Lahon, R.; Gupta, C. P.; Fernandez, E. Optimal power scheduling of cooperative microgrids in electricity market environment. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 7, p. 4152–4163, July 2019. ISSN 1941-0050. Citado na página 48.
- LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid - a conceptual solution. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, v. 6, p. 4285–4290, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 29, 43, 44 e 45.

Lee, J. et al. Distributed energy trading in microgrids - a game-theoretic model and its equilibrium analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 6, p. 3524–3533, June 2015. ISSN 1557-9948. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.

LIU, X. et al. Demand-Side management with household plug-in electric vehicles: A Bayesian game-theoretic approach. *IEEE Systems Journal*, v. 12, n. 3, p. 2894–2904, 2018. Citado na página 38.

LIU, Z. et al. Optimal operation of independent regional power grid with multiple wind-solar-hydro-battery power. *Applied Energy*, v. 235, p. 1541 – 1550, 2019. ISSN 0306-2619. Citado na página 63.

MALEKI, S. A. M.; HIZAM, H.; GOMES, C. Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re visited. *Energies*, v. 10, n. 1, 2017. Citado na página 65.

MARTIN-MARTÍNEZ, F.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; RIVIER, M. A literature review of microgrids - a functional layer based classification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 1133 – 1153, 2016. ISSN 1364-0321. Citado na página 30.

MARZBAND, M. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering der uncertainties. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 10, p. 2999–3009(10), September 2016. ISSN 1751-8687. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 63.

MEENA, N. K.; YANG, J.; ZACHARIS, E. Optimisation framework for the design and operation of open-market urban and remote community microgrids. *Applied Energy*, v. 252, p. 113399, 2019. ISSN 0306-2619. Citado 4 vezes nas páginas 31, 44, 62 e 63.

MENG, L. et al. Microgrid supervisory controllers and energy management systems - a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 1263 – 1273, 2016. ISSN 1364-0321. Citado na página 29.

MICHALITSAKOS, P.; MIHET-POPA, L.; XYDIS, G. A hybrid res distributed generation system for autonomous islands: a der-cam and storage-based economic and optimal dispatch analysis. *Sustainability*, v. 9, n. 11, 2017. ISSN 2071-1050. Citado na página 62.

MILLER, R. Optimization foundations and applications. Wiley Interscience, 2000. Citado na página 56.

MIT. Utility of the future : An mit energy initiative response to an industry in transition. 2016. Citado na página 43.

Mochaourab, R.; Jorswieck, E. A. Exchange economy in two-user multiple-input single-output interference channels. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 6, n. 2, p. 151–164, April 2012. ISSN 1941-0484. Citado na página 58.

MOHSENI, S.; BRENT, A. C. Economic viability assessment of sustainable hydrogen production, storage, and utilisation technologies integrated into on- and off-grid micro-grids: a performance comparison of different meta-heuristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. ISSN 0360-3199. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 71.

- Mojica-Nava, E.; Barreto, C.; Quijano, N. Population games methods for distributed control of microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 6, p. 2586–2595, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 90.
- M.S.BAZARRA; SHERALI, H.; SHETTY, C. M. Nonlinear programming. theory and algorithms. Wiley-Interscience, USA, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 57.
- MUKHERJEE, U. et al. Techno-economic, environmental, and safety assessment of hydrogen powered community microgrids; case study in canada. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 20, p. 14333–14349, 2017. ISSN 0360-3199. Citado na página 31.
- Muzi, F.; de Lorenzo, M. G.; Consolidani, M. New concepts on microgrid - prosumer nodes interaction. *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, p. 1–4, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 64.
- NASH, J. Non-cooperative games. *Annals of Mathematics*, Annals of Mathematics, v. 54, n. 2, p. 286–295, 1951. ISSN 0003486X. Citado 3 vezes nas páginas 32, 38 e 39.
- NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, v. 36, n. 1, p. 48–49, 1950. ISSN 0027-8424. Citado 3 vezes nas páginas 32, 49 e 50.
- NEUMANN, J. V.; MORGENSTERN, O. Games and economic behavior. Princeton University Press, 1944. Citado 5 vezes nas páginas 32, 38, 39, 56 e 57.
- NIKAIDO, H.; ISODA, K. Note on non-cooperative convex games. *Pacific J. Math*, v. 5, p. 807–15, 1955. Citado na página 49.
- OMAFRA. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. <https://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/11-033.htm>- Acesso em : 08 de outubro de 2020, 2020. Citado na página 83.
- Pantoja, A.; Quijano, N. A population dynamics approach for the dispatch of distributed generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 10, p. 4559–4567, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 90.
- PEREZ, A. P.; SAUMA, F. D. M. E. E.; HOBBS, B. F. The economic effects of interregional trading of renewable energy certificates in the u.s. wecc. *The Energy Journal*, v. 37, n. 4, 2016. ISSN 1944-9089. Citado na página 32.
- PERKINS, G. Techno-economic comparison of the levelised cost of electricity generation from solar pv and battery storage with solar pv and combustion of bio-crude using fast pyrolysis of biomass. *Energy Conversion and Management*, v. 171, p. 1573–1588, 2018. ISSN 0196-8904. Citado na página 31.
- PRAŽÁK, P.; KOVÁRNÍK, J. Nonlinear phenomena in cournot duopoly model. *Systems*, v. 6, n. 3, 2018. ISSN 2079-8954. Citado na página 59.
- PSARROS, G. N.; PAPATHANASSIOU, S. A. Internal dispatch for res-storage hybrid power stations in isolated grids. *Renewable Energy*, v. 147, p. 2141 – 2150, 2020. ISSN 0960-1481. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 64.

- QUASHIE, M. et al. Optimal planning of microgrid power and operating reserve capacity. *Applied Energy*, v. 210, p. 1229 – 1236, 2018. ISSN 0306-2619. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 62.
- Ratliff, L. J.; Burden, S. A.; Sastry, S. S. On the characterization of local nash equilibria in continuous games. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 61, n. 8, p. 2301–2307, Aug 2016. ISSN 2334-3303. Citado na página 46.
- ROCKAFELLAR, R. Convex analysis. Princenton University Press, 1970. Citado na página 49.
- ROQUES, F.; FINON, D. Adapting electricity markets to decarbonisation and security of supply objectives: Toward a hybrid regime? *Energy Policy*, v. 105, p. 584 – 596, 2017. ISSN 0301-4215. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- Rosen, J. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games. *Econometrica*, v. 33, n. 3, p. 520–534, July 1965. Citado 6 vezes nas páginas 33, 50, 59, 60, 79 e 82.
- Rubinstein, A. *Settling the Complexity of Computing Approximate Two-Player Nash Equilibria*. 2016. 258-265 p. Citado na página 46.
- SARKAR, T. et al. Optimal design and implementation of solar pv-wind-biogas-vrfb storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability. *Energy Conversion and Management*, v. 191, p. 102 – 118, 2019. ISSN 0196-8904. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- SAWLE, Y.; GUPTA, S.; BOHRE, A. K. Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques. *Renewable Energy*, v. 119, p. 459 – 472, 2018. ISSN 0960-1481. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 69.
- SHAH, S.; MITCHELL, J. E.; KUPFERSCHMID, M. An ellipsoid algorithm for equality-constrained nonlinear programs. *Computers Operations Research*, v. 28, n. 1, p. 85 – 92, 2001. ISSN 0305-0548. Citado na página 58.
- SINGH, S. Optimal sizing of grid integrated hybrid pv-biomass energy system using artificial bee colony algorithm. *IET Renewable Power Generation*, Institution of Engineering and Technology, v. 10, p. 642–650(8), May 2016. ISSN 1752-1416. Citado 3 vezes nas páginas 30, 63 e 71.
- SITUMORANG, Y. A. et al. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200kw class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 117, p. 109486, 2020. ISSN 1364-0321. Citado na página 66.
- SM LIN XN, S. J. O. M. K. M. D.; A, W. Feasibility study of isolated pv-wind hybrid system in Egypt. *Adv Mater Res: Trans Tech Publ*, p. 145 – 151, 2015. Citado na página 30.
- Street, A. et al. Sharing quotas of a renewable energy hedge pool: a cooperative game theory approach. *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, p. 1–6, 2011. Citado na página 30.
- TABAR, V. S.; ABBASI, V. Energy management in microgrid with considering high penetration of renewable resources and surplus power generation problem. *Energy*, v. 189, p. 116264, 2019. ISSN 0360-5442. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

- TANG, Y. et al. A game theoretical approach based bidding strategy optimization for power producers in power markets with renewable electricity. *Energies*, v. 10, n. 5, 2017. ISSN 1996-1073. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- TAZVINGA, H.; ZHU, B.; XIA, X. Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries. *Energy Conversion and Management*, v. 102, p. 104–110, 2015. ISSN 0196-8904. Clean, Efficient, Affordable and Reliable Energy for a Sustainable Future. Citado na página 30.
- TSAOUSOGLOU, G.; MAKRIS, P.; VARVARIGOS, E. Electricity market policies for penalizing volatility and scheduling strategies - the value of aggregation, flexibility, and correlation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, v. 12, p. 57 – 68, 2017. ISSN 2352-4677. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- VERGADOS, D. J. et al. Prosumer clustering into virtual microgrids for cost reduction in renewable energy trading markets. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, v. 7, p. 90 – 103, 2016. ISSN 2352-4677. Citado na página 31.
- Wang, H.; Huang, J. Incentivizing energy trading for interconnected microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 4, p. 2647–2657, July 2018. ISSN 1949-3061. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- WU, L.; ORTMAYER, T.; LI, J. The community microgrid distribution system of the future. *The Electricity Journal*, v. 29, n. 10, p. 16–21, 2016. ISSN 1040-6190. Citado na página 31.
- XU, X. et al. Optimized sizing of a standalone pv-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system. *Renewable Energy*, v. 147, p. 1418 – 1431, 2020. ISSN 0960-1481. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 67.
- XU, Y.; ZHANG, J. A two-layer two-stage dispatching strategy for active distribution network with micro-grid considering multiple interactions. *Electric Power Systems Research*, v. 187, p. 106504, 2020. ISSN 0378-7796. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- Zarei, M.; Salami, A. Improving the game theoretic analysis of electricity auctions applied in medium markets. *Journal of Computational Science*, v. 17, p. 83 – 96, 2016. ISSN 1877-7503. Citado na página 46.
- Zeng, H. et al. *Introduction of Australian 100MW Storage Operation and its Enlightenment to China*. 2018. 2895-2900 p. Citado na página 61.
- Zhang, Z. et al. Market-oriented optimal dispatching strategy for a wind farm with a multiple stage hybrid energy storage system. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, v. 4, n. 4, p. 417–424, 2018. ISSN 2096-0042. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 62.
- Zhao, Z. et al. Distributed model predictive control strategy for islands multi-microgrids based on non-cooperative game. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, p. 1–1, 2020. Citado na página 48.