



MODELO DE PARTILHA DE ENERGIA PARA EDIFÍCIOS E COMUNIDADES ENERGÉTICAS

ANDRESSA SOUSA DA SILVA

Outubro de 2023

MODELO DE PARTILHA DE ENERGIA PARA EDIFÍCIOS E COMUNIDADES ENERGÉTICAS

Andressa Sousa da Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de TEDSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP/IPP) e do Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA – Campus Imperatriz). Este trabalho foi elaborado no âmbito do acordo internacional de Dupla Titulação entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto (Portugal) e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (Brasil) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia pelo ISEP/IPP e de Engenheira Eletricista pelo IFMA.

Candidato: Andressa Sousa da Silva, Nº 1220530, email_1220530@isep.ipp.pt

Orientação científica: Dr^a Zita Maria Almeida do Vale, zav@isep.ipp.pt

Dr^a Ana Angelica Mathias Macedo, anaangellica@yahoo.com.br

Coorientação científica: Dr. Luis Filipe de Oliveira Gomes, lfg@isep.ipp.pt

Dr. Fernando Mendes, fjmendes@estesc.ipc.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Porque para Deus nada é impossível! (Lucas 1.37)

Agradecimentos

A Deus, o grande amor da minha vida, sem Ele nada disso seria possível.

Ao Laboratório de Pesquisa, representado pelos meus orientadores do Brasil e profissionais excepcionais Dr^a. Ana Angelica Mathias Macedo e Dr. Fernando Mendes, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, moldando o meu percurso acadêmico.

Ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA), bem como toda coordenação, em especial ao diretor Dr. Lauro Santos Pinheiro, pelo empenho, participação ativa e busca pelos recursos financeiros em prol do sucesso da dupla titulação.

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PRPGI) que tornou possível a realização deste mestrado com apoio financeiro.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e a toda a direção, bem como ao Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD) representado pelos meus célebres orientadores de Portugal Dr^a. Zita Maria Almeida do Vale e Dr. Luís Filipe de Oliveira Gomes, por seus direcionamentos, paciência e apoio ao longo desse processo.

Aos meus pais, Selma de Sousa Silva e Antônio Pereira da Silva, que sempre acreditaram e apoiaram meus sonhos.

Aos meus irmãos e parceiros de qualquer hora, Aline Sousa Silva, Antônio André S. da Silva e Anderson Marcos S. da Silva, por serem minha base constante de alegria, incentivo e amor.

Aos meus amigos pioneiros do Programa de Dupla Diplomação em Engenharia Elétrica, Guilherme Abreu Carvalho, Laura G. Freitas Castro, Fernanda Claudino Leite, Kayon Vinicius L. Lopes, João Ferreira da S. Neto, Ricardo Pinheiro Sousa e Lucas Silva Pinheiro, com quem compartilhei muitas experiências memoráveis e aprendizados inesquecíveis.

Aos meus grandes parceiros de vida, Constantino B. Duarte Júnior, Cristiane Carvalho Araújo, Barbara Emilly S. Bezerra, Gerliane da S. Chaves, Diego Francisco S. de Almeida, Joel Gouveia de O. Júnior, Ester Miriã de S. Freire e Pablo Francisco M. Bezerra que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo amizade, incentivo e apoio nos momentos bons e ruins. A todos vocês, que contribuíram de forma direta e indireta para o meu crescimento pessoal, profissional e acadêmico, obrigada por fazerem parte dessa emocionante trajetória.

Resumo

Nos últimos anos, a preocupação crescente com a sustentabilidade ambiental e energética está diretamente ligada ao aumento global da demanda por eletricidade, impulsionado principalmente pela queima de combustíveis fósseis, o que resulta na emissão de (CO_2) e contribui para as mudanças climáticas. Uma estratégia crucial para enfrentar esse desafio é melhorar a eficiência energética dos edifícios, reduzindo o consumo de energia e minimizando as emissões de carbono, especialmente diante do crescimento previsto da população mundial.

Uma solução em destaque é a geração de eletricidade por meio de painéis solares instalados em edifícios, especialmente em áreas urbanas, visto que, estudos evidenciam os benefícios econômicos do compartilhamento da geração solar em edifícios com múltiplos apartamentos, tirando proveito das amplas áreas de telhado disponíveis e criando perfis de consumo de energia mais estáveis e proporcionando vantagens econômicas substanciais.

Nesse contexto, apresenta-se uma metodologia de compartilhamento de energia em Comunidades de Energia Renovável (CER) com base na alocação de energia para os apartamentos. Essa abordagem utiliza a regra de alocação valor de *Shapley*, oriunda da teoria de jogos cooperativos que visa uma partilha justa e igualitária dos recursos. Para demonstrar a viabilidade e os benefícios dessa metodologia, foram realizados estudos de casos em um edifício. Diferentes critérios de alocação de energia foram analisados, incluindo a distribuição aleatória (caso I), a alocação baseada no valor de *Shapley* (caso II) e a combinação do valor de *Shapley* com a implementação do programa de *Demand Response* (DR) (caso III).

Os resultados destacam a sensibilidade dos efeitos aos critérios de alocação de energia adotados, considerando a contribuição positiva, negativa e quantidade de energia consumida e gerada. De maneira significativa, o caso III demonstra ser o cenário mais favorável, com uma redução substancial nos custos em comparação com os demais casos, devido à aplicação eficiente da junção do valor *Shapley* com o programa de DR na redução do consumo de energia.

Palavras-Chave

CO_2 , CER, Edifícios, Modelo de partilha, Jogos cooperativos, Valor de *Shapley*, DR.

Abstract

In recent years, the growing concern for environmental and energy sustainability is directly linked to the global increase in demand for electricity, driven mainly by the burning of fossil fuels, which results in the emission of (CO₂) and contributes to climate change. A crucial strategy for tackling this challenge is to improve the energy efficiency of buildings, reducing energy consumption and minimizing carbon emissions, especially in the face of the emissions, especially in view of the expected growth in the world's population. One prominent solution is electricity generation through solar panels installed on buildings, especially in urban areas. Studies show the economic benefits of sharing solar generation in buildings with multiple apartments, taking advantage of the large roof areas available, creating more stable energy consumption profiles and providing substantial economic advantages. In this context, we present a methodology for sharing energy in Renewable Energy Communities (RECs) based on the allocation of energy to apartments. This approach uses the Shapley value allocation rule, which comes from the theory of cooperative games, which aims to achieve a fair and equal sharing of resources. To demonstrate the feasibility and benefits of this methodology, case studies were carried out in one building. Different energy allocation criteria were analyzed, including random distribution (case I), allocation based on the Shapley value (case II) and the combination of the Shapley value with the implementation of the Demand Response (DR) program (case III). The results highlight the sensitivity of the results to the energy allocation criteria adopted, considering positive and negative contributions and the amount of energy consumed and generated. Significantly, case III proves to be the most favorable scenario, with a substantial reduction in costs compared to the other cases, due to the efficient application of the combination of the Shapley value and the DR program in reducing energy consumption.

Keywords

CO₂, REC, Buildings, Sharing model, Cooperative games, Shapley value, DR.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIGLAS E ACRÔNIMOS	XV
NOMENCLATURA	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 REDES INTELIGENTES	6
2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS	6
2.3 ENERGIA SOLAR	7
2.4 AUTOCONSUMO	9
2.4.1 Autoconsumo Individual	10
2.4.2 Autoconsumo Coletivo	10
2.5 COMUNIDADES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	11
2.5.1 Definições de comunidades de energia	11
2.5.2 Estruturas de propriedade de comunidades de energia solar	12
2.5.3 Modelo de propriedade	13
2.5.4 Modelo de assinatura	14
2.6 TRANSACTIVE ENERGY	14
2.7 DEMAND RESPONSE	16
2.8 TEORIA DOS JOGOS	17

2.8.1	Definição	17
2.8.2	Jogos cooperativos	17
2.8.3	Valor de Shapley	18
2.8.4	Estudos que abordam valor de Shapley	20
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	21
3.1	ESTUDO BIBLIOGRÁFICO	21
3.2	PLATAFORMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	22
3.3	MODELO DE PARTILHA PROPOSTO	22
3.3.1	Coleta e previsão de dados	23
3.3.2	Consumo e demanda de energia dos apartamentos	23
3.3.3	Contribuição individual	24
3.3.4	Distribuição igualitária	26
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA DEMAND RESPONSE	28
3.5	CÁLCULOS DE CUSTOS	30
4	CASOS DE ESTUDO	33
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA COMUNIDADE	34
4.2	DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	35
4.3	RESULTADOS	35
4.3.1	Caso I - distribuição estocástica	35
4.3.2	Caso II - Distribuição com o modelo de partilha	39
4.3.3	Caso III - Distribuição com modelo de partilha e DR	45
4.4	ANÁLISE DOS CASES	58
4.5	RECOMENDAÇÕES PARA CASOS DE ESTUDOS	62
5	CONCLUSÕES	63
5.1	Apreciações Finais	63
5.2	Perspetivas para um Trabalho Futuro	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

Índice de Figuras

Figura 1	Efeito fotovoltaico [1]	7
Figura 2	Componentes do sistema fotovoltaico <i>On-Grid</i>	9
Figura 3	Componentes do sistema fotovoltaico <i>Off-Grid</i>	9
Figura 4	Esquema de autoconsumo coletivo de energia renovável	10
Figura 5	Esquema de comunidades de energia renovável	11
Figura 6	Conceito de energia transativa [2].	15
Figura 7	Fluxograma - Modelo de Partilha com <i>Demand Response</i>	22
Figura 8	Preços do kWh - OMIE	30
Figura 9	Representação do edifício em estudo	33
Figura 10	Distribuição diária e média para cada apartamento (Caso I)	36
Figura 11	Distribuição às 9h (Caso I)	37
Figura 12	Distribuição às 12h (Caso I)	37
Figura 13	Distribuição às 17h (Caso I)	38
Figura 14	Energia excedente (Caso I)	38
Figura 15	Distribuição média para cada apartamento (Caso II)	39
Figura 16	Distribuição diária para cada apartamento (Caso II)	40
Figura 17	Horários sem distribuição de energia (Caso II)	41
Figura 18	Relação entre distribuição e o valor de <i>Shapley</i> para os horários das 9h, 12h e 17h (Caso II)	42

Figura 19	Energia excedente (Caso II)	43
Figura 20	Média das contribuições (Caso II)	44
Figura 21	Redução do custo (Caso II)	44
Figura 22	Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 9h (Caso III)	45
Figura 23	Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 12h (Caso III)	46
Figura 24	Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 17h (Caso III)	46
Figura 25	Média das contribuições (Caso III)	47
Figura 26	Redução do custo (Caso III)	47
Figura 27	Distribuição e redução por hora - Apartamento 1 (Caso III)	48
Figura 28	Consumo - Apartamento 1	48
Figura 29	Distribuição e redução por hora - Apartamento 2 (Caso III)	49
Figura 30	Consumo - Apartamento 2	49
Figura 31	Distribuição e redução por hora - Apartamento 3 (Caso III)	50
Figura 32	Consumo - Apartamento 3	50
Figura 33	Distribuição e redução por hora - Apartamento 4 (Caso III)	51
Figura 34	Consumo - Apartamento 4	51
Figura 35	Distribuição e redução por hora - Apartamento 5 (Caso III)	52
Figura 36	Consumo - Apartamento 5	52
Figura 37	Distribuição e redução por hora - Apartamento 6 (Caso III)	53

Figura 38	Consumo - Apartamento 6	53
Figura 39	Distribuição e redução por hora - Apartamento 7 (Caso III)	54
Figura 40	Consumo - Apartamento 7	54
Figura 41	Distribuição e redução por hora - Apartamento 8 (Caso III)	55
Figura 42	Consumo - Apartamento 8	55
Figura 43	Distribuição e redução por hora - Apartamento 9 (Caso III)	56
Figura 44	Consumo - Apartamento 9	56
Figura 45	Distribuição e redução por hora - Apartamento 10 (Caso III)	57
Figura 46	Consumo - Apartamento 10	57
Figura 47	Distribuições às 9h horas para os casos I, II, III	58
Figura 48	Distribuições às 12h horas para os casos I, II, III	58
Figura 49	Distribuições às 17h horas para os casos I, II, III	59
Figura 50	Distribuições para os casos I, II, III	59
Figura 51	Redução de custos para os casos I, II, III	60
Figura 52	Custo final para os casos I, II, III	61
Figura 53	Tempo de execução em relação à quantidade de apartamentos	61

Índice de Tabelas

Tabela 1	Definições para comunidades energéticas	12
Tabela 2	Aplicações do Valor de <i>Shapley</i>	20
Tabela 3	Dados de Consumo Reais e Previstos	34
Tabela 4	Dados de Geração Reais e Previstos	34
Tabela 5	Relações de custos e redução para a comunidade do edifício	60

Siglas e Acrônimos

- CEL – Comunidade Energética Local
- CER – Comunidades de Energia Renovável
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- DER – Diretiva Europeia de Energia Renovável
- DR – *Demand Response*
- FV – Solar Fotovoltaica
- MLE – Mercado Local de Energia
- ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- PLE – Provedor local de energia
- TE – *Transactive Energy*
- UE – União Europeia
- UPAC – Unidades de Produção

Nomenclatura

C_i^{ns} - Valor pago durante o mês sem a partilha

C_i^s - Valor pago durante o mês com a partilha

C_i^{sDR} - Custo da energia para o apartamento i utilizando a partilha e seguindo as orientações do *Demand Response*

CR_i - Percentual da redução do custo de energia ao utilizar a partilha de energia

CR_i^{pDR} - Percentual de redução do custo de energia ao utilizar a partilha de energia junto ao *Demand Response*

$Cons_i^t$ - Consumo (Real)

D_i^t - Demanda de energia (Real)

DR_i^+ - Valor de $PART_i^t$ que satisfaz a demanda de energia

DR_i^- - Valor de $PART_i^t$ que não satisfaz a demanda de energia

DR^+dist_i - Distribuição da $PART_i^t$ positiva para cada apartamento

ER_i^t - Quantidade de energia distribuída por apartamento

ER_s^t - Quantidade total de energia que será distribuída para a comunidade

$ERdist_i$ - Distribuição total de energia renovável para cada apartamento

KL_i^t - Constante que determina se haverá redução de consumo

K_i^t - Validação da distribuição de energia caso a contribuição seja positiva

$LD_i^{(t+1)}$ - Quantidade de energia indicada a ser reduzida na próxima hora para o apartamento i

$LD_s^{(t+1)}$ - Quantidade de energia indicada a ser reduzida na próxima hora para todo o edifício

L_A - Vetor de apartamentos

n - Número de membros da comunidade

$PCons_i^t$ - Consumo (Previsto)

PD_i^t - Demanda de energia (Previsto)

PG_{rv}^t - Geração do sistema de distribuição (Previsto)

$PART_i^t$ - Cálculo da participação no *Demand Response* com magnitude sendo o erro da previsão

TN_{Xv}^t - Soma das contribuições negativas do valor de *Shapley* do edifício no instante t

T_p^t - Demanda total da comunidade

T_{Xv}^t - Contribuições positivas totais da comunidade

$Total_d^t(S)$ - Demanda de energia total no subespaço (S)

$Total_{DR}^t(S)$ - Resposta à demanda (*Demand Response*) no subespaço (S)

Xv^t - Vetor contendo valores de *Shapley* para cada apartamento em determinado instante t

$\phi_i^t(v^t)$ - Valor de *Shapley* para a identificação da contribuição individual de cada membro

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi realizada no decorrer do 2º ano do Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia, do Departamento de Engenharia Electrotécnica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Assim, ao longo deste capítulo é apresentada a contextualização da dissertação face às motivações que levam à necessidade de gestão e otimização de um modelo de partilha de energia para edifícios em Comunidades de Energia Renovável (CER) no cenário de programas de *Demand Response*. Apresentam-se ainda, os principais objetivos e contribuições inerentes a esta dissertação, para além da organização da mesma.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A sustentabilidade energética e ambiental tornou-se uma das principais pautas nos últimos anos. Com o aumento da demanda energética, a queima de combustíveis fósseis com o intuito de gerar energia elétrica vem ganhando força, e conseqüentemente a incidência da emissão de dióxido de carbono (CO₂), acabando por prejudicar a atmosfera e promovendo drásticas mudanças climáticas [3].

Segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a previsão é que as emissões globais de gases que provocam o efeito estufa atinjam o ápice até 2025 [4]. Com base nessa

problemática, a busca pela eficiência energética em edifícios vem mostrando-se como uma das principais soluções. Gradativamente tem sido demonstrado um interesse em direcionar-se à eficiência energética como um caminho para a mitigação de carbono, limitando o uso de energia, melhorando o desempenho energético dos edifícios e reduzindo o consumo de energia para alcançar edifícios sustentáveis.

Os Edifícios sustentáveis tornaram-se um ponto crucial para muitos países em desenvolvimento e desenvolvidos no século XXI. A previsão de aumento da população mundial é de aproximadamente 8,5 mil milhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 [5]. Nesse sentido, faz-se necessário buscar por novas fontes sustentáveis de produção e consumo de energia.

A geração de eletricidade fotovoltaica em edifícios tem atraído uma atenção considerável como solução viável para cobrir partes da carga, oferecendo grande potencial, principalmente nas cidades [6][7]. Dados europeus recentes concentram-se no uso de FV em escritórios e edifícios comerciais, bem como em edifícios residenciais unifamiliares [8][9][10].

Assim, desde a inserção da primeira Diretiva Europeia de Energia Renovável(DER) em 2009, as instalações fotovoltaicas aumentaram consideravelmente atingindo mais de 165 GWp na União Europeia no final de 2021. Com a reformulação da Diretiva Europeia de Energia Renovável (DER II) estabeleceram-se metas de 32% de energia renovável e 40% de redução de emissões de gases com efeito de estufa até 2030 [11]. Com isso, as diretivas atribuem aos cidadãos o papel de protagonista na consecução dos objetivos nacionais e europeus, em específico, a DER II que introduz os “autoconsumidores de energias renováveis de ação conjunta” e as “Comunidades de Energia Renovável”(CER) [11][12].

Recentemente estudos apontam evidências sobre os benefícios econômicos do compartilhamento da geração fotovoltaica em prédios com vários apartamentos. Para residentes de apartamentos, grandes áreas de telhado podem oferecer economias de escala na instalação fotovoltaica, enquanto oportunidades para agregar várias cargas domésticas podem criar perfis de carga mais planos e aumentar o autoconsumo com benefícios econômicos esperados, o potencial da energia fotovoltaica compartilhada e o sucesso das comunidades de energia também podem ser abordados, explorando a energia fotovoltaica em um edifício ou em vários edifícios [13].

A partilha de energia permite que as comunidades de energia, compostas por múltiplos membros que colaboram para um bem maior, diminuam a sua dependência energética da rede elétrica promovendo o autoconsumo [14][15]. Nos modelos de partilha de energia, um recurso

pertencente a um consumidor pode ser utilizado por um ou mais consumidores. Existem várias opções para implementar mecanismos de partilha de energia baseado na partilha de recurso [16]. Pode ser implementado como um acordo um para um em que o utilizador do recurso paga diretamente ao proprietário do recurso. Desse modo, este trabalho engloba um modelo de partilha de energia para edifícios e comunidades energética, bem como a implementação do programa DR.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de dissertação é a concessão e implementação de um modelo de partilha de energia para comunidades energéticas. Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividi-lo em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- Estudo do estado da arte na área do trabalho;
- Concessão e implementação de modelos de partilha de energia para comunidades energéticas;
- Criação de casos de estudo realistas a utilizar no trabalho;
- Simulação dos casos de estudo e análise de resultados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1, é feita uma introdução ao tema desta dissertação, em que se apresentam o contexto e a motivação, assim como as questões de investigação que se pretendem responder. Referem-se ainda os objetivos do tema, e a organização temática de cada capítulo.

No capítulo 2, é descrito o estado da arte, onde são referidos os pontos relevantes que englobam a temática, para isso é feita uma revisão bibliográfica.

No capítulo 3, é proposto um novo modelo de partilha de energia com aplicação em comunidades de energia em edifícios. Além disso, temos a implementação do programa DR na redução de consumo.

No capítulo 4, apresentam-se casos de estudos voltados à aplicabilidade do modelo proposto, bem como do programa DR e o impacto gerado.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões que resultam do trabalho desenvolvido e são expostas as respostas às questões de investigação.

2. ESTADO DA ARTE

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos temas de maior relevância inerentes à realização da presente dissertação.

Na secção 2.1 discorre-se a respeito das redes inteligentes correlacionadas aos novos usuários *prosumers*, nas quais são trazidas diferentes funções que esse usuário dispõe;

Na secção 2.2 é apontada a importância de aderir ao uso de energia renováveis, bem como, o potencial que a mesma possui em edifícios eficientes com ênfase na energia solar fotovoltaica;

Na secção 2.3 é realizado um panorama geral, sobre os principais conceitos da energia solar, com ênfase nos tipos de sistemas mais utilizados;

Na secção 2.4 é tratado sobre a definição de autoconsumo, tais quais, as distintas classes que o mesmo possui;

Na secção 2.5 são abordadas as diversas definições de Comunidades de Energia Renovável (CER) e os tipos de uma CER. Por fim, são abordados diferentes modelos de propriedade e assinatura;

Na secção 2.6 é explanado o conceito de *transactive energy* e suas principais características. Por fim, é apresentada uma figura alusiva ao conceito;

Na secção 2.7 é trazida uma base firme sobre o programa *Demand Response*, com definições, tipos, benefícios e aplicação em edifícios;

Na secção 2.8 explora-se a teoria dos jogos, mergulhando em jogos cooperativos com ênfase no modelo de alocação de valor de *Shapley*.

2.1 REDES INTELIGENTES

As redes inteligentes são redes sustentáveis de autocorreção que permitem a distribuição bidirecional de energia e informações na rede elétrica. Com isso, existe um novo tipo de usuário de energia que consome, produz, armazena e compartilha energia com outros usuários da rede chamado de *prosumer* (produtor e consumidor) o qual é um usuário que opera na complexa rede de valor energético. Como participantes ativos, eles impulsionam a sustentabilidade do processo de compartilhamento de energia. Embora sejam participantes que agregam valor no sistema de energia em evolução [17].

Os *prosumers* também podem contribuir para o ecossistema de energia digital. Além de estarem envolvidos na produção de energia, também podem envolver-se em processos de inovação e criação de valor por meio de pontos de contatos digitais, como a web, interfaces de usuário e dispositivos e aplicativos móveis. Alguns exemplos dessa inovação e criação de valor são os processos do mercado de energia relacionados ao monitoramento de dados, análise de dados e outras áreas de fluxos físicos e financeiros de energia. Também atuam no desenvolvimento de soluções inovadoras por meio do compartilhamento de ideias e do *feedback*, participando ainda no apoio à flexibilidade distribuída no mercado de energia, gerenciando suas programações de produção e consumo de energia e fornecendo capacidade de armazenamento descentralizada [17][18].

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energia renovável são o sol, a água, o vento, a biomassa e a geotérmica. Com o avanço da tecnologia foi permitido ao ser humano produzir energia renovável e o seu contínuo avanço será determinante para o aumento de produção desse tipo de energia [19]. Essas fontes de energia renováveis são abundantes e podem, ao contrário das não renováveis, serem usadas sem comprometerem as gerações futuras, uma vez que existem na natureza em larga escala e, portanto, é imperativo que a sua utilização em edifícios seja incentivada. Normalmente a produção de energia em uma comunidade de energia renovável é derivada de

fontes de energia renováveis, sendo a solar fotovoltaica (FV) a mais encontrada devido à sua acessibilidade e tecnologia, nível de rapidez, tornando-a usual para contextos em diferentes escalas como por exemplo, um edifício ou uma central de grande escala [20].

2.3 ENERGIA SOLAR

A energia elétrica fotovoltaica é gerada pela conversão da luz solar em corrente elétrica contínua por meio do efeito fotovoltaico (Figura 1), um fenômeno físico causado pela exposição de células fotovoltaicas – formadas por semicondutores sensíveis à luz visível - à luz solar [21]. O efeito fotovoltaico ocorre quando a junção $p - n$ cria uma região de depleção entre as camadas p e n por meio de um campo elétrico formado pela migração dos elétrons na camada p e lacunas na camada n . O campo elétrico fornece uma força contrária ao processo de troca contínua. Quando um fóton com energia suficiente atinge o material, um elétron é excitado pelo fóton e entra na banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência [1].

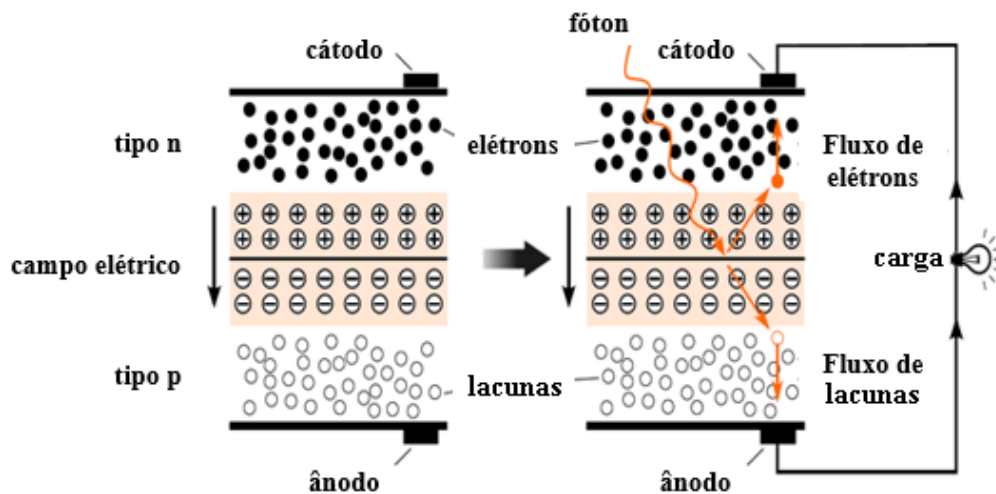


Figura 1 Efeito fotovoltaico [1]

Devido ao campo elétrico presente na região de depleção, o elétron e a lacuna são deslocados da junção em direções opostas: as lacunas irão se concentrar no ânodo, enquanto os elétrons se moverão em direção ao cátodo, sendo separados pela região de depleção (o campo elétrico na junção $p - n$). Quando o ânodo e o cátodo são conectados por um circuito externo, os elétrons fluem para “preencher” as lacunas, gerando uma corrente contínua [1]. Um sistema de energia solar fotovoltaico é composto pelos seguintes componentes: arranjos de módulos fotovoltaicos para absorver e converter luz solar em eletricidade, controlador de carga e baterias, caso o sistema inclua armazenamento da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, inversores, para converter a corrente elétrica contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos ou baterias para corrente alternada, podendo ser fornecida tanto à instalação consumidora quanto à rede elétrica externa, cabeamentos e demais dispositivos de proteção, supervisão e controle [1].

Um sistema de geração de energia distribuída pode ser classificado em *Off-Grid* (Isolado da rede elétrica) e *On-Grid* (Conectado à rede elétrica). Quando o sistema emprega mais de uma fonte de energia, este é denominado sistema híbrido. Em contrapartida, os sistemas *Off-Grid* são isolados, sem conexão com a rede elétrica, e precisam de um sistema de armazenamento para a energia gerada, normalmente um banco de baterias. Os sistemas *On-Grid* são conectados à rede, tornando-se dependente da rede elétrica da concessionária para armazenar os excedentes gerados, a energia excedente é medida e contabilizada por um relógio bidirecional, localizado no padrão de entrada da instalação.

Um sistema *On-Grid* é composto por um painel fotovoltaico, inversor CC-CA e proteções elétricas (Figura 9) [22]. No sistema *Off-Grid* (Isolado da rede elétrica) faz-se necessário controladores de carga, bateria, inversor *Off-Grid* e proteções elétricas correspondentes, conforme ilustra a figura 3.

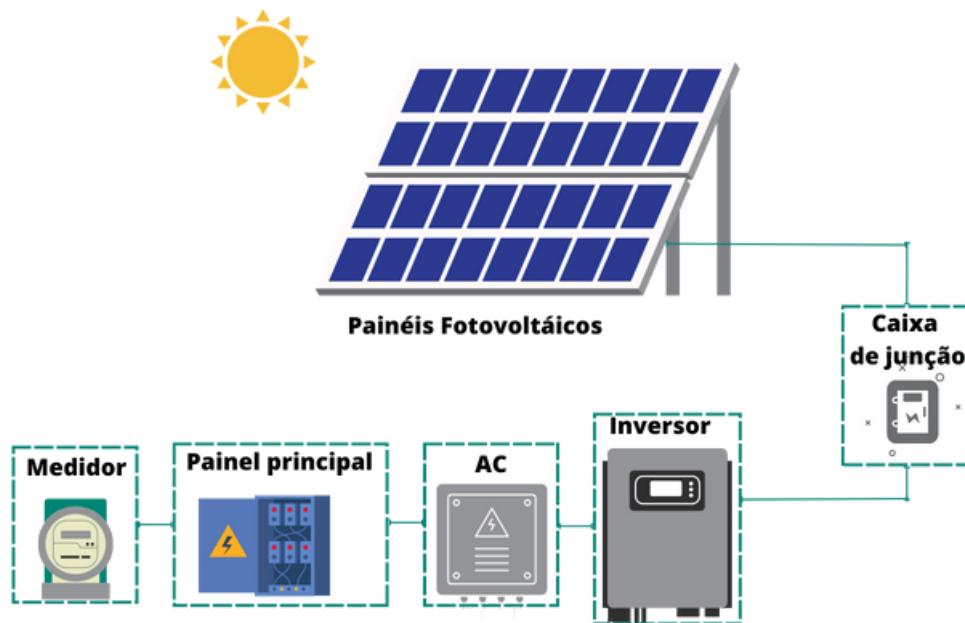


Figura 2 Componentes do sistema fotovoltaico *On-Grid*

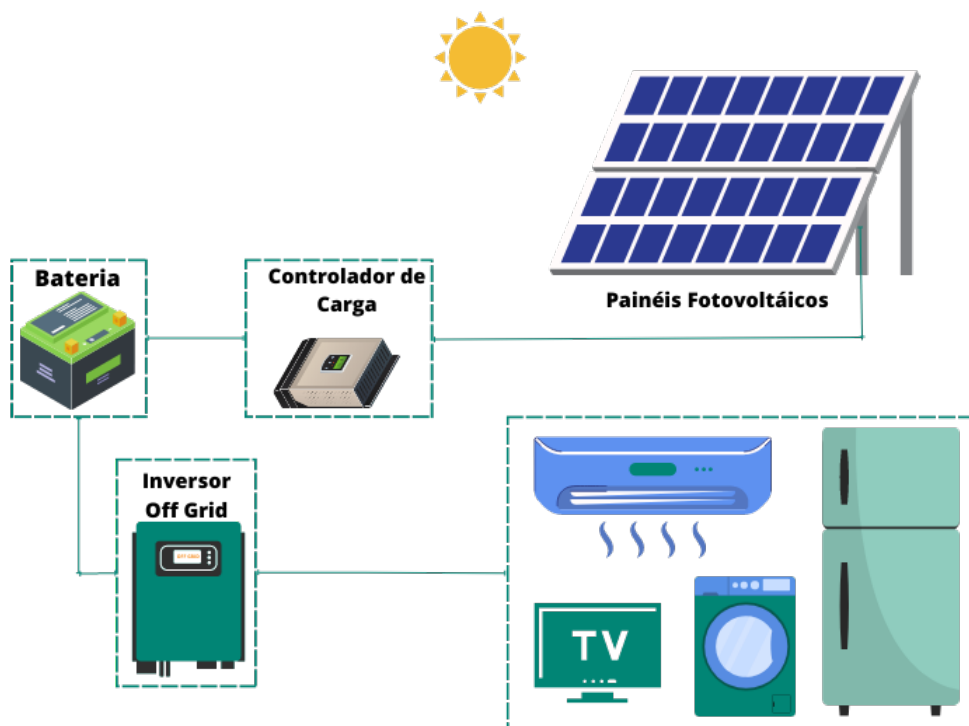


Figura 3 Componentes do sistema fotovoltaico *Off-Grid*

2.4 AUTOCONSUMO

O autoconsumo possui duas classes distintas: o autoconsumo individual, o autoconsumo coletivo [23]. Todas as classes citadas têm como base a produção de energia proveniente de fontes renováveis, diferenciam-se entre elas principalmente pela maneira de como a energia

gerada é consumida. O autoconsumo tornou-se uma solução na qual é possível para o consumidor satisfazer parte das suas necessidades energéticas com a possibilidade de injetar na rede, armazenar ou vender o excedente de produção [18][24].

2.4.1 Autoconsumo Individual

Ocorre quando a produção de energia é feita no interior da instalação onde é consumida, quando a Unidades de Produção (UPAC) para autoconsumo está conectada apenas a uma única instalação de utilização, que pode ser uma residência, um edifício, dentre outros. O autoconsumo individual permite ao consumidor final não só produzir e consumir a energia produzida, mas também a possibilidade de a armazenar em baterias ou vender [18][24].

2.4.2 Autoconsumo Coletivo

O autoconsumo coletivo também realiza a produção de energia por meio de fontes renováveis, no entanto, este possibilita que várias instalações de utilização possam se conectar entre si, quando há uma proximidade geográfica e elétrica (Figura 4). Um exemplo de modelo são autoconsumidores que se encontram no mesmo edifício, local de moradias ou apartamentos, onde a distribuição da energia pelos diversos consumidores poderá ser através da rede interna do edifício, sendo necessário o pagamento da taxa de utilização da rede [18][25][24].

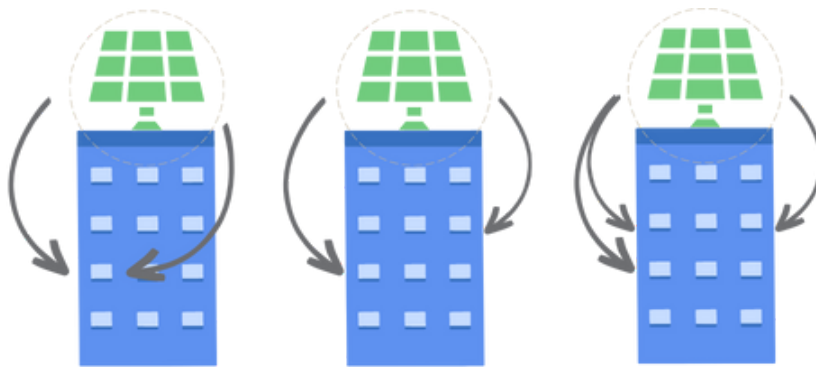


Figura 4 Esquema de autoconsumo coletivo de energia renovável

2.5 COMUNIDADE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

As Comunidades de Energia Renovável têm como finalidade promover benefícios ambientais, econômicos e sociais à comunidade geral, sem foco em lucros financeiros. O consumidor final tem o direito de participar desde que cumpra com seus direitos e obrigações e não pode ser sujeito a condições ou a procedimentos injustificados ou discriminatórios que impeçam a sua participação [26][20].

2.5.1 Definições de comunidades de energia

Embora esse assunto tenha sido estudado durante vários anos, ainda existem muitas nomenclaturas associadas à ideia das comunidades energéticas [16]. No entanto, em geral, podemos dizer que as CER podem ser relacionadas a comunidades que estão envolvidas em atividades referente à energia por várias razões e sob várias formas, desde programas de sensibilização para a energia, a projetos energéticos que envolvem a propriedade comunitária, a energia comunitária cooperativas (Figura 5). Mesmo como um caso mais específico das CER, como a energia solar onde as comunidades também têm várias nomenclaturas, em alguns casos sendo considerados ligeiramente distintos uns dos outros (Tabela 1).



Figura 5 Esquema de comunidades de energia renovável

Tabela 1 Definições para comunidades energéticas

Referência	Definição
[27]	"A comunidade de energia pode ser amplamente relacionada a um grupo de pessoas com interesses comuns que se envolvam coletivamente em atividades referida com a energia para várias razões, sob várias formas, dentro de um determinado lugar"
[28]	"A ideia de comunidades energéticas está intrinsecamente ligada à possibilidade de diferentes utilizadores explorarem coletivamente a energia gerada por uma central elétrica, por exemplo de energia renovável"
[29]	"As CER são estruturas sociais e organizacionais, tipicamente redes de lares e empresas, concebidos para cumprir objetivos específicos dos membros, tais como possuir coletivamente ou participar em projetos relacionados com a energia, ou partilhar energia no âmbito local redes para fins económicos ou de autossuficiência"
[30]	"As Comunidades energéticas são definidas como iniciativas de base comunitária para a reorganização dos sistemas energéticos locais para fomentar a utilização de recursos energéticos distribuídos e de práticas de poupança e eficiência energética"
[31]	"Uma CER é um termo geral para diferentes tipos de juntas propriedade de instalações energéticas, que se assume democratizar a tomada de decisões e a distribuição de benefícios económicos e sociais da produção de energia"
[32]	"Uma CER liga uma variedade de ações coletivas de energia (por exemplo, geração, distribuição, fornecimento, agregação), consumo, partilha, armazenamento de energia, e prestação de serviços relacionados com a energia), envolvendo uma grupo de membros ou partes interessadas locais no a tomada de decisões e a proteção do ambiente, benefícios económicos ou sociais para a sua comunidade membros e/ou as áreas locais"

2.5.2 Estruturas de propriedade de comunidades de energia solar

Diferentes práticas de comunidades de energia solar têm surgido em tempos recentes. Na prática solar convencional dessas comunidades, um sistema fotovoltaico é instalado fora do local, em outra instalação ou fora do local da comunidade. Além disso, os clientes que subscrevem eletricidade produzida recebem a sua parte de benefícios com base em sua parte no sistema fotovoltaico. Possíveis estruturas de propriedade dispostas em três principais famílias [33]:

a. Provedor local de energia (PLE): Ocorre quando um único agente possui a totalidade da

capacidade de produção ou armazenamento do toda a rede local e os outros agentes são estritamente consumidores. O proprietário da fábrica pode ser um produtor ou um *prosumer* (produtor e consumidor).

b. Comunidade Energética Local (CEL): É o caso em que uma planta comunal é partilhada entre todos ou um grupo de agentes, as ações poderiam ser distribuídas igualmente ou de acordo com outros princípios como a energia utilizada a partir da planta ou a parte do investimento inicial.

c. Mercado Local de Energia (MLE): É o mais complexo e forma livre de todas as estruturas; é caracterizado pela presença de múltiplos produtores, consumidores e *prosumer*. Nesse arranjo, a interação entre os agentes pode alcançar complexidade significativa e os agentes poderiam alcançar uma maior ganhos através do envolvimento em comportamentos inteligentes. Para que os serviços públicos, desenvolvedores e clientes comecem a trabalhar com energia solar, comunidades energéticas precisam definir o modelo de propriedade e condições de subscrição, aplicação de incentivos, e processamento créditos [34].

2.5.3 Modelo de propriedade

Quanto ao modelo de propriedade, podemos classificá-lo em [16]:

a. Propriedade da utilização: A utilidade é proprietária/operacional de um projeto que é aberto à participação voluntária do contribuinte e financiado através de capital utilitário e/ou subscrições de contribuintes de taxas.

b. Propriedade de terceiros: O promotor é proprietário/operador de um projeto que está aberta à participação dos contribuintes. Financiado através de capital de terceiros, capital de utilidade, e/ou subscrições de contribuintes.

c. Entidade com fins especiais - utilidade: A utilidade cria uma entidade separada empresa comercial para desenvolver um projeto solar comunitário ou utilizando a subsidiária existente com fins lucrativos.

d. Entidade com fins especiais - clientes: Indivíduos juntam-se a uma empresa comercial para desenvolver um projeto solar comunitário.

e. Sem fins lucrativos: Uma empresa beneficente sem fins lucrativos administra um projeto solar comunitário em nome de doadores ou membros.

2.5.4 Modelo de assinatura

Quanto ao modelo de assinatura, podemos classificá-lo em [16]:

- a. Comprar de painéis: Os clientes pagam uma taxa adiantada por todas as gerações futuras de um painel ou de uma parte e obtêm créditos nas faturas ou créditos financeiros.
- b. Painéis de aluguel: Os clientes fazem um pagamento adiantado ou contínuo a fim de garantir energia por um período finito.
- c. Investimento no sistema: Os clientes juntam-se e cada um deles pagam uma percentagem dos custos do projeto para receber um pro rata quota de geração.
- d. Compra de energia/capacidade: Os clientes inscrevem-se para um fixo capacidade (kW) ou geração (kWh) por mês, e recebem um crédito nas suas contas.

2.6 TRANSACTIVE ENERGY

Os conceitos de *Transactive Energy (TE)* (Energia Transativa) foram definidos a fim de alcançar transações bidirecionais de energia em um sistema eficaz orientado para o mercado. A TE utiliza ferramentas econômicas de automação e controle para trocar energia com base no valor econômico e nas restrições operacionais (Figura 6) [2].

Esse sistema é composto por participantes coordenados que usam ferramentas de automação para comunicar e trocar energia com base em restrições de valor e confiabilidade da rede. As transações econômicas são baseadas no mercado e funcionalidade de controle para negociação e compartilhamento de energia entre *prosumers* produtores de energia renovável e convencional, sistemas de armazenamento e consumidores ativos dentro de um sistema de energia elétrica. Dessa forma, com o sistema de energia transacional, a energia está tornando-se uma mercadoria para os clientes, os quais podem negociar sua energia excedente em tempo real ou de forma diferida [2][35][36].

Um sistema transativo de energia é uma plataforma de comercialização de energia estabelecida principalmente no nível de distribuição, que permite que entidades de geração e consumo de média ou pequena escala participem diretamente dos mercados locais de energia e negociem automaticamente sua energia através de ações de negociação entre si [2]. Isso contribui para o equilíbrio dinâmico entre oferta e demanda nas comunidades energéticas locais [37].

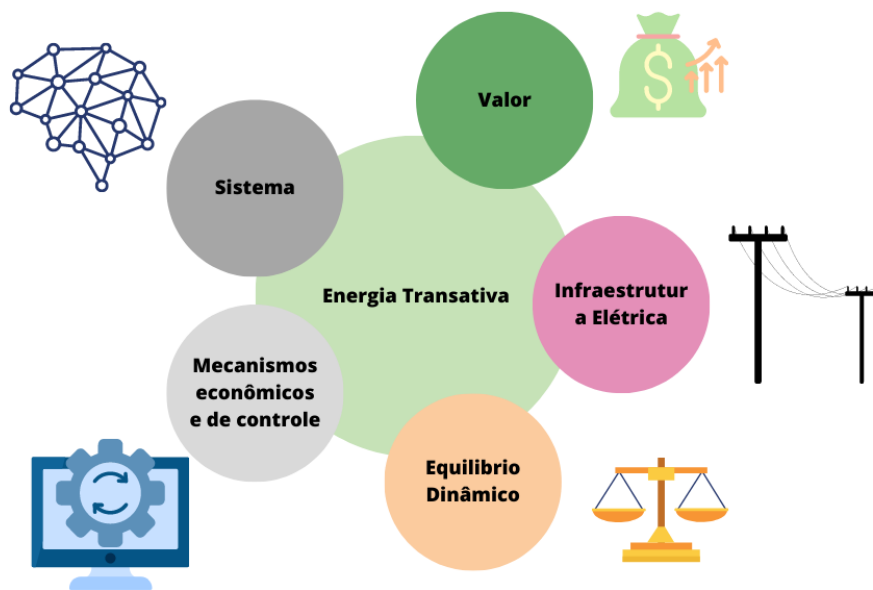


Figura 6 Conceito de energia transativa [2].

Além disso, a TE descreve a convergência de tecnologias, políticas e direcionadores financeiros em um mercado ativo de prossumidores, que são edifícios, veículos elétricos, microrredes, VPPs (*Virtual Power Plants*) dentre outros ativos. Essa convergência é gerenciada por meio de uma rede definida por software, que utiliza incentivos baseados no mercado para garantir a confiabilidade e a resiliência da rede. Aplicativos de software utilizam sinais econômicos e informações operacionais para coordenar e gerenciar a produção e/ou consumo de eletricidade dos dispositivos na rede [38].

Dentro desse contexto, existem técnicas para gerenciar a geração, consumo ou fluxo de energia elétrica dentro de um sistema de energia elétrica por meio do uso de construções econômicas ou baseadas no mercado, levando em consideração as restrições de confiabilidade da rede [39]. Em suma, a TE propõe um livre mercado habilitado para internet, onde os dispositivos do cliente e os sistemas de rede podem negociar a maneira adequada de resolver seus problemas mútuos e estabelecer o preço adequado para seus serviços, quase em tempo real. Esse sistema de mecanismos econômicos e de controle busca o equilíbrio dinâmico de oferta e demanda em toda a infraestrutura elétrica, utilizando o valor como parâmetro operacional chave [40].

2.7 DEMAND RESPONSE

O conceito de *Demand Response* (Resposta à Demanda) é internacionalmente reconhecido como uma solução eficaz e economicamente viável para manter o equilíbrio entre a oferta e a procura, garantindo a confiabilidade e a segurança do sistema. Consiste em uma ferramenta para reduzir picos de demanda e gerenciar o desenvolvimento da rede [41]. Em geral, os consumidores participam da DR ajustando suas cargas elétricas ou geração de energia durante um período específico em resposta a emergências no sistema ou aumentos nos preços da energia. Além disso, a DR desempenha um papel relevante ao fornecer diversos serviços complementares, como controle de frequência, suporte à rede e serviços auxiliares para reiniciar o sistema [42].

A DR estabelecida para adaptação do consumo de eletricidade pelos recursos do lado da demanda em resposta a mudanças no preço da eletricidade ou ameaças à confiabilidade do sistema, engloba uma variedade de medidas para afetar o consumo de energia. Essas medidas incluem a redução de picos, a limitação da demanda, o crescimento da carga e a reprogramação das demandas de energia em nível de edifício [43]. Os programas de DR, que visam modificar o consumo de energia a curto prazo, geralmente se baseiam em modificações específicas de carga com restrição de tempo. Nesse contexto, algoritmos de controle e técnicas de automação desempenham um papel essencial na otimização do fornecimento de energia, especialmente sob uma estrutura de DR. É importante ressaltar que as medidas de DR podem ser implementadas em diferentes níveis de automação [44].

Existem medidas de DR manuais, que exigem intervenção humana para ajustar cargas ou padrões de demanda, tanto ao nível do usuário quanto a nível central. Há também medidas semiautomáticas, onde uma pessoa opera um sistema centralizado para iniciar a estratégia de resposta à demanda para um conjunto de edifícios, seguida da otimização por algoritmos de controle. Além disso, existem estratégias totalmente automatizadas de DR, acionadas por sinais externos que ativam algoritmos pré-programados, sem a necessidade de intervenção humana direta [45]. A principal preocupação é garantir que qualquer modificação nos padrões de consumo não prejudique os serviços e o conforto dos usuários. Portanto, a integração de algoritmos de controle e otimização com modelos numéricos de construção, capazes de prever os perfis de carga dos edifícios e realizar avaliações detalhadas de conforto, é fundamental para o desenvolvimento completo da DR em edifícios [46].

2.8 TEORIA DOS JOGOS

A teoria dos jogos é um campo multidisciplinar que se desenvolveu ao longo dos séculos, abordando situações estratégicas e colaborativas. Para entender sua evolução, exploraremos primeiro o contexto histórico da teoria dos jogos, em seguida, mergulharemos nos jogos cooperativos e, por fim, examinaremos o modelo de valor de *Shapley*, uma ferramenta crucial para a alocação justa de recursos em jogos colaborativos.

2.8.1 Definição

A teoria dos jogos, em sua essência, é uma estrutura matemática que estuda iterações estratégicas entre agentes racionais, nos quais as decisões de um agente afetam as escolhas e os resultados dos outros agentes [47]. Concentra-se em analisar cenários nos quais cada agente busca maximizar seu próprio interesse, levando em consideração as escolhas dos demais. Essa teoria é fundamentada em conceitos como jogos, estratégias, *payoffs* (recompensas ou resultados) e equilíbrios [47]. Além disso, pode ser dividida em duas categorias principais: jogos não cooperativos (competitivos) e jogos cooperativos. Os jogos não cooperativos são caracterizados por conflitos de interesse irreconciliáveis, o que impede a cooperação e a formação de coalizão entre os participantes (*players*). Os jogos cooperativos envolvem-se em decisões tomadas de forma coletiva, baseadas em confiança mútua, com o objetivo de maximizar os benefícios de todos os envolvidos, minimizando ineficiências, de forma que nenhum dos participantes seja prejudicado [48].

2.8.2 Jogos cooperativos

A teoria de jogos cooperativos sustenta-se na definição (n, v) , em que n é o número total de participantes (*players*) no jogo e v é a função característica (ou o valor da coalizão). A função v determina o ganho $v(S)$ para qualquer subconjunto não vazio de n ($S \subseteq n$), em que S é o número de *players* da cooperação. O ganho $v(S)$ pode ser distribuído entre os membros da cooperação ($S \subseteq n$). O valor de uma cooperação vazia (em que nenhum membro participa) é igual a zero ($v(\emptyset) = 0$). As cooperações entre participantes são formadas por meio de fusões e divisões. Entretanto, existe também um conceito chamado "grande cooperação" que ocorre quando todos os participantes n pertencem à mesma cooperação contribuindo com a mesma finalidade [49][50].

No sistema de cooperação é fundamental determinar o pagamento correspondente a cada

players da cooperação. Numa cooperação, apesar de todos terem um foco coletivo, nem todos podem colaborar de igual modo, isto é, há *players* com mais recursos para atingir o objetivo geral. Estes têm uma atuação maior no resultado e como efeito devem ter direito a uma recompensa (parcela) maior. Nesse sentido, para determinar o valor (justo, igualitário) da parcela, para alocar a cada *players* da cooperação, há alguns modelos (indicadores) de jogo como o valor de *Shapley* [48].

2.8.3 Valor de Shapley

O valor *Shapley*, nomeado em homenagem a Lloyd Shapley por sua introdução em 1951 e pelo Prêmio Nobel de Economia de 2012, é um conceito na teoria dos jogos cooperativos. A pesquisa de *Shapley* abrangeu diversos campos, como jogos estocásticos, estratégicos de mercado, atribuição, modelos de mercado cooperativos e não cooperativos, votação, índices de poder, jogos potenciais, alocação de custos e teoria da organização [51]. Para Hart (1985) o valor de *Shapley*, é caracterizado por suas propriedades desejáveis, baseado na análise das contribuições marginais de cada jogador nas possíveis coalizões em que participam com o objetivo de dividir o excedente de forma justa entre os participantes, com a justiça sendo definida pela contribuição de cada indivíduo, não necessariamente pela equidade [52]. Corroborando, Shubik (1962), foi o primeiro a aplicar os conceitos do valor de *Shapley* em situações de ganhos decorrentes da cooperação entre departamentos ou unidades de negócios de uma empresa. Isso implica que o desempenho de uma empresa pode ser visto como a soma dos ganhos potenciais provenientes da coordenação eficiente de todas as partes do negócio [53]. Conforme destacado por Serrano (2012), o valor *Shapley* é baseado em axiomas simples, é facilmente compreensível e possui várias aplicações possíveis. Isso o torna uma referência valiosa para ilustrar as características de jogos cooperativos e suas vantagens em relação às soluções não cooperativas [51].

O valor de *Shapley* consiste em determinar a diferença entre os ganhos e os custos de cada *players* pertencente à cooperação. Esse método também pode ser aplicado em coalizão que consistem na partilha de energia entre *players*. Dessa maneira, é possível estimar de forma justa as contribuições individuais de custo e benefício para a operação conjunta de energia [49][54][55]. Nesse caso, o valor de *Shapley* determina a parcela correspondente à divisão de energia entre membros da cooperação, através da partilha mútua. Sendo assim, o valor de *Shapley* consiste em alocar energia da geração, incentivando a redução de custos

de geração através da formação de coalizões [54]. Desse modo, o valor de *Shapley*, $\phi_i(v)$, correspondente a cada *player*, pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\phi_i(v) = \sum_{S \subseteq n \setminus \{i\}} \frac{|S|! \cdot (n - |S| - 1)!}{n!} (v(S \cup \{i\}) - v(S)) \quad (1)$$

Onde:

S – Número de *players* da cooperação;

n – Número total de *players* participantes no jogo cooperativo;

v – Função característica que representa o benefício conjunto da cooperação S ;

i – *Player* i do jogo cooperativo.

O valor de *Shapley* $\phi_i(v)$ é alocado a um *player* i de acordo com uma dada função v , que determina o ganho $v(S)$ para um jogo cooperativo (n, v) , com utilidade transferível para o conjunto de jogadores n , medido por uma função v para qualquer subconjunto não vazio de n ($S \subseteq n$). Esse método apresenta diversas vantagens, incluindo a obtenção de equilíbrio orçamentário e a garantia de existência de equilíbrio em qualquer jogo, independentemente de seus parâmetros. Assim, através do valor de *Shapley* é possível determinar, num jogo cooperativo, uma distribuição de pagamento justa, dividindo o pagamento entre os *players* que participam na cooperação. Contudo, no processo de distribuição dos pagamentos a cada um dos *players* deve-se satisfazer as seguintes propriedades [49][54]:

1. **Eficiência:** O valor equivalente ao ganho total de uma cooperação é distribuído entre todos os participantes

$$\sum_{i \in n} \phi_i(v) = v(n) \quad (2)$$

2. **Simetria:** Para *players* equivalentes, por exemplo, i e j , em que $v(S \cup \{i\}) = v(S \cup \{j\})$ para $S \subseteq n$ tal que $(S \cap \{i, j\}) = \emptyset$, em que S não contém i nem j , então os benefícios são equivalentes $\phi_i(v) = \phi_j(v)$.

3. **Linearidade:** Para várias coalizões S , as distribuições de ganhos $\phi_i(n, v)$ e $\phi_i(n, v^*)$ devem corresponder à soma dos ganhos de v e v^* , ou seja, $\phi_i(n, v + v^*) = \phi_i(n, v) + \phi_i(n, v^*)$ para qualquer jogador i pertencente a N (para todo $i \in n$). O jogo $(n, v + v^*)$ é definido como $(v + v^*)(S) = v(S) + v^*(S)$ para cada coalizão S .

4. **Jogador nulo (zero player):** O valor marginal desse jogador é zero para qualquer

cooperação possível. Nesse caso, o valor atribuído a este jogador é zero, ou seja, $v(S \cup \{i\}) = v(S)$ para todo S implica que $\phi_i(v) = 0$.

2.8.4 Estudos que abordam valor de Shapley

A teoria dos jogos e, mais especificamente, o valor de *Shapley* têm sido aplicados em diversos campos para entender melhor as dinâmicas de cooperação, alocação de recursos e tomada de decisões estratégicas. Na Tabela 2, exploraremos alguns trabalhos notáveis que demonstram a aplicabilidade da teoria dos jogos com foco no valor de *Shapley*:

Tabela 2 Aplicações do Valor de *Shapley*

Referência	Título	Conceito
[56]	Incremental Benefit Allocation for Joint Operation of Multi-Stakeholder Wind-PV-Hydro Complementary Generation System With Cascade Hydro-Power: An Aumann-Shapley Value Method	"Alocação Incremental de Benefícios para Operação Conjunta de Sistema de Geração Complementar Eólica, Fotovoltaica e Hidrelétrica de Múltiplas Partes Interessadas Com Energia Hidrelétrica em Cascata: Um Método de Valor de Aumann-Shapley"
[57]	Shapley Values for Feature Selection: The Good, the Bad, and the Axioms	"Valor de Shapley Como Ferramenta de Seleção de Recursos"
[58]	Modified Shapley Value-Based Profit Allocation Method for Wind Power Accommodation and Deep Peak Regulation of Thermal Power	"O Método de Valor de Shapley na Regulação de Pico Profundo de Energia Térmica e Acomodação de Energia Eólica"
[59]	Application of Improved Shapley Value in Benefit Distribution of Industry-University-Research Institute	"Valor de Shapley Usado Para Distribuição de Benefícios da Aliança Indústria-Universidade-Pesquisa"
[60]	Interpretation of Stability Assessment Machine Learning Models Based on Shapley Value	"Interpretação de Modelos de Aprendizado de Máquina Para Avaliação de Estabilidade Com Base no Valor de Shapley"

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Este trabalho visa propor um novo modelo de partilha de energia em edifícios, para isso reúne algumas concepções sobre “Comunidades de energia” e “Produção Solar Fotovoltaica”, bem como assuntos que dizem respeito ao “Modelo de Partilha de Energia Proposto”, *Demand Response* dentre outros tópicos relevantes. Tendo por base os dados previamente levantados, as normas técnicas pertinentes e os referenciais teóricos disponíveis na literatura a respeito de sistemas fotovoltaicos, DR e partilha de energia. A metodologia foi executada por etapas.

3.1 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

Inicialmente, foi realizada uma sistemática revisão com base no Protocolo de Revisão Itens de relatório preferidos para revisões Sistemáticas e Meta-Análise (PRISMA)[61]. Nessa revisão, as bases de dados seleccionadas foram Science Direct, IEEEX, SciElo. Os termos de pesquisa foram escolhidos após uma análise criteriosa de uma revisão da literatura sobre o assunto.

3.2 PLATAFORMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para implementar o modelo proposto, adotou-se a plataforma *Google Colaboratory*, que comporta a linguagem de programação *Python* (Versão 3.10.12), que consiste em uma ferramenta para programação em nuvem disponibilizado por meio do Google. Assim, as principais bibliotecas utilizadas foram: *Pandas* para a manipulação de dados, *Numpy* como ferramenta de operações matemáticas para matrizes e vetores, *Matplotlib* para visualização dos dados, e *Itertools* para dividir uma lista em subconjuntos. Consideraram-se as especificações de CPU: Intel Xeon 2.20 GHz, RAM: 13 GB, GPU: Tesla K80 accelerator, 12 GB GDDR5 VRAM.

3.3 MODELO DE PARTILHA PROPOSTO

Nesse contexto explora-se um estudo de coalizões para a tomada de decisão na divisão de energia para uma comunidade de um edifício. Para isto, é utilizada a metodologia de partilha denominada valor de *Shapley* (localizada na literatura como uma aplicação da Teoria dos Jogos) para encontrar uma decisão igualitária e justa de energia (podendo ser rateio de energia). Nesse estudo está ilustrado ainda o detalhamento desse processo a partir da modelagem matemática e aplicação do DR (Figura 7).

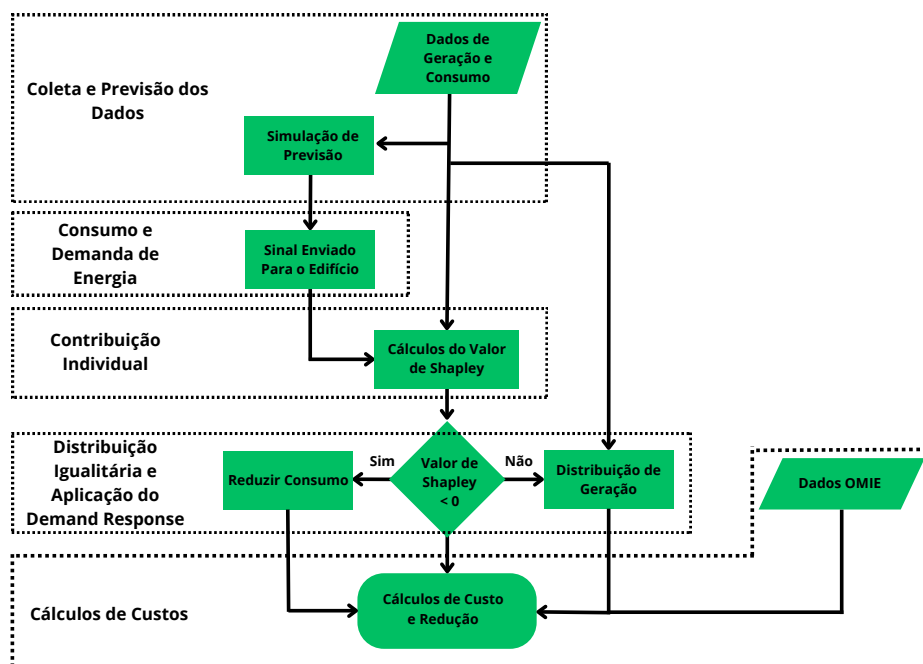


Figura 7 Fluxograma - Modelo de Partilha com Demand Response

3.3.1 Coleta e previsão de dados

Após a escolha da plataforma, utilizou-se um conjunto de dados de consumo e geração de uma comunidade de energia [62]. Tais dados foram adaptados para um sistema de geração fotovoltaica em um edifício vertical com 10 apartamentos. Para aplicação do modelo convencionou-se o período de intervalo de hora por hora em um mês, totalizando 720 períodos de tempo de uma hora. Os dados de consumo foram organizados em vetores contendo *DataFrames*, tabelas de dados, e separados por cada apartamento. Em seguida, foram realizadas estimações arbitrárias de um modelo de previsão de geração e consumo com a margem de erro entre -5% e 15%.

3.3.2 Consumo e demanda de energia dos apartamentos

Para calcular os dados pertinentes em relação ao consumo e demanda da energia, no primeiro momento separou-se os apartamentos do edifício por lista (Equação 3) e subconjuntos com uma permutação de 1024 combinações possíveis (Equação 4).

$$L_A = [1, 2, 3, \dots, n] \quad (3)$$

$$C_p = C(L_A) \quad (4)$$

Onde:

L_A : Vetor de apartamentos

C_p : Subconjuntos criados a partir de L_A

O consumo de energia real ($Cons_i^t$) (Equação 5) e consumo de energia prevista ($PCons_i^t$) (Equação 6) foi atribuído conforme o consumo para cada apartamento (i) em determinado um instante de tempo (t).

$$Cons_i^t = \text{Dados Reais de consumo} \quad (5)$$

$$PCons_i^t = \text{Dados Previstos de consumo} \quad (6)$$

Onde:

$Cons_i^t$: Consumo(Real)

$PCons_i^t$: Consumo (Previsto)

Na equação 7 verifica-se, a partir da previsão de geração e consumo, se a geração futura está em equilíbrio com o consumo futuro do edifício, por meio dessa estimação é possível emitir um sinal de alerta com intuito de sugerir mudanças no consumo da energia dos apartamentos do edifício. Logo, algumas ações devem ser executadas, conforme o sinal. Assim, quando o $Sinal^t = -1$ a demanda de energia precisa diminuir, caso contrário se o $Sinal^t = 1$ a demanda de energia pode aumentar e se o $Sinal^t = 0$ os apartamentos estão em equilíbrio com a geração fotovoltaica e não será necessário alterações na demanda (Equação 8).

$$T_p^{(t+1)} = PG_{rv}^{(t+1)} - \sum_{i=1}^n PCons_i^{(t+1)} \quad (7)$$

$$Sinal^t = \begin{cases} 1, & \text{se } T_p^{(t+1)} > 0 \text{ e } PG_{rv}^{(t+1)} > 0 \\ -1, & \text{se } T_p^{(t+1)} < 0 \text{ e } PG_{rv}^{(t+1)} > 0 \\ 0, & \text{se } T_p^{(t+1)} = 0 \text{ ou } PG_{rv}^{(t+1)} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

T_p^t : Demanda total da comunidade

PG_{rv}^t : Geração do sistema de distribuição (Previsto)

3.3.3 Contribuição individual

Para determinar a contribuição individual realizaram-se iterações para cada conjunto de subespaços calculando os valores absolutos de energia total consumida e gerada ($Total_d^t(S)$) e o *Demand Response* total calculado ($Total_{DR}^t(S)$) em que as equações estão em função de S que representa o subespaço calculado.

$$Total_d^t(S) = \left| PG_{rv}^t - \sum_{i \in S} PCons_i^t \right|, S \in C_p \quad (9)$$

$$Total_{DR}^t(S) = \sum_{i \in S} Cons_i^t - PCons_i^t, S \in C_p \quad (10)$$

Onde:

$Total_d^t(S)$: Demanda de energia total no subespaço (S).

$Total_{DR}^t(S)$: Resposta à demanda (*Demand Response*) no subespaço (S).

A seguir as contribuições são divididas e aplicadas à função característica do modelo de partilha com o valor de *Shapley* sendo:

$$v^t(S) = \begin{cases} 0, & \text{se } Total_d^t(S) = 0 \text{ ou } S = \emptyset \\ Sinal^{(t-1)} \frac{Total_{DR}^t(S)}{Total_d^t(S)}, & \text{se } Total_d^t(S) \neq 0 \text{ e } S \neq \emptyset \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

$v^t(S)$: função característica que determina a contribuição dos membros na coalizão.

Na equação 11 quando o denominador for diferente de 0 (para evitar valores indeterminados), e o subespaço for não nulo (para calcular a contribuição no mínimo de um apartamento isolado). Assim, $v^t(S)$ será a relação entre a DR é a energia total consumida e gerada, quando $Total_{DR}^t(S)$ seguir o sinal de aviso $Sinal^t$ o valor resultante será positivo, caso contrário a função interpretará como uma contribuição negativa.

$$\frac{|S|! \cdot (n - |S| - 1)!}{n!} \quad (12)$$

Onde:

n : Número de membros da comunidade

$|S|$: Magnitude do subespaço (quantidade de membros contidos)

Na equação 12 temos a expressão matemática que calcula a probabilidade de uma coalizão em determinado subespaço S , ou seja, é a probabilidade do apartamento estar contido no subespaço.

A equação 13 mostra a fórmula do valor de *Shapley* [63] que irá ponderar as contribuições de cada apartamento em determinado instante de tempo (t):

$$\phi_i^t(v^t) = \sum_{S \subseteq C_p \setminus \{i\}} \frac{|S|! \cdot (n - |S| - 1)!}{n!} (v^t(S \cup \{i\}) - v^t(S)) \quad (13)$$

Onde:

$\phi_i^t(v^t)$: valor de *Shapley* para a identificação da contribuição individual de cada membro

Na equação 13 observa-se a contribuição marginal utilizando os valores da equação 11 para um determinado apartamento, onde $v^t(S \cup \{i\})$ considera o apartamento contido no subespaço e $v^t(S)$ indicaria o mesmo subespaço porém com o apartamento não contido e a subtração entre eles resulta na contribuição do apartamento para $(S \cup \{i\})$ e (S) , e após a soma da contribuição de todos os subespaços em conjunto com a probabilidade de uma coalizão resultando no valor de *Shapley* $\phi_i^t(v^t)$.

$$Xv^t = [\phi_1^t, \phi_2^t, \dots, \phi_n^t] \quad (14)$$

Onde:

Xv^t : Vetor contendo valores de *Shapley* para cada apartamento em determinado instante t

3.3.4 Distribuição igualitária

A distribuição igualitária representa a quantidade de energia disponível para partilhar para os apartamentos do edifício (Equação 15). Calcula-se a necessidade de distribuição de energia para determinado apartamento e a quantidade que será distribuída. (Equação 16).

$$ER_s^t = |G_{rv}^t| \quad (15)$$

$$K_i^t = ER_s^t \cdot \max\{0, \phi_i^t\} \quad (16)$$

Onde:

ER_s^t : Quantidade total de energia que será distribuída para a comunidade;

K_i^t : Validação da distribuição de energia caso a contribuição seja positiva.

Para calcular as contribuições positivas totais da comunidade considerou-se a contribuição positiva total do edifício (Equação 17). Para determinar a quantidade de energia distribuída por apartamento, adotou-se a Equação 18 onde o valor será "0" se $K_i^t = 0$, entretanto se $K_i^t \neq 0$ executa-se a relação entre quantidade total de energia distribuída para comunidade, multiplicado pela fração entre a contribuição positiva de cada apartamento pela contribuição positiva totais da comunidade.

$$T_{Xv}^t = \sum_{\phi \in Xv^t} \max\{0, \phi\} \quad (17)$$

$$ER_i^t = \begin{cases} 0, & \text{se } K_i^t = 0 \\ ER_s^t \frac{\phi_i^t}{T_{Xv}^t}, & \text{se } K_i^t \neq 0 \end{cases} \quad (18)$$

Onde:

T_{Xv}^t : Contribuições positivas totais da comunidade

ER_i^t : Quantidade de energia distribuída por apartamento.

Para encontrar a participação no valor de DR de cada apartamento em um determinado período de tempo (t) utilizou-se a equação 19, na qual o valor será positivo, caso sejam seguidas as orientações do sinal enviado, caso contrário será negativo, e a diferença entre os valores reais e previstos do consumo será a magnitude da participação, sendo apenas uma métrica para diferenciar o erro nos momentos em que o *Demand Response* é ou não obedecido.

$$PART_i^t = \text{Sinal}^{(t-1)}(Cons_i^t - PCons_i^t) \quad (19)$$

Onde:

$PART_i^t$: Cálculo da participação no *Demand Response* com magnitude sendo o erro da previsão. Foram realizados os cálculos da participação no *Demand Response* em relação à demanda prevista para todo o período observado de um mês e dividiu-se as relações em positivas e negativas dadas pelas equações 20 e 21, respectivamente.

$$DR_i^+ = \frac{\sum_{t=1}^{720} \max\{0, PART_i^t\}}{\sum_{t=1}^{720} PCons_i^t} \quad (20)$$

$$DR_i^- = \frac{\sum_{t=1}^{720} \min\{0, PART_i^t\}}{\sum_{t=1}^{720} PCons_i^t} \quad (21)$$

Onde:

DR_i^+ : Valor de $PART_i^t$ que satisfaz a demanda de energia.

DR_i^- : Valor de $PART_i^t$ que não satisfaz a demanda de energia. Em seguida foi analisado a distribuição de energia pelo sistema (Equação 22), e a distribuição da participação positiva do *Demand Response* para cada apartamento em relação aos seus respectivos valores totais (Equação 23) .

$$ERdist_i = \frac{\sum_{t=1}^{720} ER_i^t}{n \sum_{j=1}^{720} ER_j^t} \quad (22)$$

$$DR^+ dist_i = \frac{\sum_{t=1}^{720} \max\{0, PART_i^t\}}{n \sum_{j=1}^{720} \max\{0, PART_j^t\}} \quad (23)$$

Onde:

$ERdist_i$: Distribuição total de energia renovável para cada apartamento. $DR^+ dist_i$: Distribuição da $PART_i^t$ positivo para cada apartamento.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA DEMAND RESPONSE

A partir da aplicação do programa *Demand Response* os apartamentos tendem a diminuir o consumo de energia em determinadas horas com a finalidade de reduzir o custo final. A equação 24 mostra a quantidade de consumo (kWh) que os apartamentos têm que reduzir para alcançar esse objetivo.

$$LD_s^{(t+1)} = \begin{cases} 0, & \text{se } Sinal^t \geq 0 \\ T_p^{(t+1)}, & \text{se } Sinal^t < 0 \end{cases} \quad (24)$$

onde:

$LD_s^{(t+1)}$: Quantidade de energia indicada a ser reduzida na próxima hora para todo o edifício.

$$KL_i^t = LD_s^{(t+1)} \cdot \min\{0, \phi_i^t\} \quad (25)$$

$$TN_{Xv}^t = \sum_{\phi \in Xv^t} \min\{0, \phi^t\} \quad (26)$$

onde:

KL_i^t : Constante que determina se haverá redução de consumo.

TN_{Xv}^t : Soma das contribuições negativas do valor de *Shapley* do edifício no instante t

Para calcular o sinal de controle que determina a necessidade de diminuir o consumo com base no comportamento da contribuição marginal (ϕ_i^t) (Equação 25).

Na equação 26, temos a contribuição negativa total para todo o edifício, no qual a contribuição marginal atual é analisada e caso seja negativa o sistema emitirá um aviso indicando que a quantidade de consumo para determinado apartamento tenha que ser diminuída, pois segundo os valores previstos o *Demand Response* não seria o desejado.

$$LD_i^{(t+1)} = \begin{cases} 0, & \text{se } KL_i^t = 0 \\ LD_s^{(t+1)} \frac{\phi_i^t}{T_{NXv}^t}, & \text{se } KL_i^t \neq 0 \end{cases} \quad (27)$$

onde:

$LD_i^{(t+1)}$: Quantidade de energia indicada a ser reduzida na próxima hora para o apartamento i .

A equação 27 representa a quantidade de energia que o apartamento necessita diminuir para poder se adequar ao programa valor de *Demand Response* no próximo período de tempo.

3.5 CÁLCULOS DE CUSTOS

Cálculos do custo e da redução de gastos considerando o preço, em euros, do kWh, indicados pela variável $V^t(\text{€})$, que é o preço em kWh para aquele instante em que os dados para os preços do OMIE foram coletados de [64] apresentados na Figura 8.

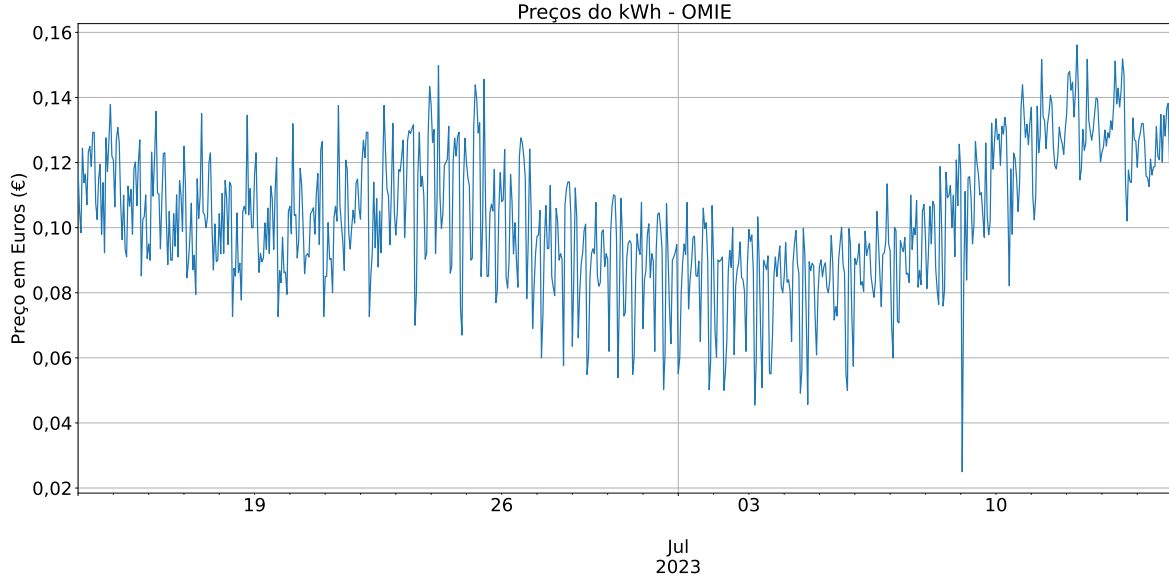


Figura 8 Preços do kWh - OMIE

$$C_i^{ms} = \sum_{t=1}^{720} Cons_i^t \cdot V^t(\text{€}) \quad (28)$$

$$C_i^s = \sum_{t=1}^{720} (Cons_i^t - ER_i^t) \cdot V^t(\text{€}) \quad (29)$$

onde:

C_i^{ms} : Valor pago durante o mês sem a partilha.

C_i^s : Valor pago durante o mês com a partilha.

As equações 28 e 29 calculam o custo em euros (€) para aquele determinado instante de tempo de acordo com a demanda com e sem a partilha respetivamente.

$$CR_i = \frac{C_i^{ms} - C_i^s}{C_i^{ms}} \quad (30)$$

CR_i : Percentual da redução do custo de energia ao utilizar a partilha de energia

A equação 31 faz as mesmas operações para os cálculos de custo, porém utiliza a redução da demanda utilizando o programa *Demand Response* para a redução de consumo (Equação 27).

$$C_i^{sDR} = \sum_{t=1}^{720} (Cons_i^t - ER_i^t - LD_i^t) \cdot V^t(\text{€}) \quad (31)$$

$$CR_i^{pDR} = \frac{C_i^{ns} - C_i^{sDR}}{C_i^{ns}} \quad (32)$$

onde:

C_i^{sDR} : Custo da energia para o apartamento i utilizando a partilha e seguindo as orientações do *Demand Response*.

CR_i^{pDR} : Percentual de redução do custo de energia ao utilizar a partilha de energia junto ao *Demand Response*.

4. CASOS DE ESTUDO

Esta secção apresenta casos de estudo para ilustrar a utilização do modelo proposto. Os casos de estudo abrangem um conjunto de dados de comunidades energéticas disponível no repositório *Zenodo*¹, medidas por medidores de energia trifásico Saia (ale3d5f) conectados a um sistema SCADA², capaz de medir energia a cada dez segundos. No estudo, considerou-se uma comunidade composta por dez membros que representam os apartamentos de um edifício, onde existe uma geração renovável (sistema solar fotovoltaico) que é propriedade da comunidade a qual o modelo é aplicado durante um mês (30 dias) (Figura 9) [62].



Figura 9 Representação do edifício em estudo

¹O Zenodo é um repositório de dados e publicações científicas

²O termo SCADA significa *Supervisory Control and Data Acquisition* (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados, em português). É um sistema de controle e monitoramento utilizado em indústrias e setores para supervisionar e controlar processos industriais e coletar dados em tempo real.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA COMUNIDADE

A Tabela 3 e 4 mostra a caracterização da comunidade de acordo com os valores nominais de consumo e geração dos membros (apartamentos) do edifício.

Tabela 3 Dados de Consumo Reais e Previstos

Membros	Consumo Real Total (kWh/mês)	Consumo Previsto Total (kWh/mês)
Apartamento 1	2.210,92	2.215,63
Apartamento 2	950,80	1.000,46
Apartamento 3	878,26	918,36
Apartamento 4	1.802,42	1.897,96
Apartamento 5	915,41	961,85
Apartamento 6	874,15	916,39
Apartamento 7	1.483,90	1.560,22
Apartamento 8	811,37	850,64
Apartamento 9	2.833,84	2.975,44
Apartamento 10	1.393,51	1.450,98
Total	14.054,64	14.747,98

Tabela 4 Dados de Geração Reais e Previstos

Estrutura	Geração Real Total (kWh/mês)	Geração Prevista Total (kWh/mês)
Edifício	7.907,77	8.294,51

4.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

- Caso I - distribuição estocástica

Para esse, considerou-se uma distribuição estocástica da geração solar fotovoltaica para os apartamentos do edifício, com a adoção de critérios completamente aleatórios.

- Caso II - distribuição com o modelo proposto (valor de *Shapley*)

Para esse, aderiu-se ao modelo de partilha proposto com uso do valor de *Shapley* com intuito de obter uma divisão justa e igualitária da energia gerada para o edifício;

- Caso III - distribuição com o modelo proposto (valor de *Shapley*) e DR

Para esse, utilizou-se o modelo de partilha proposto com uso do valor de *Shapley* e a implementação do *Demand Response* a fim de reduzir o consumo e maximizar as contribuições individuais e consequentemente aumentar a distribuições individuais;

4.3 RESULTADOS

Nessa fase, é apresentado um enquadramento dos casos de estudo I , II, III que permitem avaliar e analisar a eficácia do modelo de partilha de energia, bem como, a implementação do programa *Demand Response*. Ademais, serão, descritas as vantagens e limitações do método adotado.

4.3.1 Caso I - distribuição estocástica

Na figura 10, observam-se a distribuição diária e a média mensal da energia gerada para cada apartamento, respectivamente. Nisso percebe-se que a distribuição da geração está entre 1,22% à 4,70%, em que os apartamentos 5 e 8 recebem abaixo de 255 kWh/mês e os demais inferior a 200 kWh/mês, em que o apartamento 9 tem somente 110 kWh/mês. Enquanto apenas o apartamentos 10 é favorecido com valor acima 350 kWh/mês, representando a maior distribuição de energia, independente da quantidade de consumo individual.

Nota-se também que o apartamento 10 tem picos de 65,4% de distribuição entre os dias 10 a 11 e 21 a 22 da geração total de energia, sendo que o mesmo ocupa o 5º lugar dos maiores consumidores do edifício, ao mesmo tempo o apartamento 9 que tem a menor distribuição, tem um pico de 48,8% de distribuição unicamente no dia 30, apesar de ocupar o 1º lugar dos maiores consumidores. Essa divergência é explicada devido à natureza estocástica do modelo.

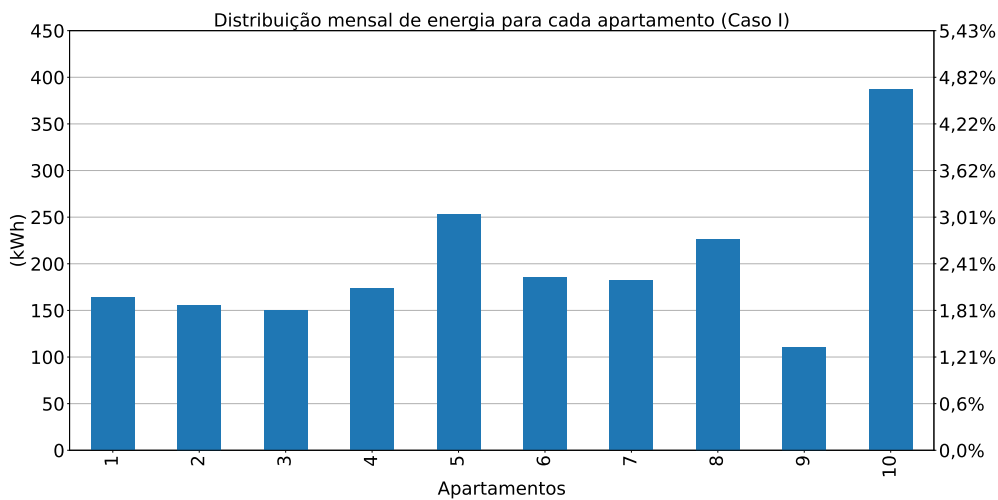
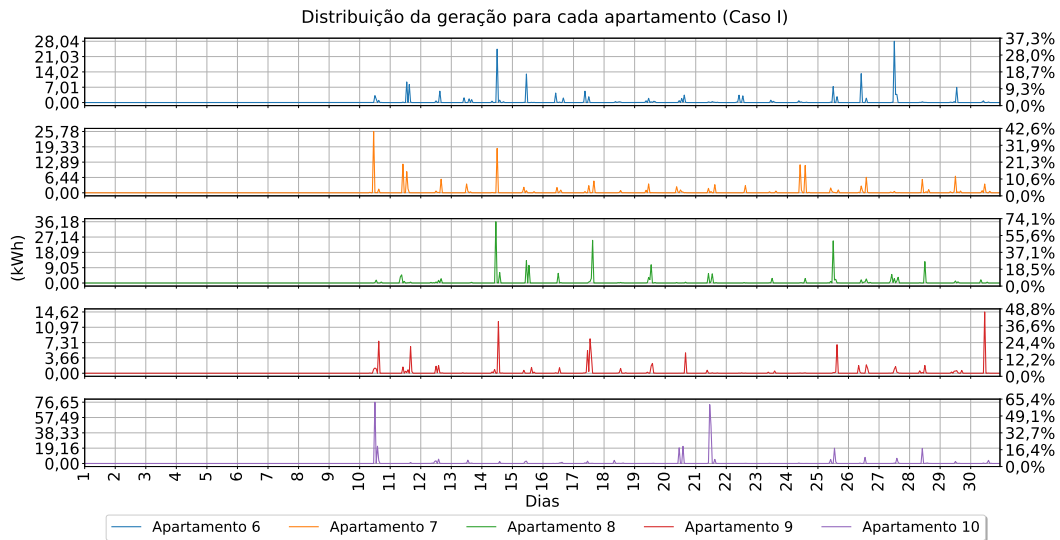
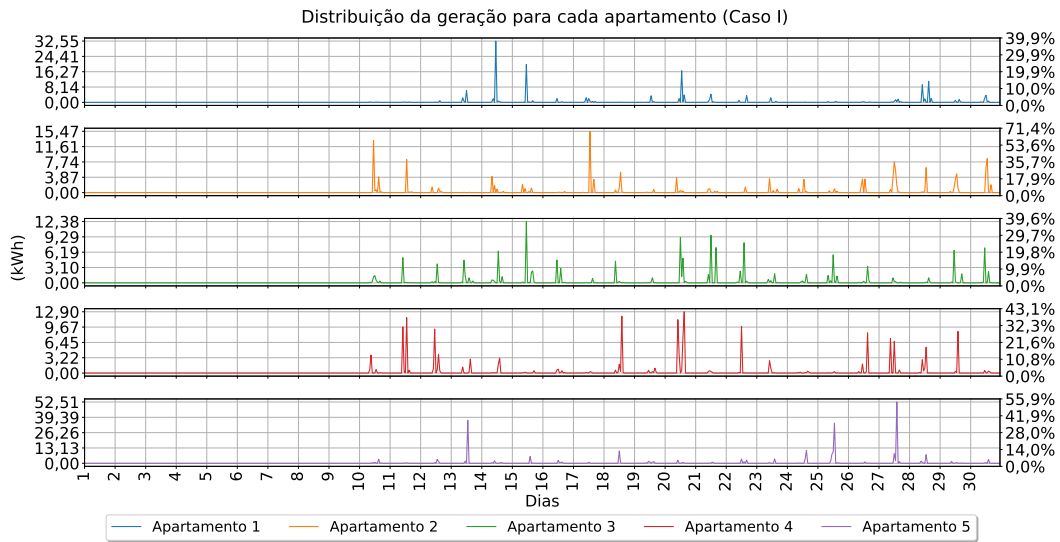


Figura 10 Distribuição diária e média para cada apartamento (Caso I)

Para uma análise detalhada da distribuição, considerou-se horários específicos, destacando horas de transições importantes às 9h da manhã, 12h e 17h da tarde. Na figura 11, alguns apartamentos não recebem energia em certos momentos devido à aleatoriedade. Para o horário das 9h da manhã, os apartamentos 7 e 6 recebem as maiores distribuições entre 14,2% à 18,9% , enquanto o apartamento 2 não recebe distribuição alguma.

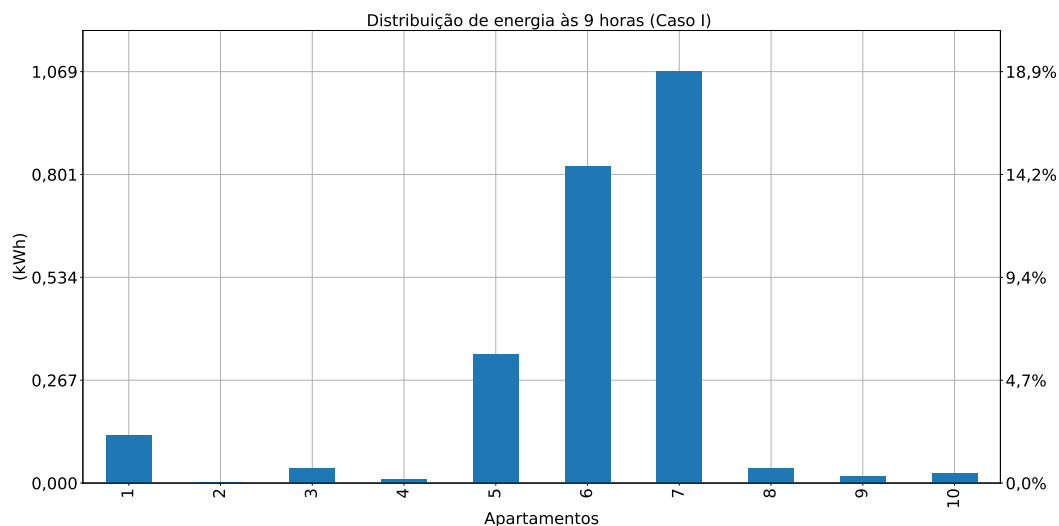


Figura 11 Distribuição às 9h (Caso I)

Na figura 12, às 12h do dia, o apartamento 8 destaca-se com a maior distribuição de energia, representando 12,4%, enquanto os demais apartamentos (1, 2, 3, 6, 7, 9, 10) não recebem essa distribuição.

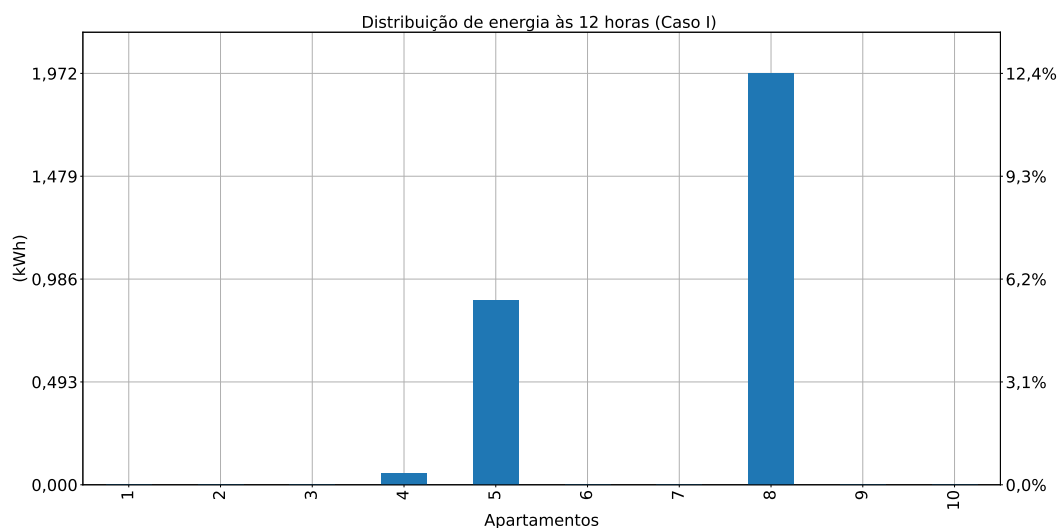


Figura 12 Distribuição às 12h (Caso I)

Na figura 13, às 17h o cenário favorece o apartamento 4. Na contramão disso, os demais não são contemplados ou recebem abaixo de 1,8% que é o caso dos apartamentos 1 e 8. Isso ocorre devido a aleatoriedade adotada.

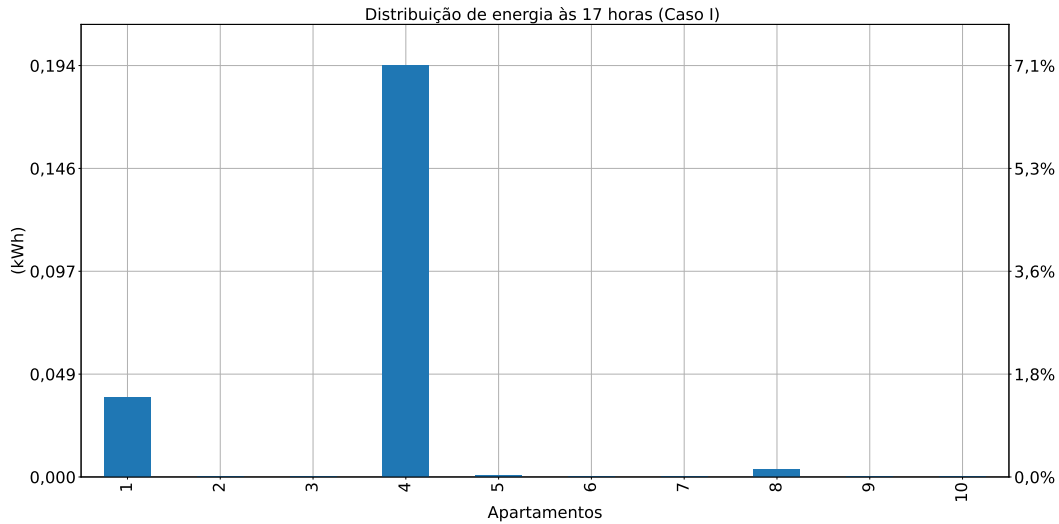


Figura 13 Distribuição às 17h (Caso I)

Na figura 14, a energia excedente é o resultado da diferença entre a distribuição da geração para cada apartamento e o consumo no intervalo de geração (7h da manhã às 17h da tarde). Assim, os apartamentos 5 e 10 possuem os maiores excedentes de 190 kWh/mês e 305 kWh/mês, respectivamente, por outro lado, o apartamento 9 tem menos que 30 kWh/mês, devido á distribuição eventual, sem critério de consumo.

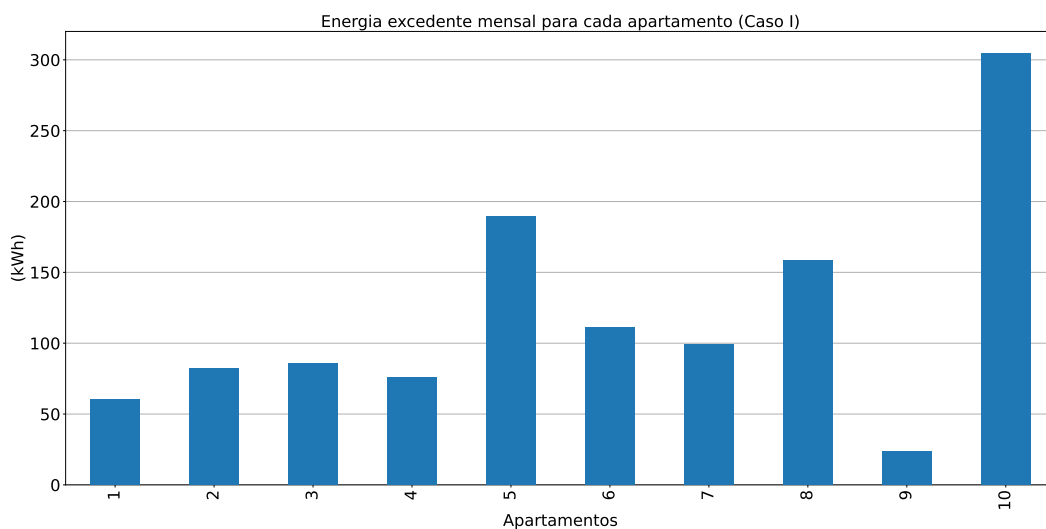


Figura 14 Energia excedente (Caso I)

4.3.2 Caso II - Distribuição com o modelo de partilha

Na figura 15, o resultado da aplicação do modelo de partilha mostra que a distribuição da geração está entre 4,9 % a 14%, devido à contribuição marginal de cada membro que impacta diretamente na quantidade de energia distribuída, onde os apartamentos 9, 1 e 4 obtiveram as maiores médias da partilha com 1.150 kWh/mês, 1.100 kWh/mês e 900 kWh/mês, respectivamente, enquanto os apartamentos 3, 5 e 8 receberam as menores com 400 kWh/mês, 450 kWh/mês, 500 kWh/mês, respectivamente.

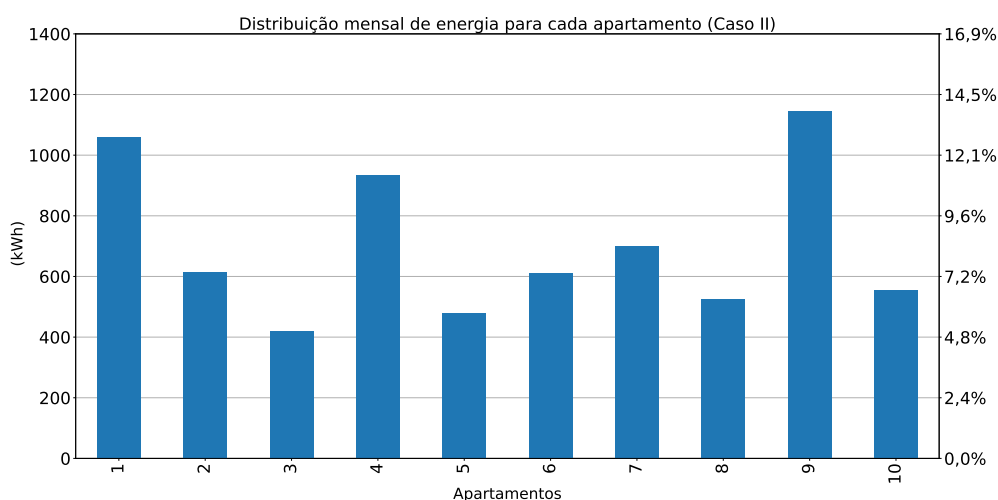


Figura 15 Distribuição média para cada apartamento (Caso II)

Na figura 16, percebe-se ainda que mesmo ocupando o 1º lugar de maior consumo do edifício o apartamento 9 tem picos de distribuição que pode chegar até a 97,4% da geração total de energia. Todavia, o apartamento 3 possui picos que podem chegar até 49,5%. Enquanto os apartamento 8, 6, 4 atingiram até 100% da distribuição. Isso está diretamente proporcional ao consumo de cada apartamento, bem como a contribuição de cada apartamento na comunidade de energia.

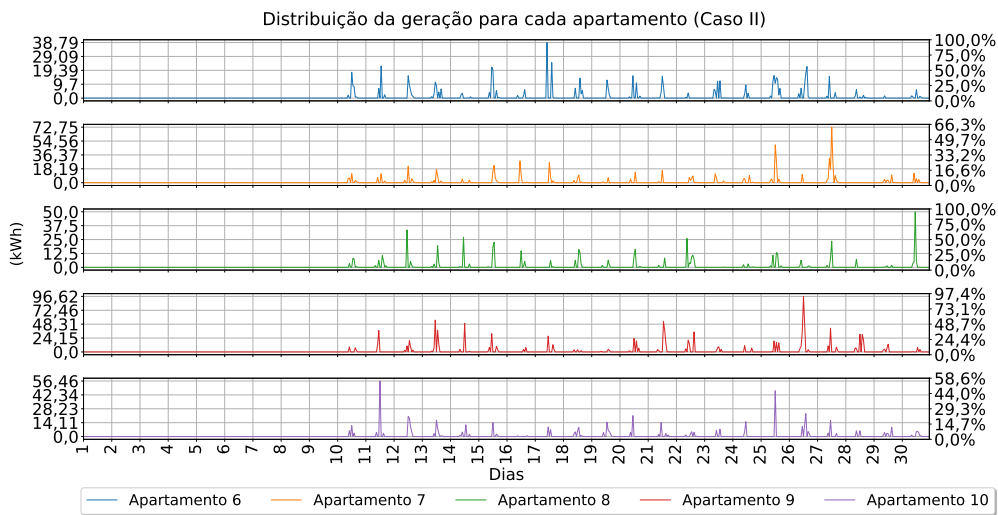
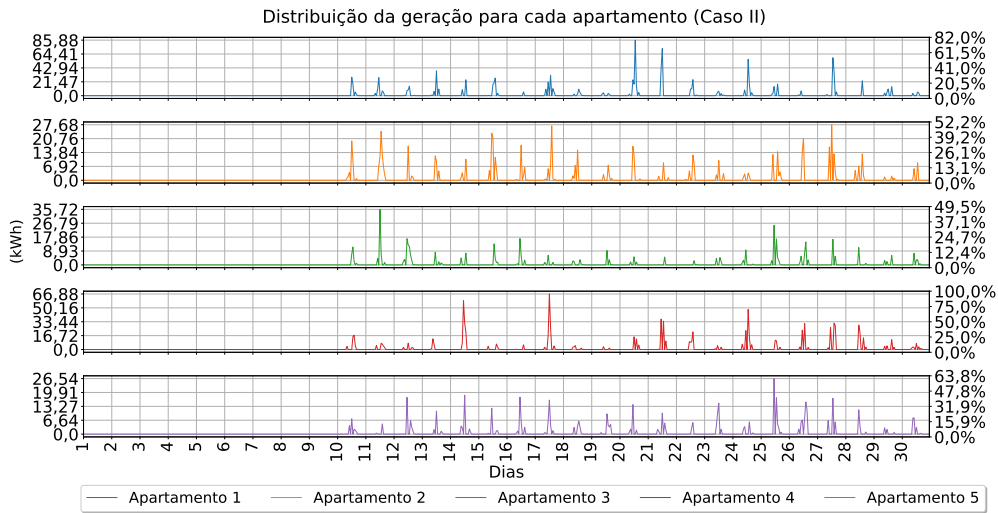


Figura 16 Distribuição diária para cada apartamento (Caso II)

A Figura 17 apresenta a média dos horários em que a distribuição de energia não ocorreu devido às contribuições negativa de cada apartamento, em que os horários de 11h, 15h e 16h a energia não é distribuída numa faixa entre aproximadamente 37% e 62%, isso indica que o consumo da geração disponível está diretamente ligado á participação hora a hora de cada membro.

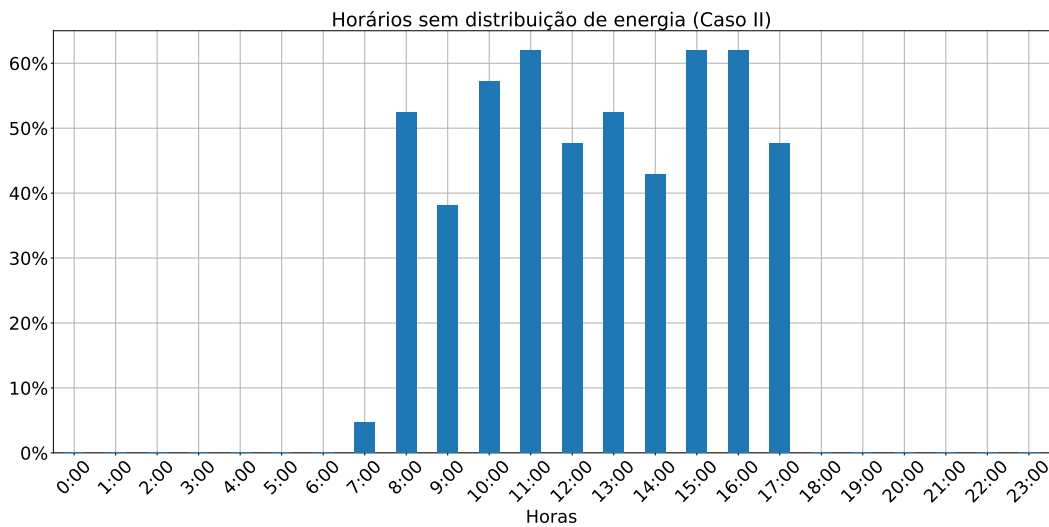


Figura 17 Horários sem distribuição de energia (Caso II)

Na figura 18, temos a visualização dos horários das 9h, 12h e 17h, assim é capaz de perceber que a distribuição de energia está diretamente associada ao valor de *Shapley* e as contribuições positivas, negativas e nulas, onde a magnitude da contribuição positiva reflete na quantidade de energia partilhada.

No horário das 9h, em que a geração solar está iniciando, os apartamentos 1, 8 e 7 possuem as maiores distribuições, pois possuem contribuições positivas, com o valor de *Shapley* acima de 0. Entretanto, os demais apartamentos obtiveram contribuições negativas ou seja não participaram da partilha. Para o horário de 12h, onde há maior irradiação solar, vemos que todos os apartamentos têm contribuições negativas, indicando que o consumo de todos os apartamentos naquela hora foram maiores que a geração, logo, a distribuição não foi realizada.

Já no horário de 17h, em que a geração está finalizando, há uma distribuição para um maior número de apartamento onde os apartamentos 1, 4, 6, 8 e 9 dispõem de contribuições negativas, assim, não participam da partilha, enquanto os demais são contemplados na divisão.

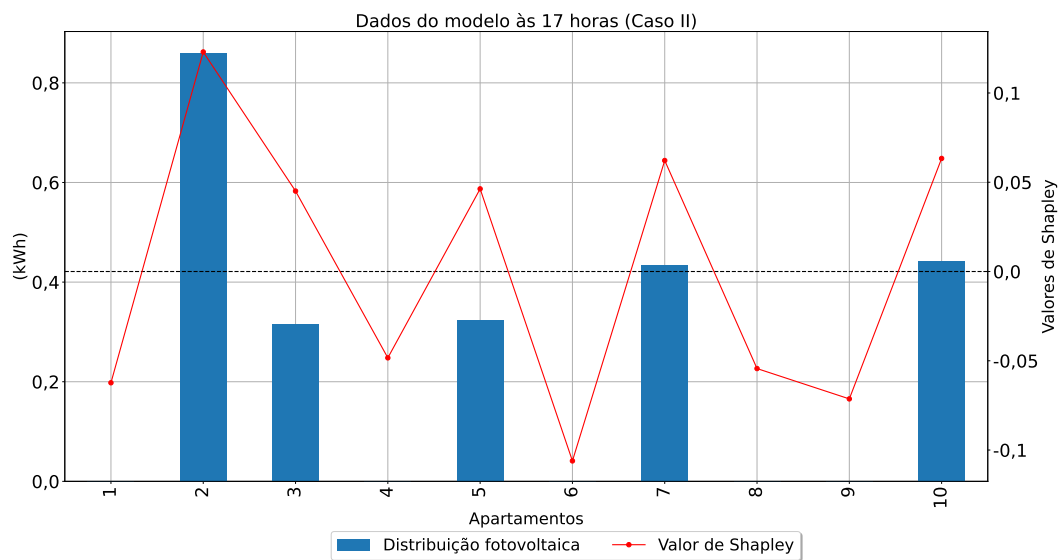
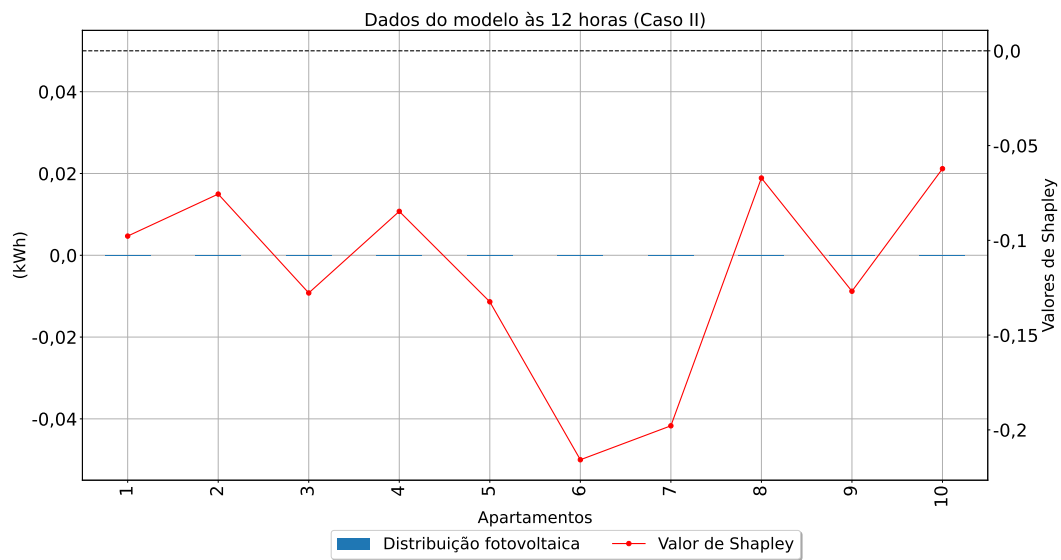
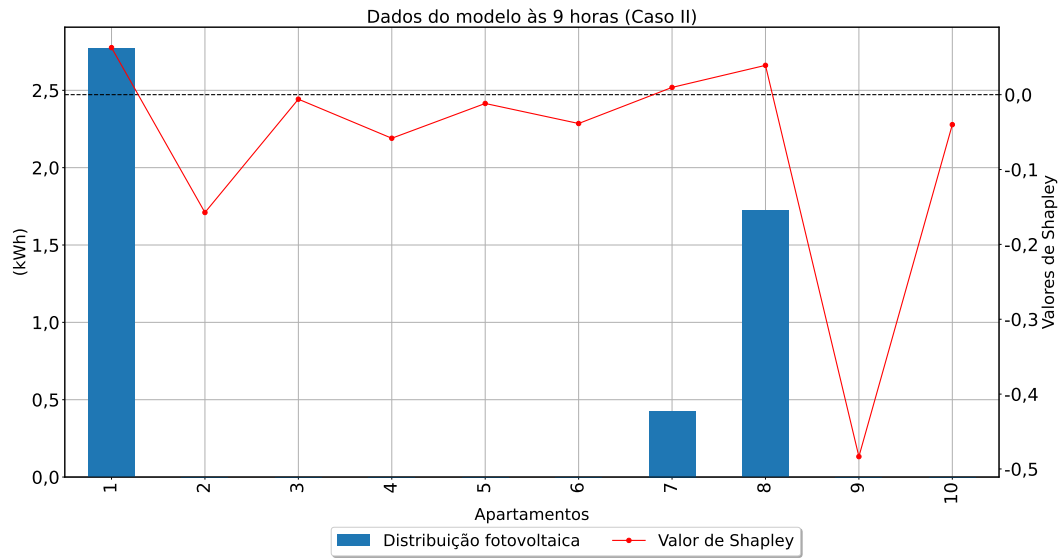


Figura 18 Relação entre distribuição e o valor de *Shapley* para os horários das 9h, 12h e 17h (Caso II)

Na figura 19, temos a análise da média de energia excedente no cenário com aplicação do modelo de partilha de energia, onde os apartamentos 9, 1 e 4 possuem as maiores excedentes entre 640 kWh/mês a 750 kWh/mês e os apartamentos 3, 5 e 10 possuem as menores partilhas excedentes abaixo de 400 kWh/mês. Logo ao comparar a energia excedente com a distribuição e consumo nota-se uma relação direta no qual a energia distribuída não foi totalmente usada durante o horário da geração.

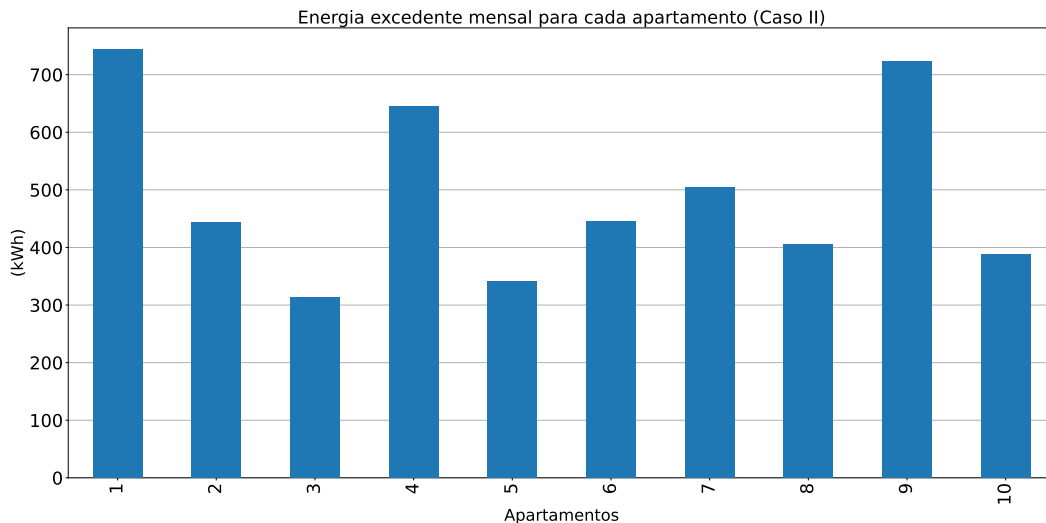


Figura 19 Energia excedente (Caso II)

Na figura 20, temos a média da distribuição do valor de *Shapley* de hora em hora durante um mês, onde é possível concluir que o modelo é aplicado havendo geração de energia, representado pelas contribuições positivas. Ademais os valores negativos e zero representam os momentos em que a energia não foi distribuída, onde a geração inicia-se às 7h da manhã e finaliza às 17h da tarde, pois são os horários em que existe incidência solar significativa para geração, sendo que no horário de 18h às 6h não há geração, portanto também não tem partilha. Vemos também, que as contribuições negativas estão entre 12% e 50% e as positiva entre 10% a 38%.

Com a adoção do modelo de partilha, a redução do custo de energia para cada apartamento é representada na figura 21, na qual, todos os apartamentos alcançaram uma redução de custo maior que 6%, em que o apartamento 2 teve a maior redução com 10,34%.

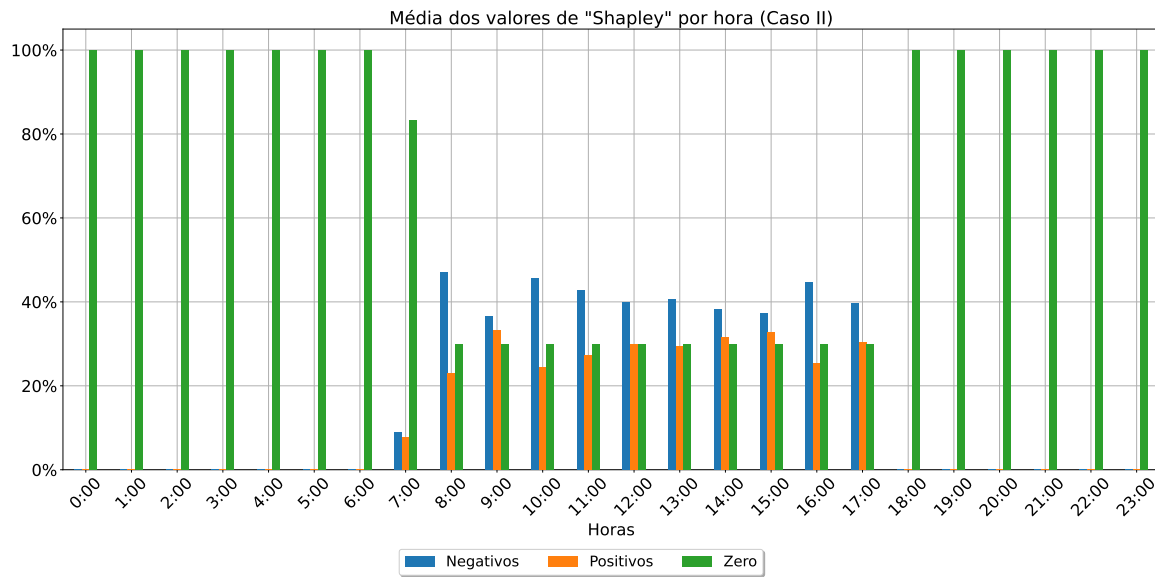


Figura 20 Média das contribuições (Caso II)

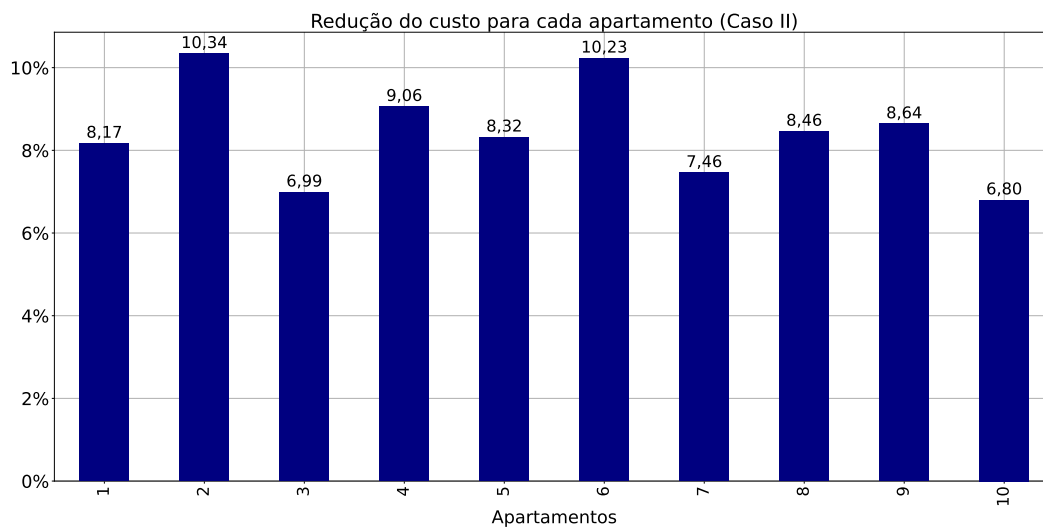


Figura 21 Redução do custo (Caso II)

4.3.3 Caso III - Distribuição com modelo de partilha e DR

O valor de *Shapley* representa a parcela de contribuição positiva que cada apartamento teve, conseqüentemente indica a quantidade de distribuição que deve ser realizada para aquele instante. Ainda atuando em conjunto com o programa DR, apontando quanto consumo deve ser diminuído até o próximo instante de tempo, para que o apartamento mantenha uma contribuição positiva e receba uma distribuição de energia significativa. Entretanto, os sinais de redução são mostrados com a condição que haja geração de energia na próxima hora e que a quantidade de geração prevista seja menor que os valores de consumo previstos.

Com objetivo de alcançar o valor de *Shapley* em zero, que indica o equilíbrio entre geração e consumo. Na figura 22, no horário das 9h, o apartamento 9 e 2 receberam sinais para reduzir, pois possuem contribuições negativa, ou seja, o consumo excede a geração naquela hora. Já os apartamentos que possuem distribuição fotovoltaica, ou seja, contribuições positivas receberam uma parcela de distribuição de energia proporcional a sua participação. Outra situação são os apartamentos 3, 7 e 8 que não recebem distribuição e nem sinal para reduzir devido à geração e consumo estarem em equilíbrio na próxima hora.

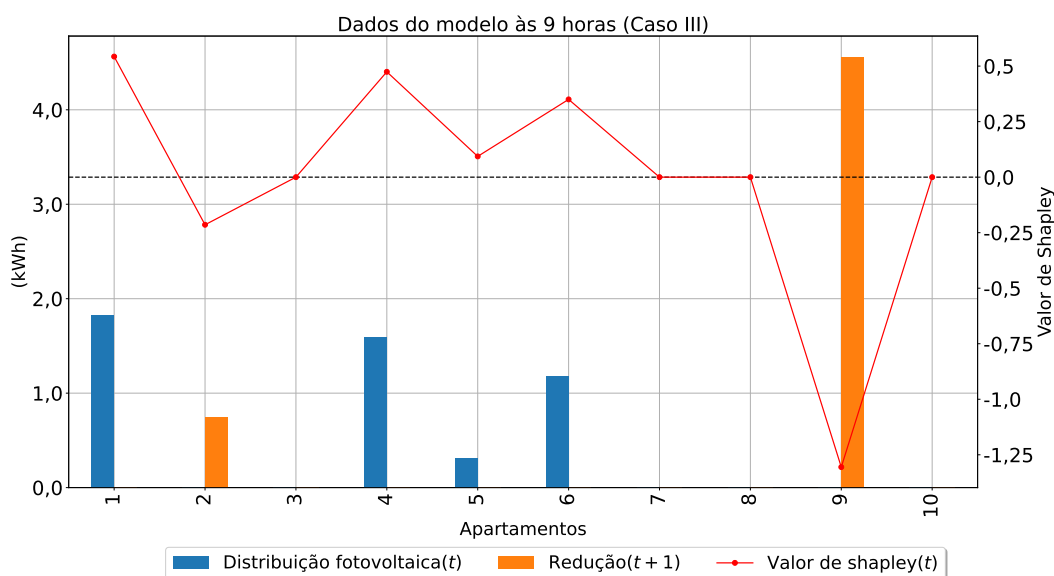


Figura 22 Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 9h (Caso III)

Na figura 23, no horário das 12h todos os apartamentos possuem um valor de *Shapley* abaixo da linha de equilíbrio ou seja, abaixo de 0, porém não há ordem para diminuição de consumo, o que significa que, na próxima hora, a previsão é que o consumo esteja em equilíbrio com a geração.

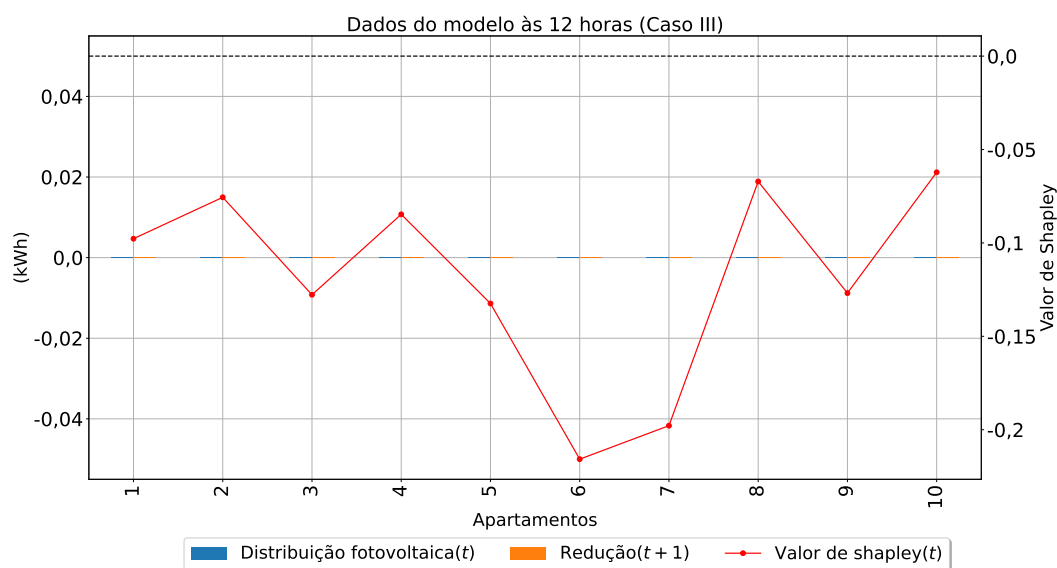


Figura 23 Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 12h (Caso III)

Na figura 24, no horário das 17h os apartamentos 2, 5, e 7 receberam as distribuições conforme a participação positiva. Por outro lado, o consumo dos apartamentos 1, 3, 4 e 8 estão em equilíbrio com a geração. Todavia, os apartamentos 6 e 9 têm uma contribuição negativa, porém como às 18h não há geração, o modelo não emitiu comandos para a redução.

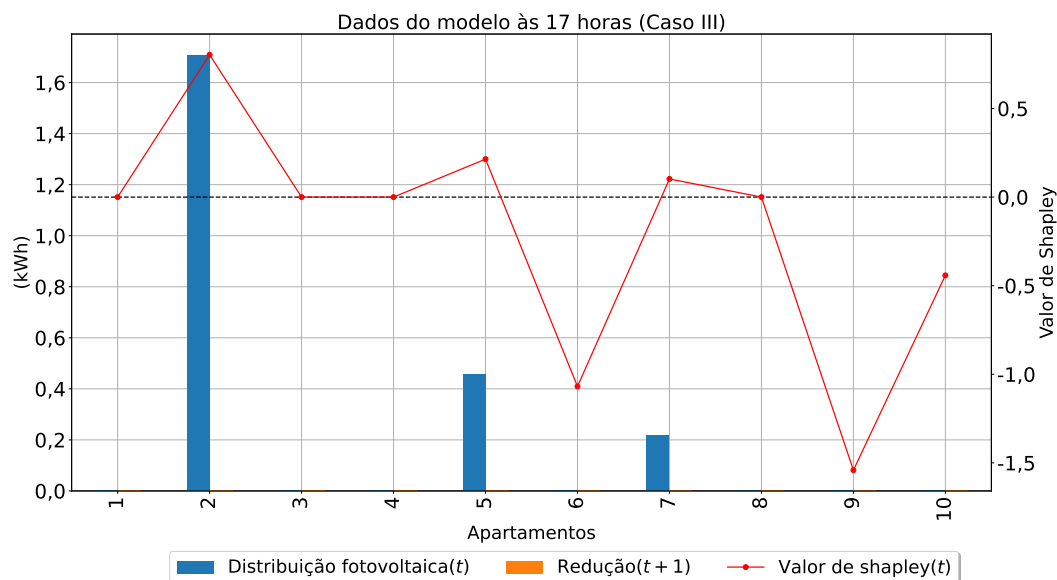


Figura 24 Relação entre energia distribuída, redução de consumo e valor de Shapley às 17h (Caso III)

Na figura 25, observa se que as contribuições negativas estão entre 10% e 45% e as positivas entre 8% a 40% e as zeros entre 30% a 100%. Por fim, na figura 26 temos a redução do custo da energia para cada apartamento no caso III, onde todos os apartamentos alcançaram uma redução do custo maior que 49% com uma redução extremamente considerável.

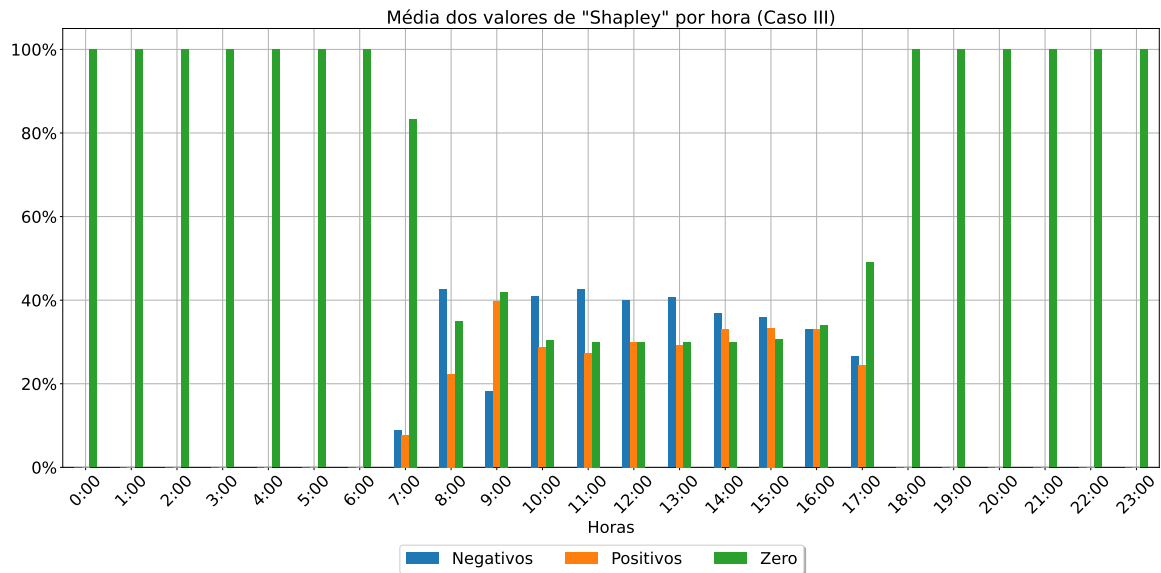


Figura 25 Média das contribuições (Caso III)

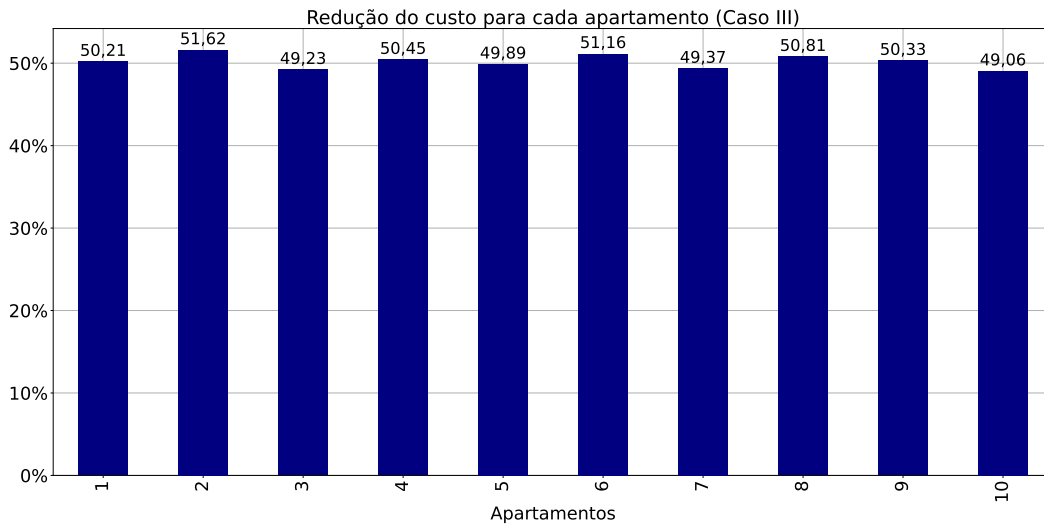


Figura 26 Redução do custo (Caso III)

A seguir, foi apresentado o consumo médio, a sugestão de redução do consumo dada pelo programa DR e a geração solar fotovoltaica distribuída de hora em hora a cada apartamento, na sequência avaliamos também a relação dos equipamentos que consomem mais energia por hora. É importante salientar que a geração inicia às 7h da manhã e finaliza às 17h da tarde,

pois a geração é proporcional a irradiação solar, na ausência da mesma o sistema não gera energia. Assim no apartamento 1, nota-se que os horários que o DR sugere que as maiores reduções ocorram às 9h manhã e às 17h da tarde (Figura 27).

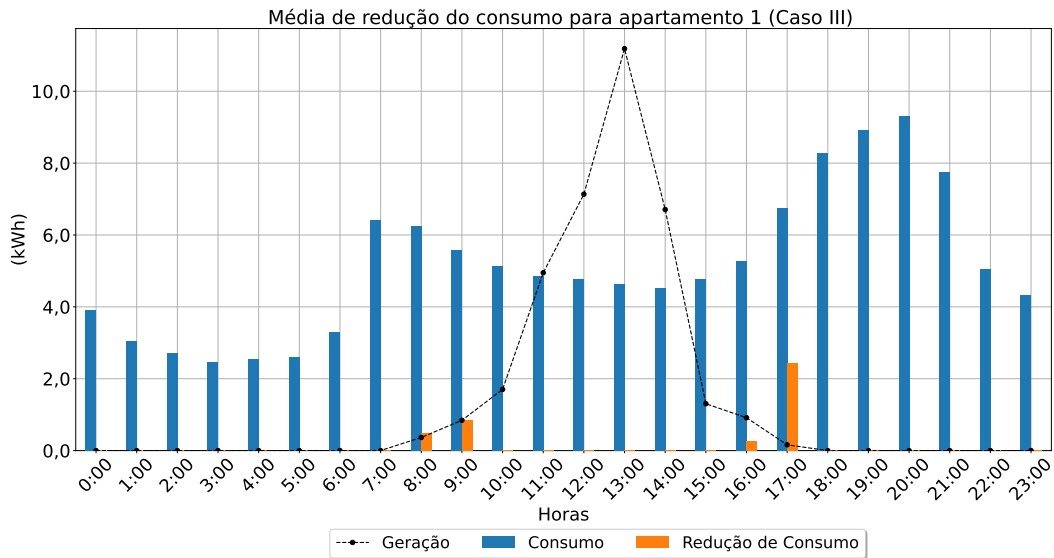


Figura 27 Distribuição e redução por hora - Apartamento 1 (Caso III)

No horário das 9h a lava louça apresenta um consumo médio acima de 0,9 kWh, e às 17h o aquecedor de água apresenta um consumo médio acima de 0,6 kWh (Figura 28). Com isso, o apartamento 1 pode adotar algumas medidas para reduzir o consumo como por exemplo: diminuir as horas de uso dos equipamentos nesse horário ou utilizá-los em horários de maior distribuição no horário de 12h às 14h.

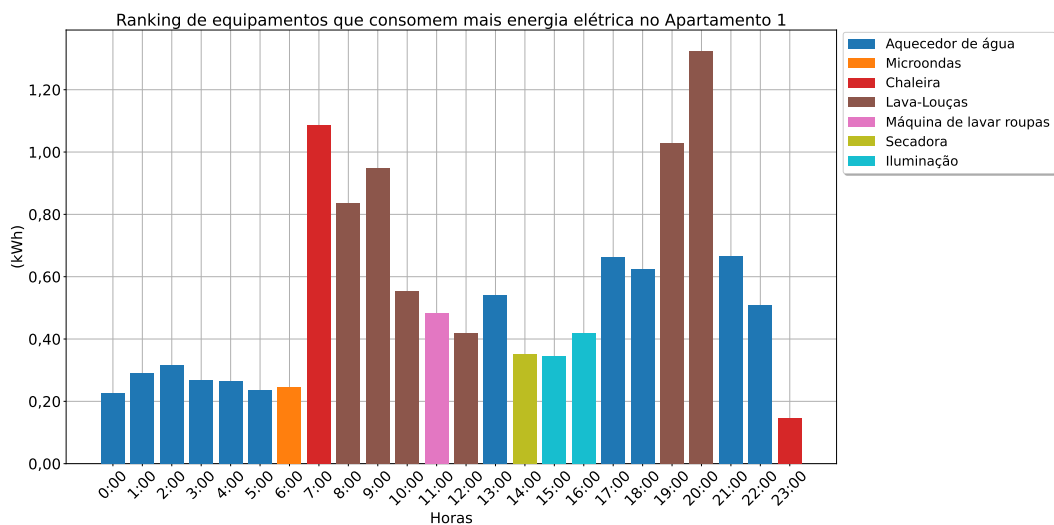


Figura 28 Consumo - Apartamento 1

Para o apartamento 2, percebe-se que os horários que o DR sugere, a redução são às 9h manhã e às 16h da tarde (Figura 29). No horário das 9h o aquecedor de água apresenta um consumo médio acima de 0,3 kWh, e às 16h a iluminação apresenta consumo de 0,18 kWh (Figura 30). Assim, o apartamento 2 pode realizar algumas ações para reduzir o consumo, como por exemplo: diminuir as horas de uso do aquecedor de água nesse horário ou utilizá-lo em horários de maior distribuição de energia, no horário das 12h e 14h. Ademais, a adoção de sensores de presença para as luminárias, seria eficiente na economia de energia.

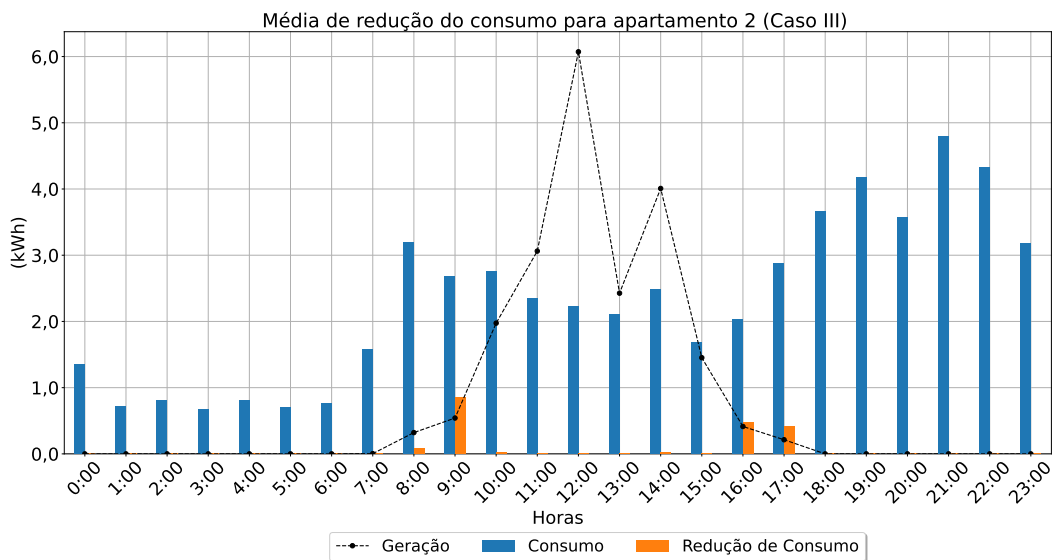


Figura 29 Distribuição e redução por hora - Apartamento 2 (Caso III)

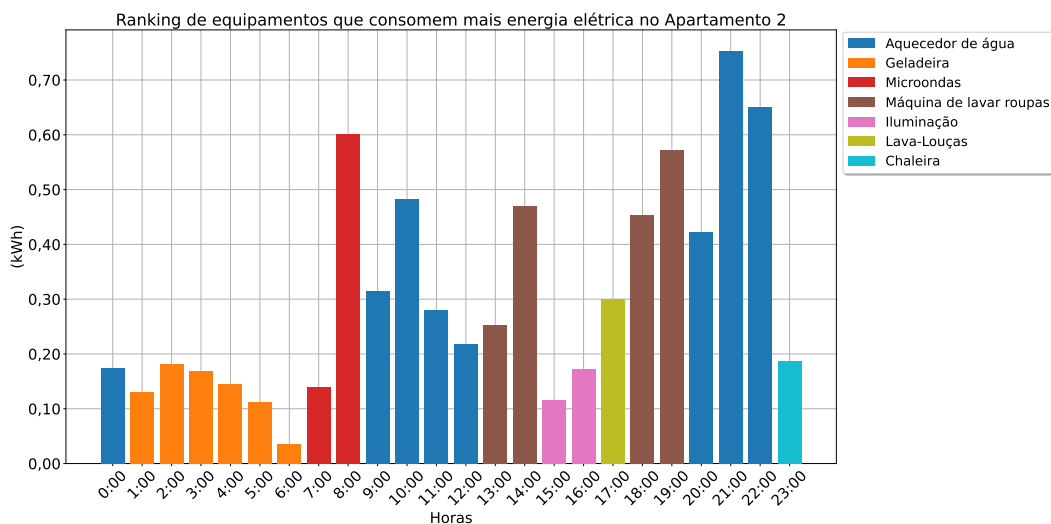


Figura 30 Consumo - Apartamento 2

No apartamento 3, o DR recomenda que exista uma maior redução às 9h manhã e às 17h da tarde (Figura 31). No horário das 9h, a máquina de lavar roupa apresenta um consumo médio de aproximadamente 0,7 kWh, e às 17h a geladeira apresenta um consumo médio acima de 0,1 kWh (Figura 32). Assim, o apartamento 3 pode realizar algumas ações para reduzir o consumo, como por exemplo: diminuir as horas de uso da máquina de lavar roupa nesse horário ou utilizá-lo em horários de maior distribuição de energia, no horário das 11h ou 13h. Além disso, evitar abrir e fechar a geladeira constantemente gera uma economia significativa.

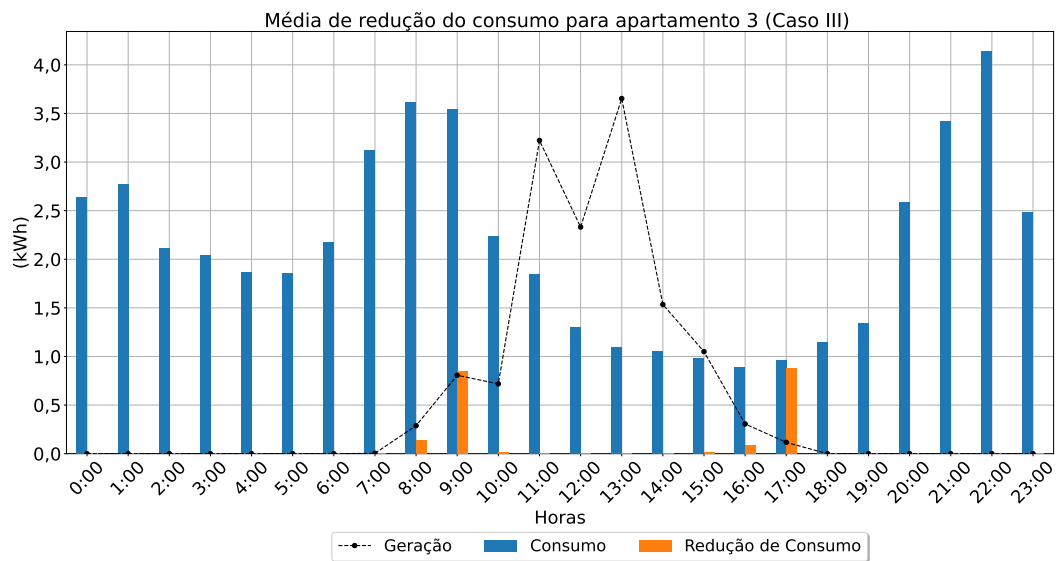
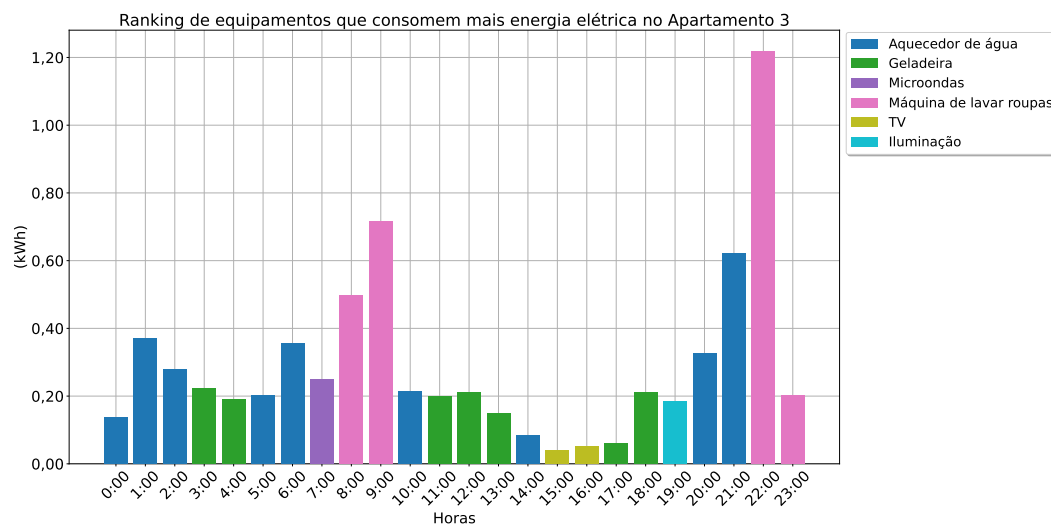


Figura 31 Distribuição e redução por hora - Apartamento 3 (Caso III)

Figura 32 Consumo - Apartamento 3



Para o apartamento 4, temos a aplicação do DR com a proposta de redução para os horários de 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 33), pois no horário das 9h o uso da máquina de lavar roupas apresenta um consumo médio acima de 0,7 kWh, e às 17h a iluminação apresenta um consumo médio de 0,6 kWh (Figura 34). Logo, o apartamento 4 poderá otimizar o consumo e reduzir energia por meio da diminuição das horas de uso da máquina de lavar roupas ou utilizá-la em horários que a distribuição de energia está em alta, no horário de 11h às 14h manhã.

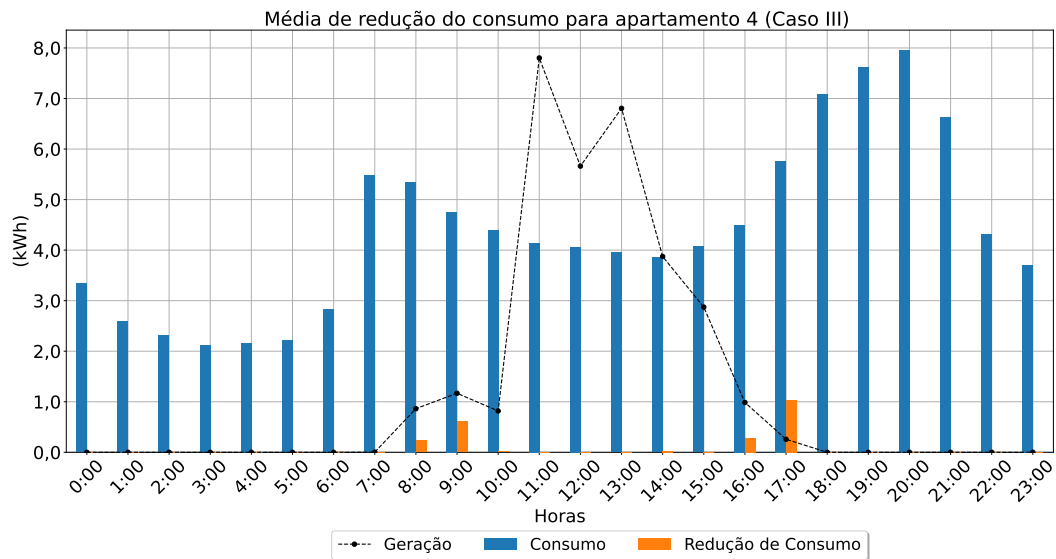


Figura 33 Distribuição e redução por hora - Apartamento 4 (Caso III)

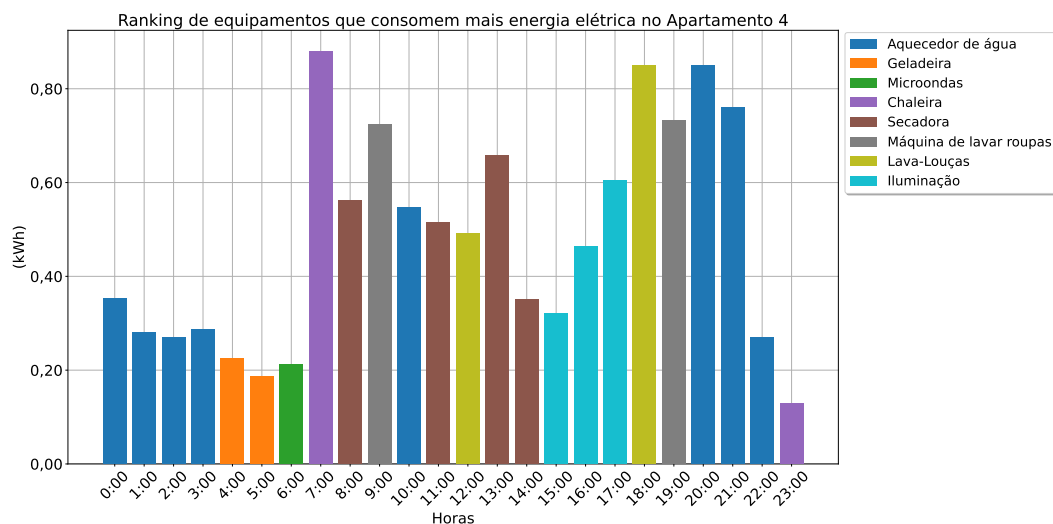


Figura 34 Consumo - Apartamento 4

No apartamento 5, o DR recomenda-se uma maior redução às 9h manhã e às 17h da tarde (Figura 35). No horário das 9h a máquina de lavar roupas apresenta um consumo médio de aproximadamente 0,7 kWh, e às 17h a TV apresenta um consumo médio acima de 0,1 kWh (Figura 36). Assim, o apartamento 5 pode optar pelo uso da máquina de lavar no horário que a distribuição de energia é maior, no horário de 11h da manhã. Para 17h economizar energia com a televisão, logo, a recomendação é evitar deixar ligada em horários desnecessários, e caso seja necessário a troca do aparelho optar por equipamentos classe A.

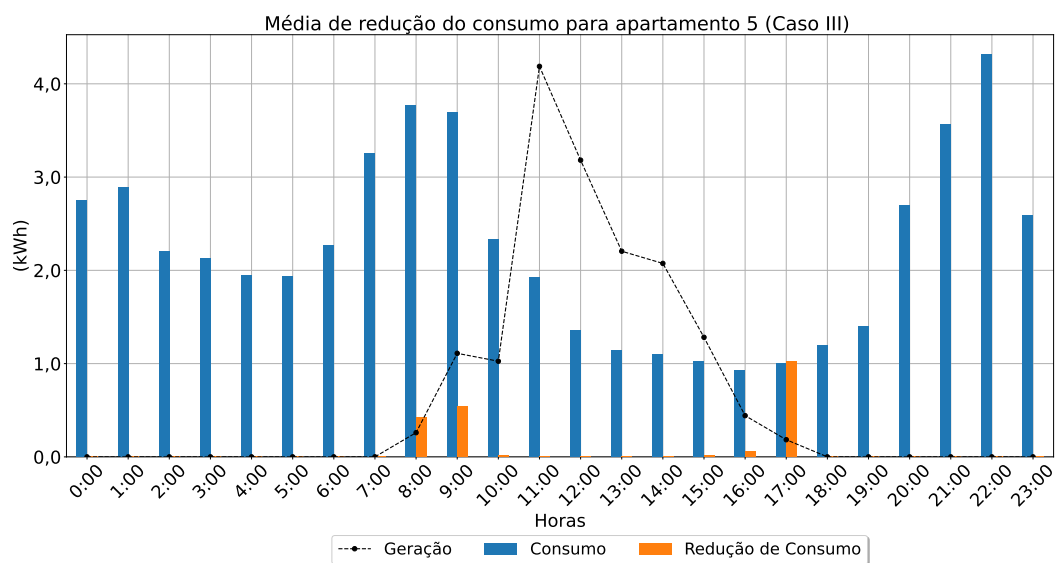


Figura 35 Distribuição e redução por hora - Apartamento 5 (Caso III)

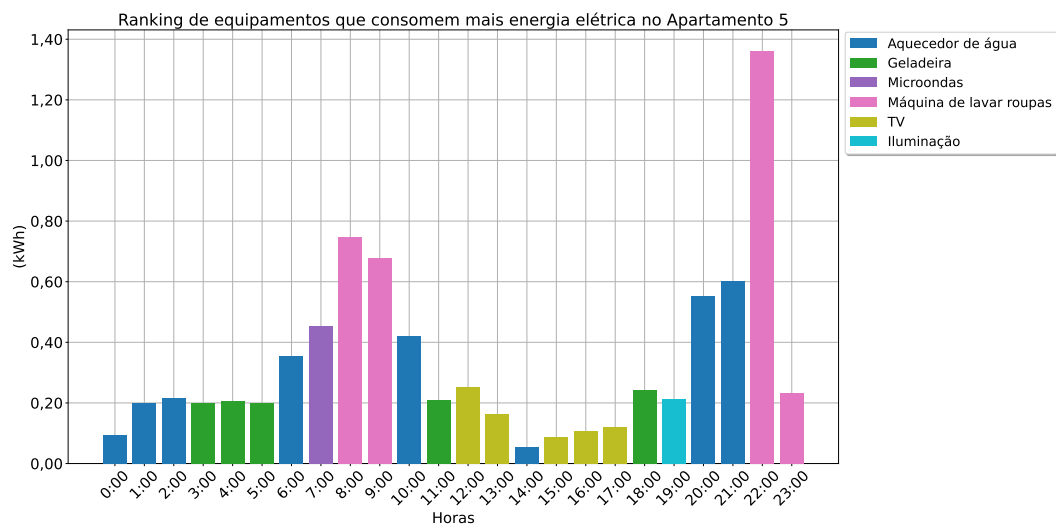


Figura 36 Consumo - Apartamento 5

Para o apartamento 6, a aplicação do DR propõe uma redução de consumo às 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 37). Assim, às 9h o uso do aquecedor de água apresenta um consumo médio acima de 0,3 kWh, e às 17h a lava louças exibe um consumo médio de aproximadamente 0,3 kWh (Figura 38). Logo, o apartamento 6 poderá otimizar o consumo e reduzir energia por meio da redução das horas de uso desses equipamentos ou optar por usá-los em horários que a distribuição de energia está maior, no horário de 10h às 14h.

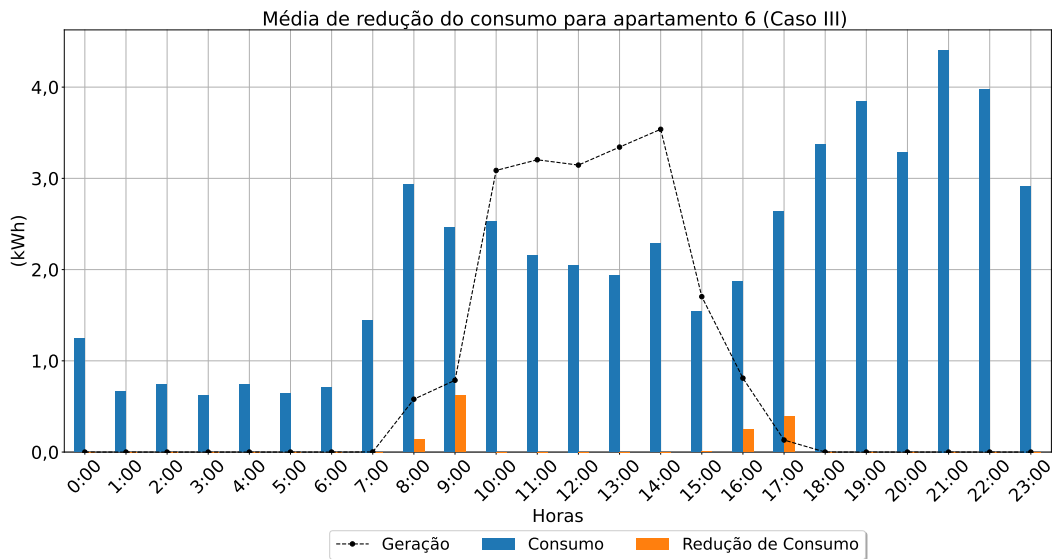


Figura 37 Distribuição e redução por hora - Apartamento 6 (Caso III)

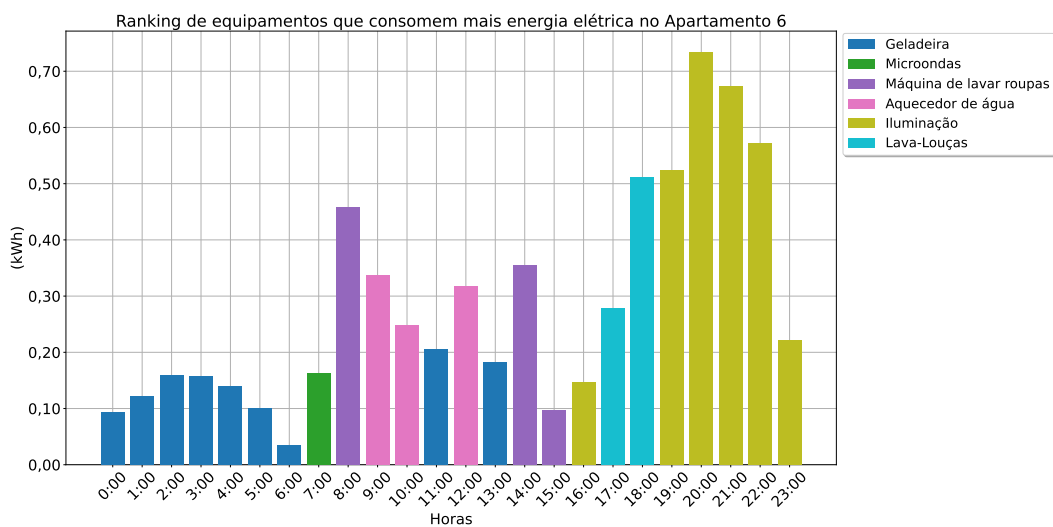


Figura 38 Consumo - Apartamento 6

No apartamento 7, o DR aconselha que exista uma maior redução às 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 39). No horário das 9h, a máquina de lavar roupas apresenta um consumo médio de aproximadamente 1,20 kWh, e às 17h a geladeira apresenta um consumo médio de abaixo de 0,25 kWh (Figura 40). Assim, o apartamento 7 pode reduzir o consumo por meio da diminuição das horas de uso da máquina de lavar roupas nesse horário ou utilizá-la em horários de maior distribuição de energia, no horário de 12h às 13h.

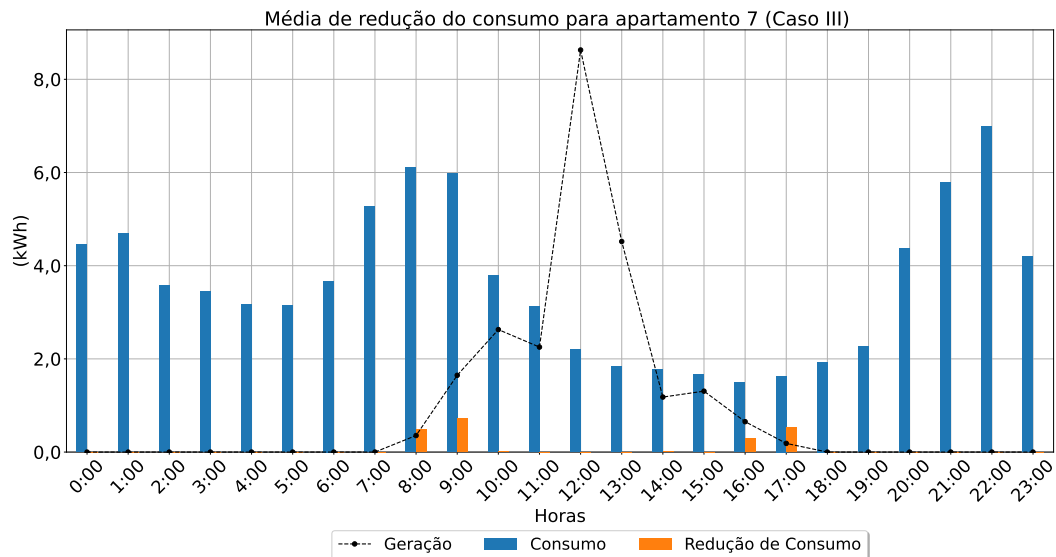


Figura 39 Distribuição e redução por hora - Apartamento 7 (Caso III)

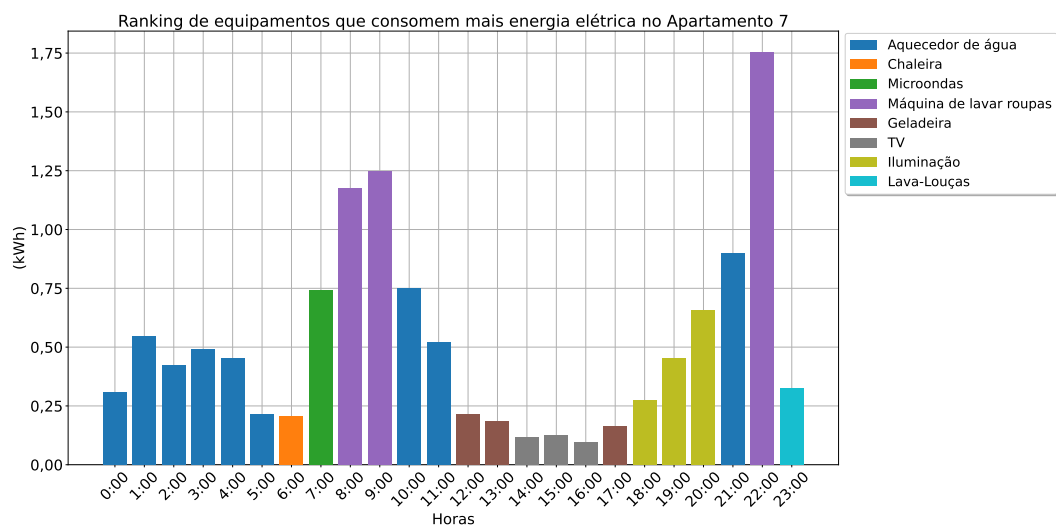


Figura 40 Consumo - Apartamento 7

Para o apartamento 8, o DR com a orientação de redução para os horários de 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 41). Pois, no horário das 9h o uso da máquina de lavar roupas demonstra um consumo médio acima de 0,4 kWh, e às 17h, a TV apresenta um consumo médio de aproximadamente 0,2 kWh (Figura 42). Assim, o apartamento 8 poderá economizar com a redução de energia por meio da diminuição das horas de uso da máquina de lavar roupas ou utilizá-la em horários que a distribuição de energia está em alta, no horário de 11h e 13h.

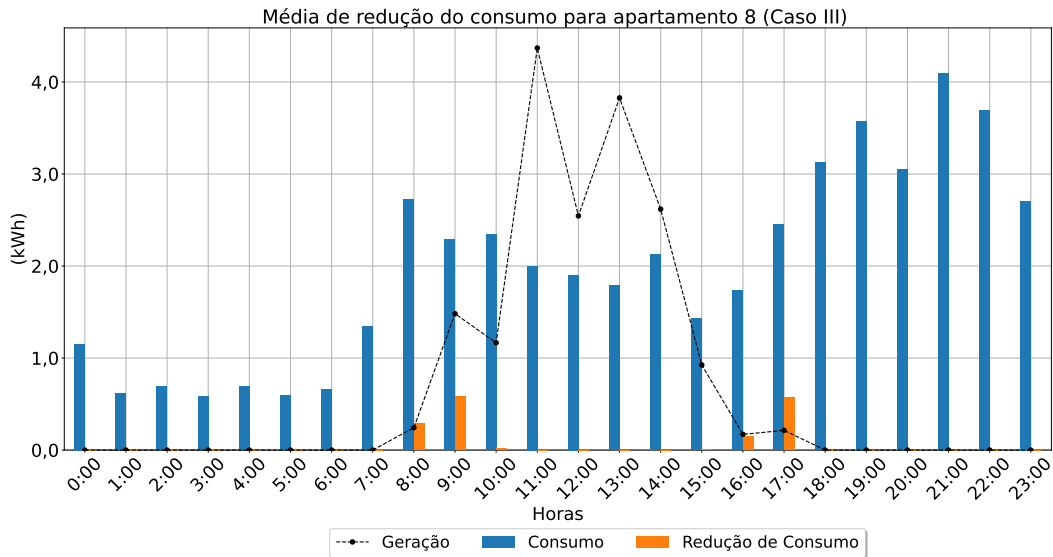


Figura 41 Distribuição e redução por hora - Apartamento 8 (Caso III)

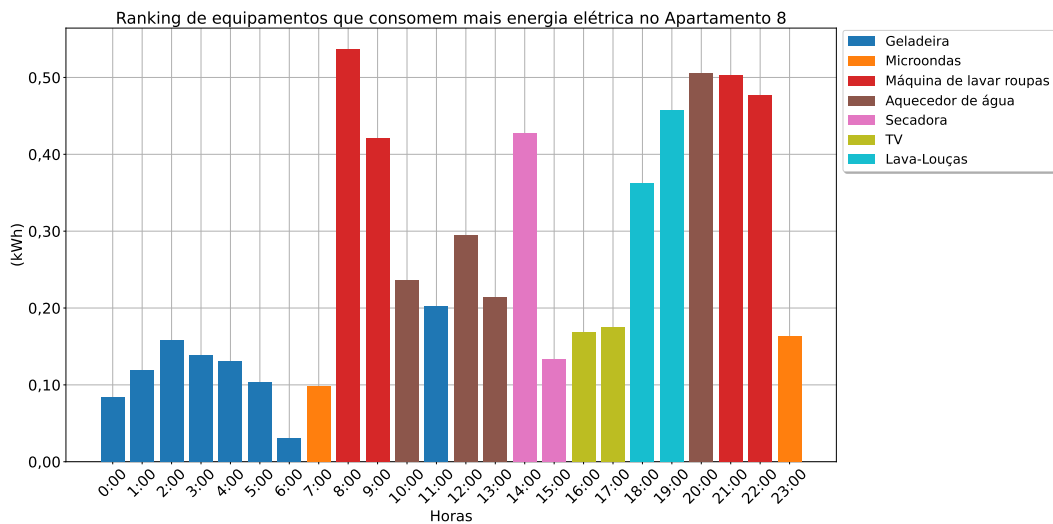


Figura 42 Consumo - Apartamento 8

No apartamento 9, o DR indica que exista uma maior redução às 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 43). No horário das 9h, a lavar-louças apresenta um consumo médio de acima de 0,8 kWh, e às 17h, a iluminação apresenta um consumo médio de 0,6 kWh (Figura 44). Assim, o apartamento 9 pode reduzir o consumo por meio da diminuição das horas de uso da lavar-louças nesse horário ou utilizá-la em horários de maior distribuição de energia, no horário de 11h às 13h.

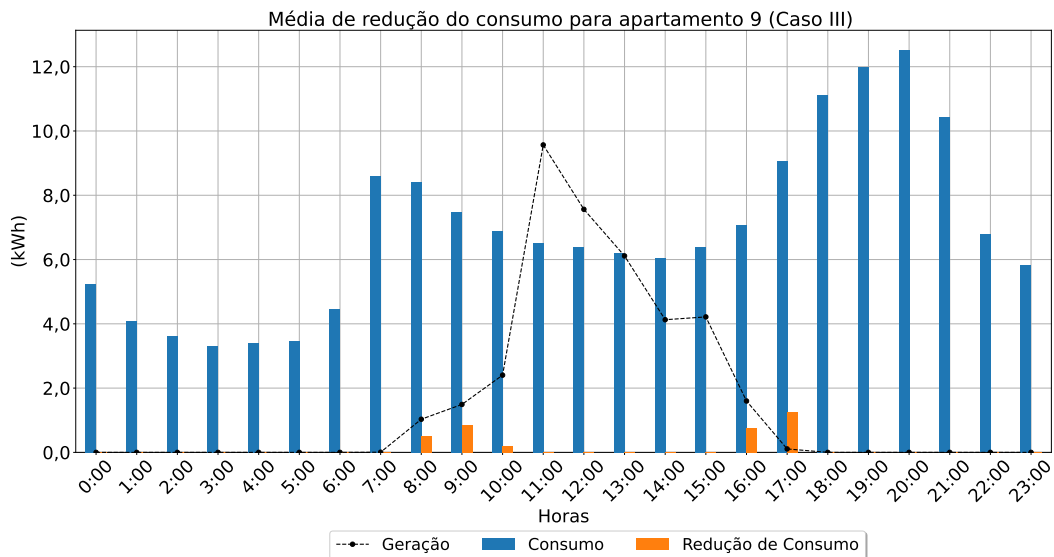


Figura 43 Distribuição e redução por hora - Apartamento 9 (Caso III)

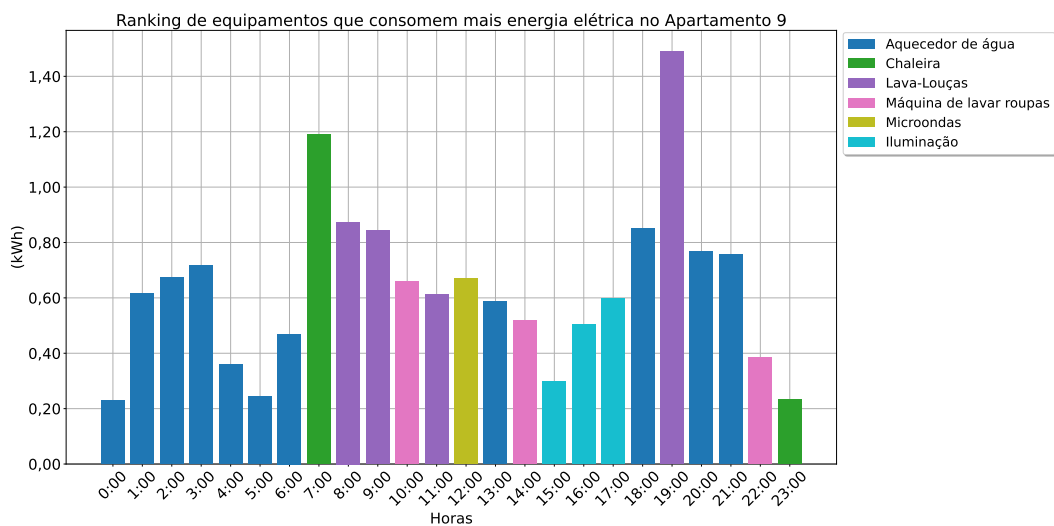


Figura 44 Consumo - Apartamento 9

Para o apartamento 10, o DR vem com um sinal de redução para os horários de 9h da manhã e às 17h da tarde (Figura 45), pois no horário das 9h, o uso do aquecedor de água demonstra um consumo médio acima de 1,0 kWh, e às 17h a geladeira apresenta um consumo médio de aproximadamente 0,2 kWh (Figura 46). Assim, o apartamento 10 poderá economizar com a redução de energia por meio da diminuição das horas de uso da aquecedor de água ou utilizá-lo em horários que a distribuição de energia está em alta, no horário das 11h às 13h.

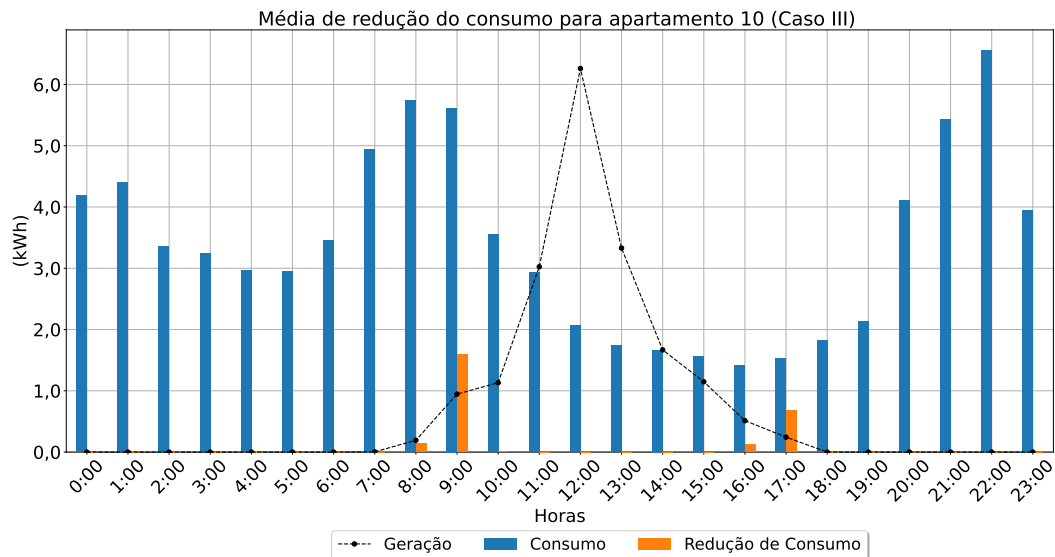


Figura 45 Distribuição e redução por hora - Apartamento 10 (Caso III)

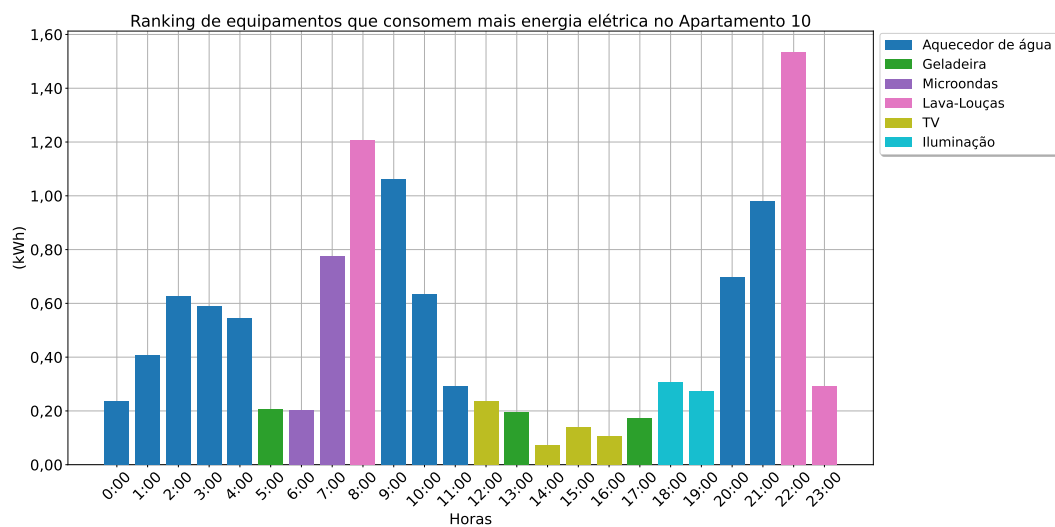


Figura 46 Consumo - Apartamento 10

4.4 ANÁLISE DOS CASOS

Para uma análise ampla e comparativa entre as distribuições de energia para o caso I, II e III, analisando-se em horários específicos, às 9h, 12h e 17h, onde ocorre o início, pico e fim do horário de geração, percebe-se que no horário das 9h os casos II e III apresentam os melhores resultados na distribuição para o apartamento 1, onde se nota uma maior distribuição no caso II, que envolve a aplicação do modelo de partilha com base em critérios de contribuição na comunidade de energia (Figura 47).

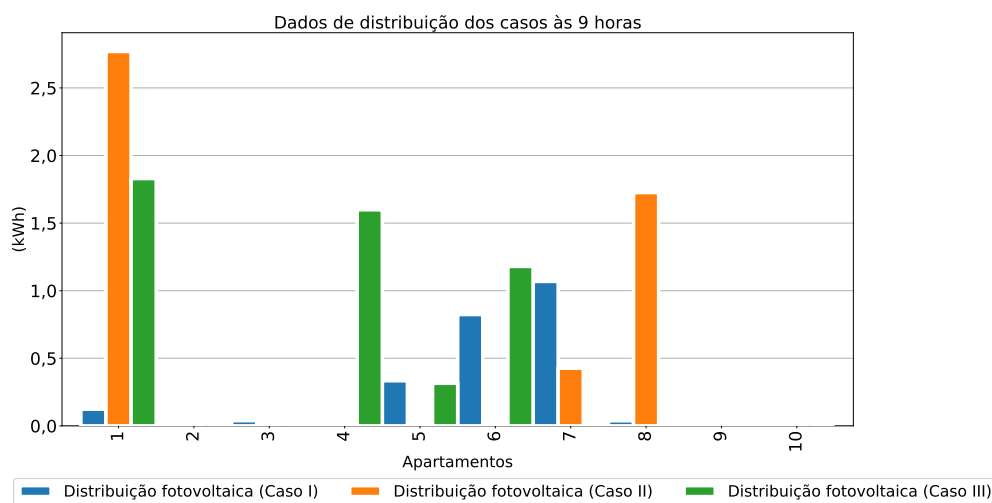


Figura 47 Distribuições às 9h horas para os casos I, II, III

Para o horário das 12h, onde todos os apartamentos possuem participação negativa, ou seja, o consumo excede a geração, o caso I é o único que demonstra picos nos apartamentos 4, 5 e 8 devido à aleatoriedade do método (Figura 48).

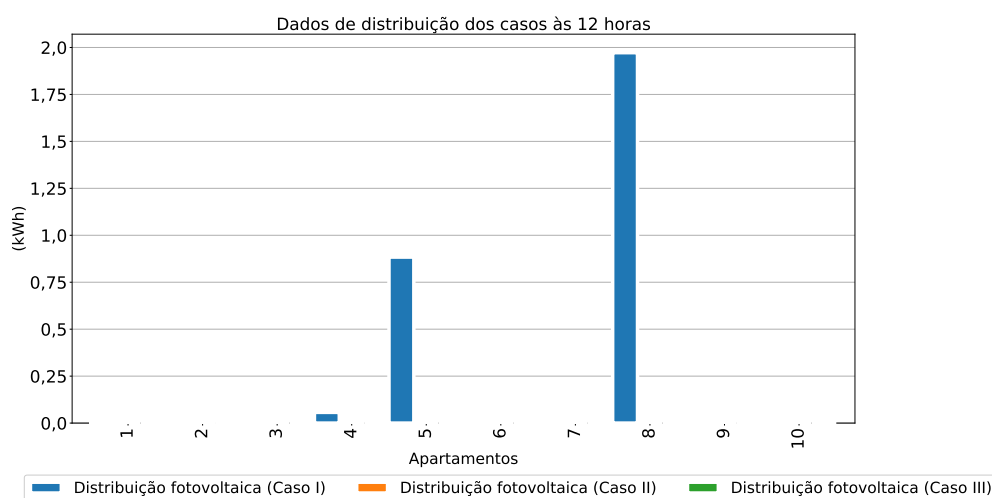


Figura 48 Distribuições às 12h horas para os casos I, II, III

Para o horário das 17h, os casos II e III exibem os resultados mais favoráveis na distribuição para o apartamento 2, sendo que o caso III tem um destaque significativo devido à aplicação do modelo de partilha associado ao DR, onde os sinais de redução devem ser obedecidos para minimizar ainda mais os custos (Figura 49).

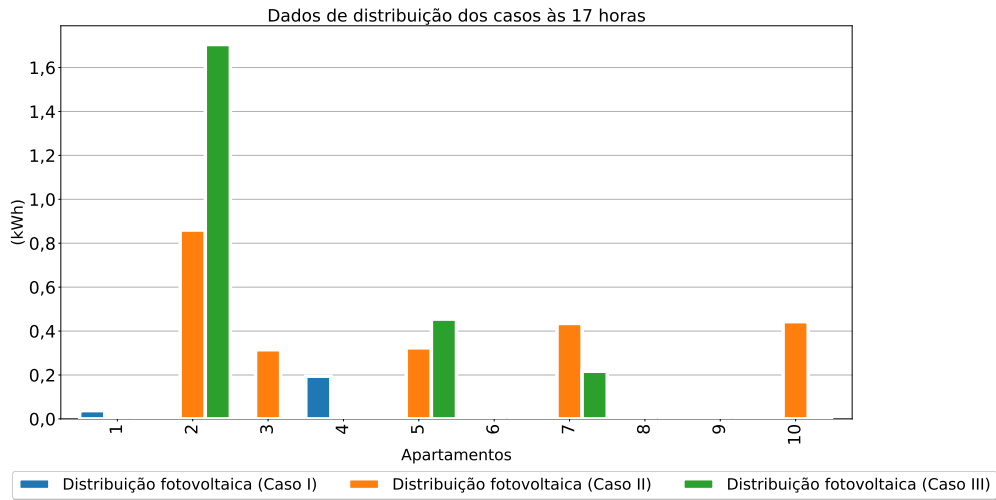


Figura 49 Distribuições às 17h horas para os casos I, II, III

A figura 50, mostra as distribuições durante todo o período de tempo, assim, percebe-se que o caso III tem total dependência do caso II, pois são extremamente semelhantes. Assim, nos casos II e III, todos os apartamentos demonstram uma divisão justa de parcelas, de acordo com a participação de cada apartamento na partilha. Entretanto, o caso I apresenta resultados bastante inferiores em relação aos demais casos para todos os apartamentos.

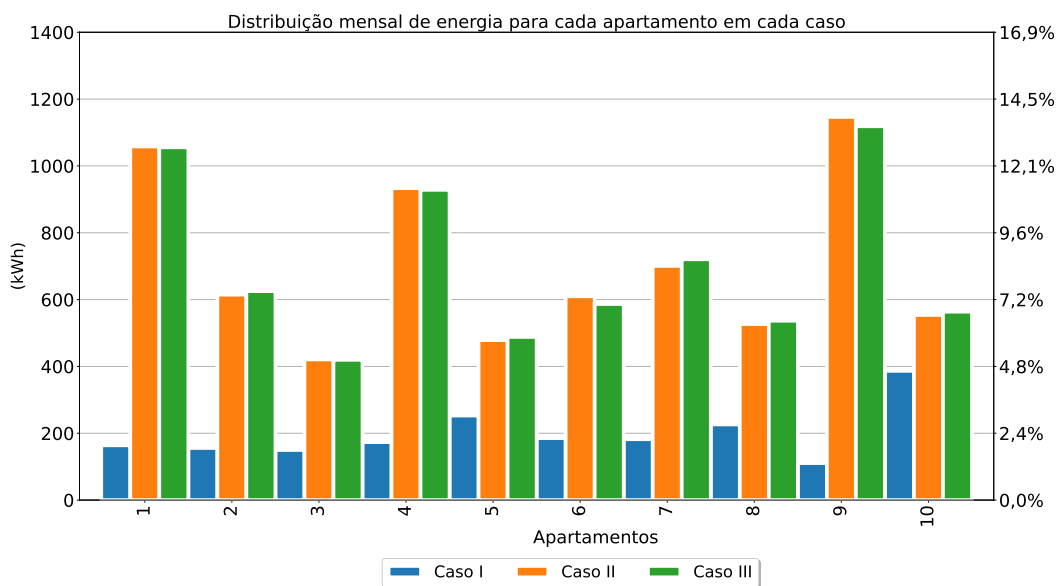


Figura 50 Distribuições para os casos I, II, III

Na Tabela 5, temos o comparação dos custos em euro para cada caso estudado, bem como, a redução de custo de energia gerado com a aplicação dos mesmos, com destaque para o caso III com redução de custo de 50,17% para a comunidade do edifício, equivalente a um custo de 1.243,60€.

Tabela 5 Relações de custos e redução para a comunidade do edifício

Casos	Custos (€)	Redução (%)
Padrão	2.495,45	—
Caso I	2.416,26	3,17
Caso II	2.286,09	8,39
Caso III	1.243,60	50,17

Assim, na figura 51, observa-se a redução de custo de energia para cada caso, em que o caso I não chega a 10%, enquanto o caso II atinge 10% em alguns apartamentos e o caso III tem uma notória redução acima de 50% para todos os apartamentos, considerando que todos os apartamentos obedeçam estritamente as sugestões de redução de consumo.

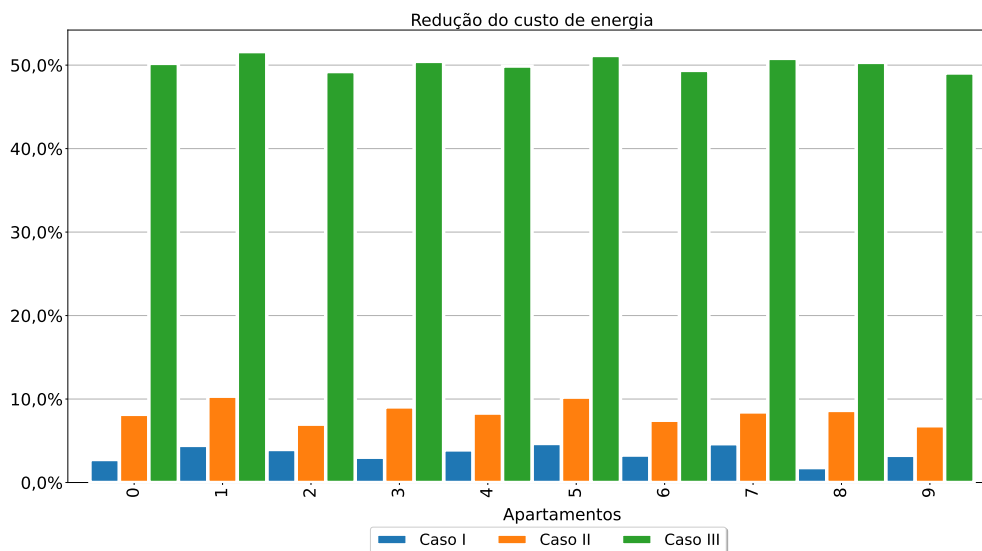


Figura 51 Redução de custos para os casos I, II, III

Na figura 52, temos o custo da energia para cada apartamento, onde nota-se uma ênfase para o caso III, que utiliza a partilha igualitária em conjunto com o programa de DR, que é

um fator que possui um impacto significativamente maior em relação ao caso II e I. Nesse cenário, todos os casos possuem um custo abaixo da linha vermelha, que representa o custo padrão, ou seja, o custo sem a aplicação de nenhum modelo.

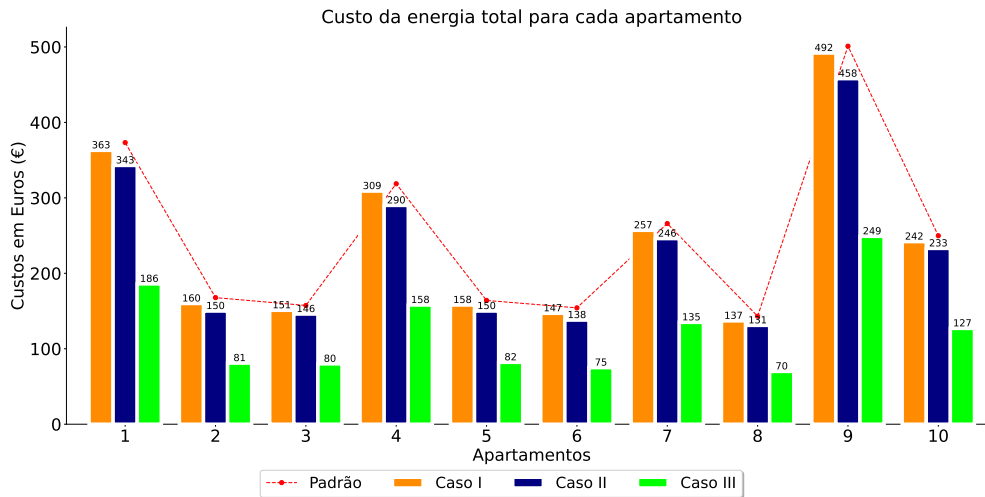


Figura 52 Custo final para os casos I, II, III

Para encontrar uma limitação para o modelo de partilha, considerou-se 15 apartamentos no modelo de partilha baseado no valor de *Shapley*, onde se constatou que conforme o número de integrantes na coalizão aumenta, o tempo de execução também cresce de forma exponencial, conforme ilustrado na figura 53. Torna-se inviável para determinada quantidade de apartamentos, pois como o modelo trabalha em escala de hora a hora, o tempo de execução irá exceder o período de uma hora, prejudicando assim o funcionamento do modelo com essa técnica.

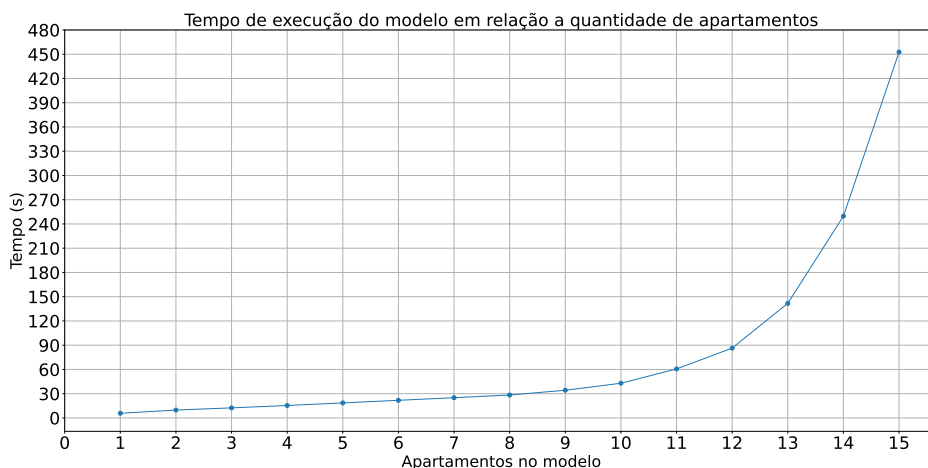


Figura 53 Tempo de execução em relação à quantidade de apartamentos

4.5 RECOMENDAÇÕES

Para implementação de programas de DR em edifícios, algumas medidas podem ser adotadas para maximizar a aplicação do mesmo, tais como:

- A implantação de controladores de otimização inteligentes, que podem levar a uma utilização mais racional da energia, permitindo ao mesmo tempo a exploração da flexibilidade do utilizador numa perspectiva de rede para melhorar a fiabilidade e a eficiência da energia no edifício [65];
- A transferência de carga pode ser feita ao nível do edifício, explorando a inércia térmica do edifício (por exemplo, pré-arrefecimento, pré-aquecimento) ou ao nível do sistema, utilizando armazenamento intermédio (por exemplo, baterias e armazenamento térmico) [44];
- Os sistemas de aquecimento residenciais podem diminuir o consumo de carga durante os horários de pico, alterando a termostática pontos de ajuste do equipamento de aquecimento ou resfriamento de forma dinâmica, sem afetar significativamente o conforto dos ocupantes. A ligação entre contadores e termóstatos inteligentes à rede pode levar a uma redução substancial da procura de eletricidade e à poupança de energia, ajustando as preferências e os padrões de consumo dos membros [66];
- Para os eletrodomésticos, os produtos da linha branca (isto é, máquinas de lavar, secar, lavar-louça, dentre outros) são geralmente considerados fonte potencial de flexibilidade para programas de resposta à demanda liderados pelos membros [67];
- A introdução de mecanismos de recompensa pelas poupanças de energia alcançadas, são fundamentais para obter a mudança comportamental necessária para a ativação do programa de DR [44].

5. CONCLUSÕES

Neste último capítulo são descritas as apreciações finais relacionadas com a dissertação desenvolvida, tendo em conta os objetivos e contributos alcançados. Na secção 5.2 são nomeadas algumas das principais perspetivas de desenvolvimento para trabalho futuro nesta área.

5.1 Apreciações Finais

Em suma, ao longo da dissertação, foi empreendida uma investigação profunda no modelo de partilha de energia e no *Demand Response* em comunidades de energia em edifícios. Além disso, foi explorada a introdução do valor de *Shapley* como uma ferramenta equitativa para distribuir a energia gerada em contextos de cooperação. Nesse percurso, foram abordadas várias facetas desse campo, desde uma revisão abrangente do estado da arte até a conceção e implementação de modelos realistas, criação de casos de estudo, simulações e análise de resultados.

A revisão do estado da arte proporcionou uma base sólida para o trabalho, permitindo compreender as abordagens existentes e as lacunas que os estudos visavam preencher. Em seguida, foi implementados um modelo de partilha de energia para comunidade de energia em edifícios, com a criação de três caso de estudos que refletiam situações da distintas. O pri-

meiro, trata-se da distribuição aléatoria da energia gerada, o segundo, realiza a distribuição por meio do modelo de partilha de energia valor de *Shapley* e o terceiro, aplica o modelo de partilha valor de *Shapley* em conjunto com o programa DR. Através desses casos, foram conduzidas as simulações meticolosas e realizadas análises abrangentes de resultados.

Os resultados destacaram a eficiência do modelo de partilha de energia em edifícios, demonstrando claramente os benefícios de otimizar o uso de recursos energéticos. A implementação bem-sucedida do *Demand Response* também ofereceu resultados notáveis, ampliando ainda mais as vantagens do modelo de partilha de energia valor de *Shapley*. No caso III, a combinação dessas abordagens resultou em uma partilha de energia eficaz e sustentável, proporcionando ganhos significativos para todas as partes envolvidas, com uma redução de custo de 50,17% para comunidade do edifício.

Além disso, a dissertação não apenas contribuiu para o conhecimento acadêmico, mas também teve implicações práticas significativas. A implementação bem-sucedida dessas abordagens em edifícios sustentáveis tem o potencial de reduzir consideravelmente os custos de energia, promovendo simultaneamente a sustentabilidade ambiental e a equidade na distribuição de energia. Em um cenário global onde a eficiência energética e a mitigação das mudanças climáticas são imperativos, essas descobertas têm relevância crítica.

No entanto, é importante reconhecer as limitações inerentes a este estudo, que incluem a dependência das premissas e dados disponíveis, bem como a necessidade de explorar questões de escalabilidade em contextos mais complexos.

Assim, conclui-se que a colaboração e a equidade na partilha de recursos são elementos cruciais para a construção de edifícios eficientes e sustentáveis. À medida que se avança em direção a um futuro mais sustentável, a cooperação, a inovação e a equidade desempenharão papéis fundamentais na criação de comunidades de energia mais resilientes e eficientes.

5.2 Perspetivas para um Trabalho Futuro

Ao longo do desenvolvimento da dissertação alguns termos foram abordadas de forma enfática (nomeadamente a valor de *Shapley* e *Demand Response*), sendo, no entanto, termos essenciais na constante evolução das temáticas abordadas nesta tese. Com base no desenvolvimento e nos avanços realizados ao longo da dissertação, sugere-se algumas linhas de desenvolvimento e melhoria, das quais se destacam as seguintes:

- Pesquisar e realizar uma análise comparativa dos modelos de partilha, que permitam

reduzir os custos de energia em edifícios;

- Recolher mais dados e alargar amostra de estudo, com vista a validar com maior precisão este modelo;
- Implementar programas de DR baseado em preço para os consumidores em edifícios.

Referências Bibliográficas

- [1] Y. Yang, K. A. Kim, and T. Ding, “Modeling and control of pv systems,” in *Control of power electronic converters and systems*. Elsevier, 2018, pp. 243–268.
- [2] M. F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S. Muyeen, K. Techato, and J. M. Guerrero, “Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 19 410–19 432, 2020.
- [3] A. Olabi, K. Obaideen, K. Elsaid, T. Wilberforce, E. T. Sayed, H. M. Maghrabie, and M. A. Abdelkareem, “Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals sdgs using novel indicators,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, p. 111710, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121009849>
- [4] A. Jäger-Waldau, G. Kakoulaki, N. Taylor, and S. Szábo, “The role of the european green deal for the photovoltaic market growth in the european union,” in *2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2022, pp. 0508–0511.
- [5] R. Sadigov, “Rapid growth of the world population and its socioeconomic results,” *The Scientific World Journal*, vol. 2022, 2022.
- [6] R. Singh and R. Banerjee, “Estimativa do potencial solar fotovoltaico no telhado de uma cidade,” *Energia Solar*, vol. 115, pp. 589–602, 2015.
- [7] E. Biyik, M. Araz, A. Hepbasli, M. Shahrestani, R. Yao, L. Shao, E. Essah, A. C. Oliveira, T. del Caño, E. Rico, J. L. Lechón, L. Andrade, A. Mendes, and Y. B. Atli, “Uma revisão importante da construção de sistemas fotovoltaicos integrados (bipv),” *Engineering science and technology, um jornal internacional*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017.
- [8] P. Campos, L. Troncoso, P. D. Lund, C. Cuevas, A. Fissore, and R. Garcia, “Potential of distributed photovoltaics in urban chile,” *Solar Energy*, vol. 135, pp. 43–49, 2016.
- [9] R. F. Miranda, A. Szklo, and R. Schaeffer, “Technical-economic potential of pv systems on brazilian rooftops,” *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 694–713, 2015.
- [10] M. Castillo-Cagigal, E. Caamaño-Martín, E. Matallanas, D. Masa-Bote, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, and J. Jiménez-Leube, “PV self-consumption optimization with storage and active DSM for the residential sector,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2338–2348, Sep. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.028>
- [11] J. Poschmann, V. Bach, and M. Finkbeiner, “Are the eu climate ambitions reflected on member-state level for greenhouse gas reductions and renewable energy consumption shares?” *Energy Strategy Reviews*, vol. 43, p. 100936, 2022.
- [12] B. Fina, A. Fleischhacker, H. Auer, and G. Lettner, “Economic assessment and business models for shared use of photovoltaic systems in multi-apartment-buildings-case studies for austria and germany,” 09 2017.

- [13] S. Ramos, Z. Foroozandeh, J. Soares, I. Tavares, P. Faria, and Z. Vale, “Shared pv production in energy communities and buildings context,” in *19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’21)*, vol. 19, 2021, pp. 459–464.
- [14] P. Huang, M. Lovati, X. Zhang, and C. Bales, “A coordinated control to improve performance for a building cluster with energy storage, electric vehicles, and energy sharing considered,” *Applied Energy*, vol. 268, p. 114983, 2020.
- [15] R. Luthander, J. Widén, J. Munkhammar, and D. Lingfors, “Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment,” *Energy*, vol. 112, pp. 221–231, 2016.
- [16] D. de São José, P. Faria, and Z. Vale, “Smart energy community: A systematic review with metanalysis,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 36, p. 100678, 2021.
- [17] E. Espe, V. Potdar, and E. Chang, “Prosumer communities and relationships in smart grids: A literature review, evolution and future directions,” *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2528, 2018.
- [18] J. M. L. d. Costa, “Modulação de comunidades locais de energia renovável,” Ph.D. dissertation, 2022.
- [19] D. P. Kothari, R. Ranjan, and K. Singal, “Renewable energy sources and emerging technologies,” 2021.
- [20] T. Bauwens, D. Schraven, E. Drawing, J. Radtke, L. Holstenkamp, B. Gotchev, and Ö. Yildiz, “Conceptualizing community in energy systems: A systematic review of 183 definitions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111999, 2022.
- [21] J. A. Nelson, *The physics of solar cells*. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [22] N. M. Kumar, M. P. Subathra, and J. E. Moses, “On-grid solar photovoltaic system: components, design considerations, and case study,” in *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*. IEEE, 2018, pp. 616–619.
- [23] A. F. G. Soares, “Autoconsumo coletivo aplicado a um campus universitário,” Master’s thesis, 2022.
- [24] D. Frieden, A. Tuerk, J. Roberts, S. D’Herbemont, A. F. Gubina, and B. Komel, “Overview of emerging regulatory frameworks on collective self-consumption and energy communities in europe,” in *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [25] M. L. Di Silvestre, M. G. Ippolito, E. R. Sanseverino, G. Sciumè, and A. Vasile, “Energy self-consumers and renewable energy communities in italy: New actors of the electric power systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, p. 111565, 2021.
- [26] V. Z. Gjorgievski, S. Cundeva, and G. E. Georghiou, “Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review,” *Renewable Energy*, vol. 169, pp. 1138–1156, 2021.
- [27] D. N.-y. Mah, D. M.-w. Cheung, M. K. Leung, M. Y. Wang, M. W.-m. Wong, K. Lo, and A. T. Cheung, “Policy mixes and the policy learning process of energy transitions:

- Insights from the feed-in tariff policy and urban community solar in hong kong,” *Energy Policy*, vol. 157, p. 112214, 2021.
- [28] F. D. Minuto and A. Lanzini, “Energy-sharing mechanisms for energy community members under different asset ownership schemes and user demand profiles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, p. 112859, 2022.
- [29] P. Mehta and V. Tiefenbeck, “Solar pv sharing in urban energy communities: Impact of community configurations on profitability, autonomy and the electric grid,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 87, p. 104178, 2022.
- [30] D. N.-y. Mah, “Community solar energy initiatives in urban energy transitions: A comparative study of foshan, china and seoul, south korea,” *Energy Research & Social Science*, vol. 50, pp. 129–142, 2019.
- [31] A. Mayer, “Democratic institutions and the energy intensity of well-being: a cross-national study,” *Energy, Sustainability and Society*, vol. 7, pp. 1–10, 2017.
- [32] R. Lazdins, A. Mutule, and D. Zalostiba, “Pv energy communities—challenges and barriers from a consumer perspective: A literature review,” *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4873, 2021.
- [33] M. Lovati, X. Zhang, P. Huang, C. Olsmats, and L. Maturi, “Optimal simulation of three peer to peer (p2p) business models for individual pv prosumers in a local electricity market using agent-based modelling,” *Buildings*, vol. 10, no. 8, p. 138, 2020.
- [34] P. Augustine and E. McGavisk, “The next big thing in renewable energy: Shared solar,” *The Electricity Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 36–42, 2016.
- [35] F. Lezama, J. Soares, P. Hernandez-Leal, M. Kaisers, T. Pinto, and Z. Vale, “Local energy markets: Paving the path toward fully transactive energy systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 4081–4088, 2018.
- [36] S. D. Rodrigues and V. J. Garcia, “Transactive energy in microgrid communities: A systematic review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 171, p. 112999, 2023.
- [37] Y. Zou, Y. Xu, X. Feng, R. Naayagi, and B. Soong, “Transactive energy systems in active distribution networks: A comprehensive review,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 1302–1317, 2022.
- [38] M. Olken, “Transactive energy: Providing an enabling environment [from the editor],” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 4–4, 2016.
- [39] S. Yin, J. Wang, and F. Qiu, “Decentralized electricity market with transactive energy – a path forward,” *The Electricity Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 7–13, 2019, special Issue on Strategies for a sustainable, reliable and resilient grid. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619019300156>
- [40] D. Forfia, M. Knight, and R. Melton, “The view from the top of the mountain: Building a community of practice with the gridwise transactive energy framework,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 25–33, 2016.
- [41] B. M. Ruhul Amin, R. Shah, K. N. Hasan, U. B. Tayab, and S. Islam, “An overview of demand response opportunities for commercial and industrial customers in the austra-

- lian nem,” in *2022 IEEE PES 14th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2022, pp. 1–6.
- [42] H. C. Gils, “Assessment of the theoretical demand response potential in europe,” *Energy*, vol. 67, pp. 1–18, 2014.
- [43] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, “Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 45, pp. 785–807, 2015.
- [44] F. Pallonetto, M. De Rosa, F. D’Ettore, and D. P. Finn, “On the assessment and control optimisation of demand response programs in residential buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 127, p. 109861, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120301544>
- [45] M. Rothleder and C. Loutan, “Case study–renewable integration: flexibility requirement, potential overgeneration, and frequency response challenges,” in *Renewable Energy Integration*. Elsevier, 2017, pp. 69–81.
- [46] V. Bianco, M. De Rosa, F. Scarpa, and L. A. Tagliafico, “Analysis of energy demand in residential buildings for different climates by means of dynamic simulation,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 108–120, 2016.
- [47] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*. MIT press, 1991.
- [48] J. Sanango, E. Samaniego, J. L. Espinoza, and R. Sempértegui, “A study of microgrids through cooperative games including the effect of geographical proximity,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [49] M. A. Arif, M. Ndoye, G. V. Murphy, and K. Aganah, “A cooperative game theory algorithm for distributed reactive power reserve optimization and voltage profile improvement,” in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [50] T. Hiller, “Quantitative overeducation and cooperative game theory,” *Economics Letters*, vol. 152, pp. 36–40, 2017.
- [51] L. S. Shapley *et al.*, “A value for n-person games,” 1953.
- [52] I. Schulze-Horn, N. Pulles, H. Schiele, and P. Scheffler, “Using mechanism design theory in negotiations to improve purchasing performance,” *International journal of procurement management*, vol. 11, no. 6, pp. 777–800, 2018.
- [53] M. Shubik, “Incentives, decentralized control, the assignment of joint costs and internal pricing,” *Management science*, vol. 8, no. 3, pp. 325–343, 1962.
- [54] R. Pilling, S. C. Chang, and P. B. Luh, “Shapley value-based payment calculation for energy exchange between micro-and utility grids,” *Games*, vol. 8, no. 4, p. 45, 2017.
- [55] K. Leyton-Brown and Y. Shoham, “Essentials of game theory: A concise, multidisciplinary introduction. morgan & claypool,” 2008.
- [56] J. Xie, L. Zhang, X. Chen, Y. Zhan, and L. Zhou, “Incremental benefit allocation for joint operation of multi-stakeholder wind-pv-hydro complementary generation system

- with cascade hydro-power: An aumann-shapley value method,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 68 668–68 681, 2020.
- [57] D. Fryer, I. Strümke, and H. Nguyen, “Shapley values for feature selection: The good, the bad, and the axioms,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 144 352–144 360, 2021.
- [58] W. Wu, J. Zhu, Y. Chen, T. Luo, P. Shi, W. Guo, P. Shi, and C. Jiang, “Modified shapley value-based profit allocation method for wind power accommodation and deep peak regulation of thermal power,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 1, pp. 276–288, 2023.
- [59] M. Wu and C. Jie, “Application of improved shapley value in benefit distribution of industry-university-research institute,” in *2022 Global Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Information Technology (GCRAIT)*, 2022, pp. 590–593.
- [60] T. Han, J. Chen, L. Wang, Y. Cai, and C. Wang, “Interpretation of stability assessment machine learning models based on shapley value,” in *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. IEEE, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ei247390.2019.9061984>
- [61] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. A. and, “Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement,” *PLoS Medicine*, vol. 6, no. 7, p. e1000097, Jul. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- [62] C. Goncalves, R. Barreto, P. Faria, L. Gomes, and Z. Vale, “Dataset of an energy community’s generation and consumption with appliance allocation,” *Data in Brief*, vol. 45, p. 108590, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340922007971>
- [63] *Notes on the N-Person Game — II: The Value of an N-Person Game*. RAND Corporation, 1951. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7249/rm0670>
- [64] OMIE, “Mercado eléctrico ibérico,” 2023. [Online]. Available: <https://www.omie.es/>
- [65] M. De Rosa, M. Carragher, and D. P. Finn, “Flexibility assessment of a combined heat-power system (chp) with energy storage under real-time energy price market framework,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, pp. 426–438, 2018.
- [66] K. S. Cetin and Z. O’Neill, “Smart meters and smart devices in buildings: A review of recent progress and influence on electricity use and peak demand,” *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, vol. 4, pp. 1–7, 2017.
- [67] K. Stenner, E. R. Frederiks, E. V. Hobman, and S. Cook, “Willingness to participate in direct load control: The role of consumer distrust,” *Applied energy*, vol. 189, pp. 76–88, 2017.