

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTRUTURA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ENTRE CONSUMIDORES E
PROSUMIDORES DE UMA MICRORREDE POR INTERMÉDIO DE UM LEILÃO DUPLO**

por

Marina Neubauer da Costa Schertel

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Dezembro 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTRUTURA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ENTRE CONSUMIDORES E
PROSUMIDORES DE UMA MICRORREDE POR INTERMÉDIO DE UM LEILÃO DUPLO

por

Marina Neubauer da Costa Schertel

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Letícia Jenish Rodrigues
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner

Banca examinadora:

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos – DELAE/UFRGS

Prof.^a Dr.^a Letícia Jenish Rodrigues – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne – DELAE/UFRGS

Porto Alegre, 11 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Martha Neubauer da Costa e Raul Cerveira Schertel, por sempre estarem dispostos a me ajudar a alcançar meus objetivos e a superar todos os desafios, por me apoiarem nas minhas conquistas e por sempre me incentivarem a dar o meu melhor.

Ao meu amor, Valentin Dupre, por sempre ter me apoiado e estado do meu lado para tudo, por me ter me ajudado mesmo com a dificuldade da língua e da distância.

À minha irmã, Lara Neubauer da Costa Schertel, pelo apoio e por ter tornado dias cansativos em dias mais alegres.

À minha avó, Abigail Neubauer da Costa, pelo apoio e compreensão durante esses anos.

À minha amiga, Paula Coloretti Ferrarese, pelo companheirismo, apoio e contribuições durante todos esses anos de amizade.

Ao meu amigo, Pedro Sandri Pantaleão, pelas reflexões em relação ao trabalho e por me motivar a seguir minhas ideias.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Haffner, por todo suporte, conselhos e contribuições dados para esse trabalho.

Aos meus amigos e familiares, que participaram dessa trajetória e contribuíram para que ela fosse mais fácil e divertida.

A todos os professores que me acompanharam na graduação, pelo compartilhamento de seus conhecimentos e pelas lições ensinadas durante minha formação.

SCHERTEL, M. N. C. **Estrutura de Comercialização de Energia entre Consumidores e Prosumidores de uma Microrrede por intermédio de um Leilão Duplo**. 2019. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo propor uma estrutura de comercialização de energia local entre consumidores e prosumidores de uma microrrede conectada a rede elétrica por intermédio de um leilão duplo com uma hora de antecedência. A microrrede é composta por três tipos de unidades consumidoras que são classificadas em função da existência de geração e armazenamento de energia em suas instalações. Para cada classificação, foi desenvolvido um algoritmo para representar um agente autônomo que toma decisões em relação à oferta que a unidade consumidora na qual ele está instalado enviará para a plataforma digital de leilão. Esses algoritmos definem como cada agente deve comprar, armazenar e vender a energia elétrica na próxima hora. As transações reais de energia entre as unidades consumidoras e a concessionária ocorrem durante a hora para qual o leilão foi previsto. Assim, após a finalização dessas transações, comparam-se as transações financeiras previstas pelo leilão e as trocas de energia elétrica que foram realizadas. A concessionária realiza o ajuste financeiro, comprando ou vendendo a diferença de energia para cada agente para que eles possam cumprir os contratos firmados no leilão. Para ilustrar o funcionamento e os benefícios proporcionados pela utilização da estrutura de comercialização proposta, foram considerados diferentes cenários de análise simulados no *software* Matlab. Nesses cenários foram avaliados a influência do leilão, do armazenamento e da modalidade da tarifa da concessionária (convencional ou branca) utilizada como referência para as ofertas realizadas no leilão. Conclui-se esse trabalho apresentando os ganhos financeiros e benefícios aportados pela estrutura de comercialização proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Prosumidor, Comercialização P2P, Microrrede, Leilão Duplo

SCHERTEL, M. N. C. **Peer-to-peer Energy Trading Framework based on Double Auction in a Microgrid**. 2019. 24 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The goal of this paper is to propose a local energy trading framework between consumers and prosumers of a microgrid connected to the power grid based on an hour-ahead double auction. The microgrid consists of three types of consumers which are classified according to the existence of energy generation and storage in their facilities. For each classification, an algorithm has been developed to represent an autonomous agent who makes decisions regarding the offer that the consumer unit in which it is installed will send to the digital auction platform. These algorithms define how each agent should buy, store and sell electricity in the next hour. Actual energy transactions between consumer units occur during the time for which the auction was predicted. Thus, after the conclusion of the transactions, the financial transactions provided by the auction and the actual electricity exchanges are compared. The utility makes the financial adjustment by buying or selling the energy difference for each agent so that they can fulfill the contracts signed in the auction. To evaluate the functioning and benefits provided by the use of the proposed energy trading framework, different scenarios were simulated in the software Matlab. In these scenarios, the influence of the auction, storage and utility tariff (conventional or white) used as a reference for the offers sent to the auction were evaluated. This paper is concluded by presenting the financial gains and the benefits provided by the proposed framework.

KEYWORDS: Prosumer, P2P trading, Microgrid, Double Auction

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	ESTRUTURA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA.....	4
2.1	Visão geral do funcionamento da estrutura de comercialização de energia proposta	4
2.2	Previsão das ofertas dos agentes no leilão	6
2.3	Comercialização de energia.....	11
2.4	Liquidação das diferenças de energia.....	11
3	DEFINIÇÕES E HIPÓTESES UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO	12
4	RESULTADOS	15
4.1	Resultado das previsões das ofertas enviadas por cada agente para o leilão	15
4.2	Resultados dos leilões	17
4.3	Liquidação das diferenças de energia.....	19
4.4	Comparação entre cenários.....	20
5	CONCLUSÃO	22

1 INTRODUÇÃO

Na maior parte do século XX, consumidores não podiam escolher de quem queriam comprar energia elétrica, tendo que comprar das concessionárias que tinham o monopólio do fornecimento da área onde estavam localizados. Essas concessionárias eram integradas verticalmente, proprietárias das usinas de geração, das redes de transmissão e distribuição, ou eram concessionárias de distribuição, que possuíam o monopólio da venda de energia elétrica e distribuição na área local. A partir de 1980, alguns economistas começaram a afirmar que os monopólios das concessionárias as desmotivavam a operar de forma eficiente e encorajavam investimentos desnecessários. Assim, se empresas pudessem competir livremente pelo fornecimento de eletricidade, empresas concorrentes iriam provavelmente escolher tecnologias diferentes e os ganhos de eficiência originados da competição iriam finalmente beneficiar os consumidores finais (KIRSCHEN, 2004).

No Brasil, diferente de alguns países da Europa e Estados Unidos, os consumidores residenciais ainda não podem escolher de quem querem comprar energia elétrica e o sistema de distribuição continua sendo um monopólio. No sistema atual, os custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica variam ao longo do tempo e os consumidores residenciais pagam tarifas baseadas em custos médios (FERRAZ, 2016). A revolução digital tem rompido drasticamente com as indústrias estabelecidas através da comercialização em plataformas on-lines, como Uber, Amazon e Airbnb. A implementação de novas tecnologias da informação e comunicação (TIC) possibilita novas oportunidades de negócio. No setor energético, ela oferece oportunidades de criação de valor através da descentralização dos mercados de energia, reinventando a cadeia de valor tradicional desde a produção de energia à sua distribuição e tornando a operação do sistema elétrico mais realística, considerando o equilíbrio entre a oferta e a demanda em tempo real (HSG, 2019). Devido a essas mudanças, os órgãos envolvidos precisam começar a considerar novos modelos de negócio e de precificação, que incluam novos agentes e descentralizem o mercado.

Mercados descentralizados são caracterizados por 5 áreas de negócio: fornecimento, demanda, armazenamento, compartilhamento e interfaces facilitadoras de mercado (HSG, 2019). Para realizar interações entre as diferentes áreas e coordenar um grande número de participantes, sistemas com múltiplos agentes são propostos na literatura. Nesses sistemas, os participantes possuem funções diferentes e variáveis. Kahrobaee *et al.* (2013) apresentaram um sistema com múltiplos agentes onde casas inteligentes foram modeladas como agentes autônomos que tomam decisões racionais sobre como uma casa deve comprar, armazenar, vender e usar a eletricidade para minimizar sua fatura de eletricidade. Eles descreveram como os agentes residenciais priorizam as decisões baseando-se no lucro que a sua geração, armazenamento e comercialização aportará. A partir dos estudos realizados, os autores mostraram como o desempenho de todos os agentes converge para um equilíbrio que beneficia os participantes do mercado em condições diferentes de operação e determinam situações nas quais residências tradicionais lucram comprando seus próprios sistemas de geração e armazenamento.

Prosumidores são consumidores que, além de consumir, também fornecem energia. Transformar consumidores em prosumidores pode trazer benefícios econômicos, operacionais e ambientais, visto que o gerenciamento pelo lado da demanda começa a desempenhar um papel importante nos sistemas de energia, fazendo com que os consumidores forneçam serviços ancilares à rede, como: redução da demanda, resposta à demanda, armazenamento de energia e microgeração. Assim, a comercialização de energia entre vizinhos em uma microrrede pode tornar a utilização dos recursos energéticos locais mais eficiente e sustentável. Nesse tipo de cenário de comercialização, o excesso de energia gerada pode ser vendido para a concessionária ou para vizinhos que não possuem geração instalada, podendo trazer benefícios econômicos tanto para quem compra quanto para quem vende, além de reduzir a dependência da concessionária e as emissões de carbono (AKTER, MAHMUD e Oo, 2017). A comercialização de energia também pode contribuir para tornar os sistemas de armazenamento mais competitivos e viáveis economicamente. Akter *et al.* (2016) apresentaram um sistema de gerenciamento de energia hierárquico para uma microrrede residencial no qual as casas com sistemas fotovoltaicos instalados podem vender o excesso de energia para os seus vizinhos. A metodologia proposta foi simulada para 9 casas na Austrália e os resultados mostraram que a microrrede com comercialização de energia entre vizinhos reduz o *payback* do investimento total realizado nos sistemas fotovoltaicos e nos sistemas de armazenamento para

as casas da microrrede. Amin *et al.* (2016), apresentaram uma análise de custo benefício entre a adoção de um sistema fotovoltaico e de um sistema fotovoltaico com um sistema de armazenamento de energia, demonstrando a partir de uma análise com tarifação em tempo real que as casas que possuíam só sistemas fotovoltaicos podiam maximizar suas economias se instalassem um sistema de armazenamento, considerando uma tarifa de venda para rede muito menor que a tarifa de compra.

O número de projetos e tentativas para realizar o compartilhamento de energia localmente entre consumidores com geração de energia (conhecido em inglês pelo termo *Peer-to-peer (P2P) energy trading*) têm aumentado significativamente. Alguns desses projetos são focados em modelos de negócios e plataformas para comercialização de energia, enquanto outros focam em tecnologias da informação e comunicação e controle local para microrredes. Em 2014, Vandebron, uma *startup* holandesa, implementou o primeiro mercado de energia on-line que permite que consumidores comprem eletricidade diretamente de produtores independentes, sem que as concessionárias participem das transações. Os clientes definem o tempo de contrato desejado e a quantidade de energia necessária no website podendo escolher a fonte de geração e de quais produtores de energia eles querem comprar (ZHANG *et al.*, 2017; PARK e YONG, 2017; VANDEBRON, 2019). A empresa Sonnen permite que consumidores com geração armazenem a energia que produziram em suas baterias e comercializem o excesso de energia entre os membros da SonnenCommunity. O equilíbrio entre a energia fornecida e a demanda é feito através de um *software* central que conecta e monitora todos os membros da comunidade. Para receber a energia fisicamente, o *software* informa para o operador do sistema de distribuição sobre as transações de energia e paga uma taxa de serviço incluída na assinatura da comunidade. A SonnenBatterie também inclui previsões de tempo e dados de hábitos de consumo de eletricidade no seu sistema de gerenciamento (ZHANG *et al.*, 2017; PARK e YONG, 2017; SONNEN, 2019). A empresa Change 38 acredita que o sistema de potência atual não agrega valor para os consumidores finais, devido à regulação excessiva, às soluções centralizadas que não focam nas necessidades dos consumidores, à falta de competência dos fornecedores atuais que não permitem a disrupção e aos modelos de negócios mono e oligopolísticos. Para resolver esse problema, eles propõem que o sistema de potência do futuro seja uma comunidade orientada para um ecossistema baseado em protocolos de confiança (*blockchain*) com microrredes, *softwares* e *hardwares*, que revoluciona o uso de energia com um mercado P2P para comercialização de energia. A abordagem proposta já foi testada em uma comunidade na Suíça, onde consumidores e produtores formaram uma cooperativa para testar a comunidade descentralizada e autossuficiente em energia com as soluções do Change 38 (HSG, 2019; CHANGE 38, 2019). A TransActive Grid é um empreendimento conjunto do fornecedor de *software* de energia LO3 Energy e o desenvolvedor de aplicativos Consensus. Ela é uma comunidade que comercializa energia entre seus membros através de uma combinação de *software* e *hardware* usando contratos inteligentes e protocolos de confiança. O protótipo dessa comunidade está sendo testado no Brooklyn, onde consumidores residenciais com geração podem vender o excesso de energia produzido para seus vizinhos e comercializar a energia produzida localmente, reduzindo as perdas e aumentando a eficiência da rede elétrica (ZHANG *et al.*, 2017; LO3 ENERGY, 2019).

Todas as empresas citadas propõem novas formas de comprar e vender energia, reduzir as faturas de eletricidade dos consumidores e aumentar a receita dos prosumidores, visto que a receita obtida pela venda de energia para os outros consumidores ou prosumidores é maior que a receita obtida pela venda para concessionária. Concluiu-se que Vandebron, Sonnen e Change 38 são plataformas on-line de comercialização de energia entre seus membros e os donos da plataforma possuem um papel similar ao do fornecedor de eletricidade, já a TransActive Grid utiliza tecnologia baseada em protocolos de confiança para simplificar as medições e os pagamentos do mercado de energia, sendo mais focada em desenvolver um mercado de energia local P2P em microrredes (ZHANG *et al.*, 2017). As vantagens dessas plataformas de comercialização são que a energia produzida pode ser relacionada a uma receita e a utilização da energia produzida pode ser melhorada através de uma rede cooperativa entre prosumidores e consumidores. Prosumidores não precisam mais aceitar o preço pago pela concessionária pelo excesso de energia que produziram, tendo a possibilidade de vender para outros consumidores por um preço mais alto, mas que seja menor do que o pago por estes para comprar energia da concessionária para que estes também possam economizar. Para que a comercialização P2P seja viável é importante assegurar a lucratividade dos modelos de negócio. Em todos os exemplos vistos, os modelos de negócio beneficiam tanto os produtores quanto os consumidores. No futuro, a comercialização P2P provavelmente vai

continuar se expandindo com a redução do custo das energias renováveis e dos sistemas de armazenamento e com o aumento do número de áreas onde esse tipo de mercado é permitido (PARK e YONG, 2017). Redes de energia inteligentes com a integração de energias renováveis apresentam muitos desafios às políticas energéticas existentes, exigindo uma mudança de paradigma na maneira como essas políticas são planejadas e estruturadas para que novos modelos de negócio possam ser implementados.

A viabilidade da comercialização de energia entre consumidores tradicionais e consumidores com geração instalada depende fortemente da vontade de participar de ambos, da regulação e das regras. Considerando que ambos os tipos de consumidores só participariam da comercialização se tivessem algum benefício financeiro atrelado, se o preço de venda da energia produzida em excesso pelos prosumidores for competitivo, os consumidores tradicionais seriam atraídos a comprar eletricidade dos consumidores com geração ao invés de comprar da concessionária.

O leilão duplo é um processo de compra e venda no qual potenciais compradores e vendedores enviam seus lances simultaneamente a um leiloeiro, o qual define o preço de equilíbrio do mercado. Todos os vendedores que enviaram um preço menor ou igual ao preço de equilíbrio e todos os compradores que enviaram um preço maior ou igual participam das comercializações que são realizadas no leilão a esse preço. Esse método é atualmente empregado para comercialização de energia na *Brooklyn Microgrid*, uma microrrede na qual os consumidores com geração fotovoltaica vendem energia para os consumidores sem geração, já citada anteriormente nesse trabalho. O funcionamento da comercialização dessa microrrede pode ser encontrado em Mengelkamp *et al.* (2018).

Baseando-se nas ideias propostas pelas referências bibliográficas apresentadas, o presente trabalho teve como objetivo geral propor uma estrutura de comercialização de energia entre consumidores e prosumidores de uma microrrede por intermédio de um leilão duplo com uma hora de antecedência. A estrutura de comercialização proposta não considerou o sistema elétrico brasileiro atual, no qual o fornecimento de energia ainda é um monopólio da concessionária. Ela também não considerou o sistema de compensação como forma de comercialização de energia entre a concessionária e os consumidores, visto que esse sistema permite que a concessionária “armazene” sem custo a energia produzida por consumidores com geração na rede elétrica. Isso ocorre pois 1 kWh consumido possui o mesmo valor que 1 kWh produzido. Esse modelo acaba prejudicando a rede elétrica e os outros consumidores através do reajuste tarifário pelo fato de não considerar as perdas de transmissão nem os encargos nessa equivalência. As regras do sistema de compensação estão sendo revisadas e novas formas de fazer a compensação estão sendo avaliadas para tornar esse sistema mais justo para todos os envolvidos, o que resulta na redução do valor da tarifa de compra de energia pela concessionária, tornando-o menor que o valor de venda de energia da concessionária. Essa diferença entre a venda e a compra de energia pela concessionária permite que os agentes enviem ofertas entre esses valores para o leilão.

Na estrutura proposta, os consumidores e prosumidores podem comercializar energia com qualquer participante do leilão e os preços de energia são definidos pelas interações do mercado. Dessa forma, procura-se gerenciar de uma forma mais eficiente os recursos energéticos locais e beneficiar as partes interessadas através de suas interações no leilão. Para ilustrar o funcionamento e avaliar os benefícios da abordagem proposta pelo lado da concessionária e pelo lado do consumidor, foram considerados 5 cenários que analisaram a influência da adoção do leilão, de sistemas de armazenamento por prosumidores e de cada modalidade de tarifa da concessionária (convencional ou branca) na estrutura. Esse trabalho foi dividido em 3 seções. A Seção 2 apresenta todo o funcionamento da estrutura de comercialização proposta, sendo dividido em 4 subseções. A Subseção 2.1 apresenta uma visão geral de todo funcionamento da estrutura, descrevendo a composição da estrutura, a composição da microrrede, como é realizada a interação entre os agentes da microrrede e a plataforma digital do leilão e quais são os macroprocessos realizados por cada agente para que ocorra a comercialização. A Subseção 2.2 mostra como é feita a previsão do consumo e da geração de energia de cada unidade consumidora e como é feita a previsão dos preços a serem ofertados no leilão para essas quantidades de energia. Na Subseção 2.3, é apresentado especificamente o funcionamento do leilão duplo com e sem armazenamento e, na Subseção 2.4, é explicado como é feita a liquidação das diferenças de energia, ou seja, o ajuste financeiro entre o que foi contratado no leilão e as trocas de energia que foram realizadas. A Seção 3 apresenta as definições e hipóteses fundamentais utilizadas na simulação realizada no *software* Matlab para validar a estrutura de comercialização proposta. A Seção 4 apresenta os resultados da simulação. Nesse capítulo são apresentados o resultado das previsões das ofertas enviadas por cada agente para o leilão, os resultados

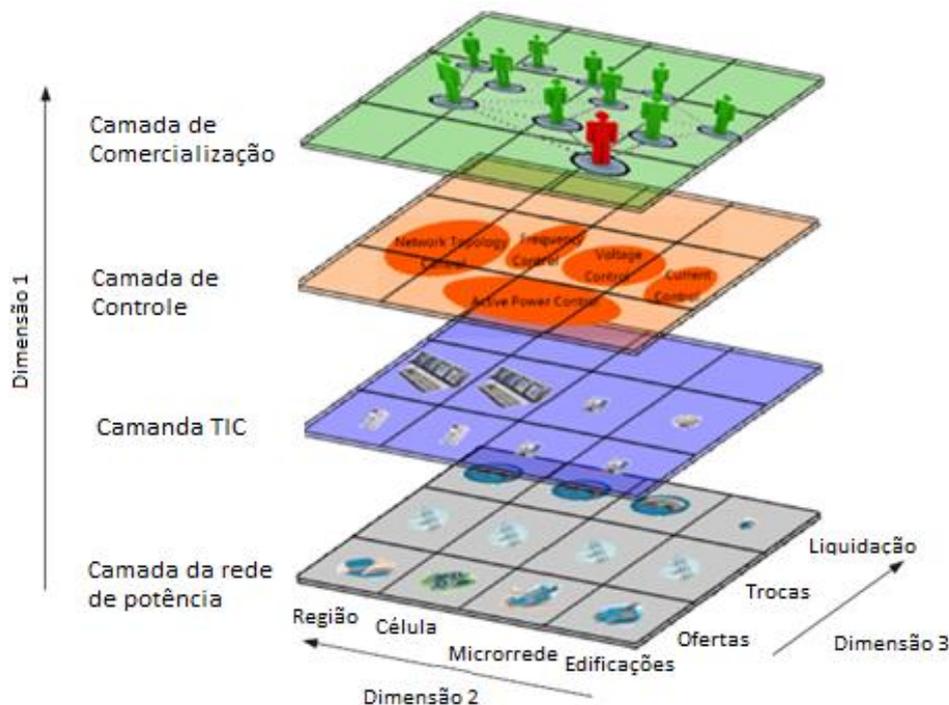
dos leilões realizados durante o período de um dia, o ajuste financeiro realizado pela concessionária e uma comparação entre os 5 cenários analisados.

2 ESTRUTURA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

2.1 Visão geral do funcionamento da estrutura de comercialização de energia proposta

A estrutura de comercialização de energia proposta nesse trabalho baseia-se na arquitetura de um sistema de comercialização de energia P2P de quatro camadas apresentada em Zhang *et al.* (2018) e mostrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Arquitetura de um sistema de comercialização de energia P2P de quatro camadas



Fonte: ZHANG *et al.*, 2018.

A arquitetura do sistema apresentada na Figura 2.1 possui três dimensões. A primeira dimensão é composta por quatro camadas de interoperabilidade. A camada de comercialização determina como a energia vai ser comercializada entre os agentes participantes do mercado. A camada de controle é composta pelas funções de controle de um sistema de distribuição de energia elétrica, como, por exemplo, o controle de tensão, o controle de frequência e o controle de potência ativa. A camada TIC consiste nos dispositivos de comunicação, protocolos e fluxo de informações. A camada da rede de potência é composta por todos componentes físicos do sistema de potência, como equipamentos de medição, cargas e geração distribuída. A segunda dimensão é composta pelo tamanho dos participantes do mercado e a terceira dimensão mostra a sequência dos processos de comercialização, iniciando pelas ofertas enviadas ao leilão, seguidas pelas trocas realizadas no leilão e pela liquidação das diferenças.

Um dos objetivos específicos desse trabalho era simular a comercialização de energia entre os consumidores e prosumidores de uma microrrede em um leilão duplo, focando, assim, na camada de comercialização. Por isso, não se entra em detalhe nas camadas de controle, TIC e da rede de potência. Supõe-se que o gerenciamento e as comercializações realizadas dentro da microrrede são feitas através de uma plataforma digital de leilão de energia que utiliza TIC em conjunto com dispositivos de medição e controle e *softwares* agentes instalados nas unidades consumidoras. A plataforma digital de leilão é responsável pelas interações financeiras entre os agentes da microrrede no leilão duplo, enquanto os *softwares* agentes instalados nas unidades consumidoras são responsáveis pelas previsões da demanda, da geração e do armazenamento de energia de cada unidade e pelo controle dos dispositivos TIC. A

concessionária é responsável pelo ajuste financeiro realizado após o leilão, no qual comparam-se as transações de energia previstas pelos agentes e que foram contratadas no leilão com as que realmente ocorreram na hora do leilão. A microrrede simulada nesse trabalho é composta por três tipos de unidades consumidoras (UC) classificadas em relação à existência de geração e armazenamento de energia em suas instalações, conforme mostrado na Tabela 2.1.

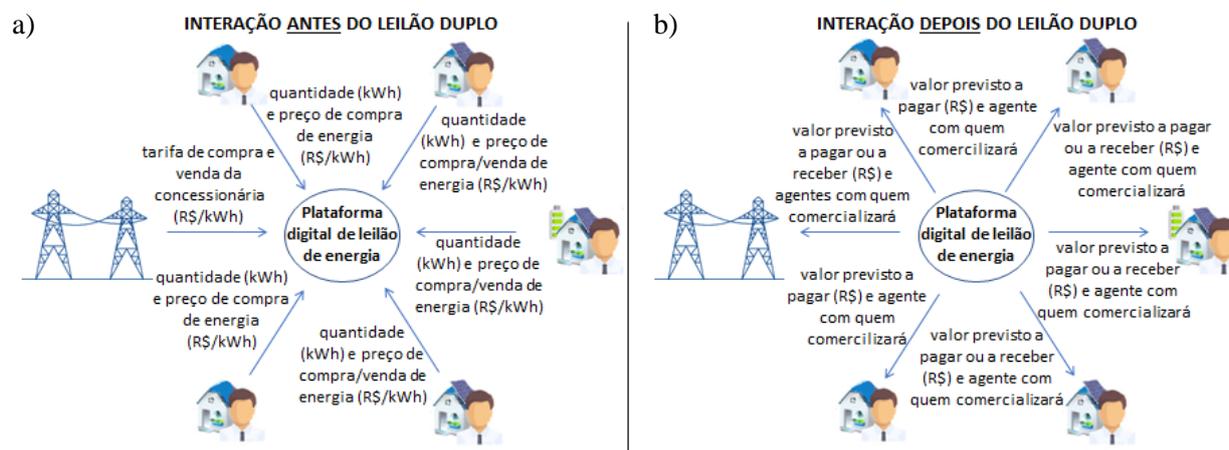
Tabela 2.1 - Classificação das unidades consumidoras que compõem a microrrede

UC	Possui geração fotovoltaica?	Possui armazenamento de energia?
Tradicional	Não	Não
Prosumidora	Sim	Não
Entusiasta	Sim	Sim

Fonte: AUTOR.

As unidades consumidoras são modeladas como agentes autônomos que tomam decisões racionais sobre como cada unidade deve comprar, armazenar, vender e usar a eletricidade. A Figura 2.2 apresenta como o *software* agente instalado em cada unidade consumidora interage com a plataforma digital de leilão de energia, na qual acontece o leilão duplo.

Figura 2.2 - Interação entre os agentes de cada unidade consumidora e a plataforma digital de leilão de energia que ocorre a cada hora.



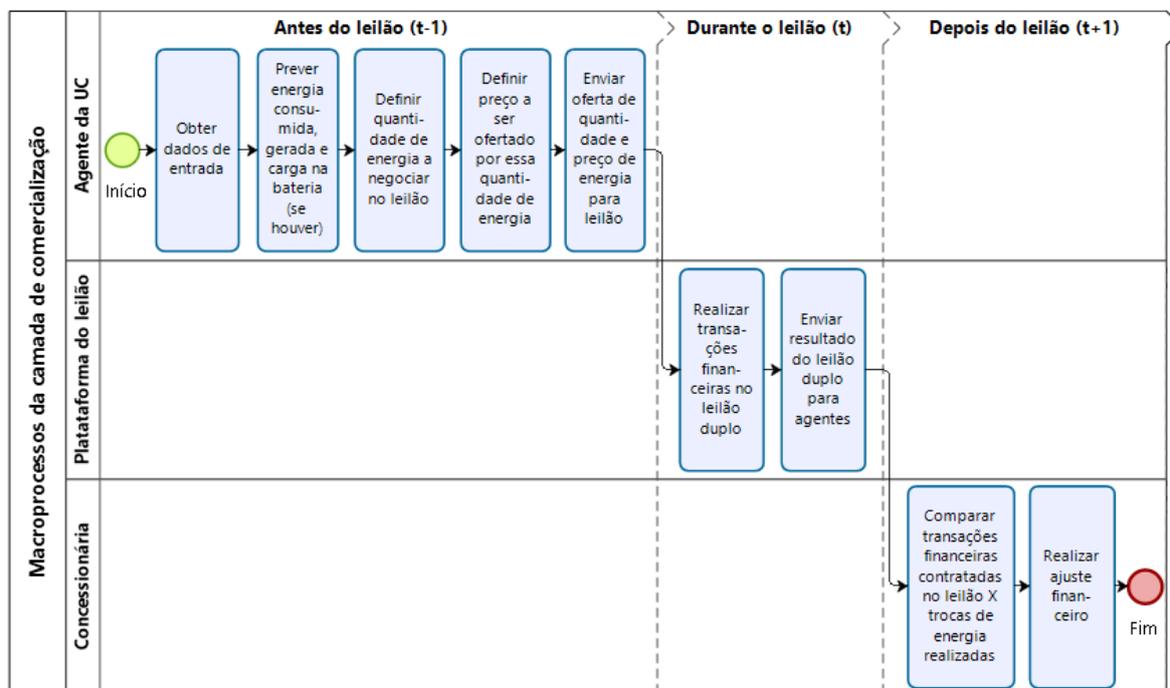
Fonte: AUTOR.

Como pode ser observado na Figura 2.2a, antes do leilão duplo, cada agente envia a oferta que deseja dar no leilão da próxima hora para a plataforma digital de leilão. A oferta é composta pela quantidade de energia que ele deseja comercializar e o preço que está disposto a pagar ou receber por essa quantidade. Na Figura 2.2b, depois do leilão duplo, a plataforma disponibiliza o resultado do leilão, fornecendo para cada agente e para a concessionária o valor que ele vai pagar ou receber de acordo com o contrato firmado no leilão e com quem será realizada a comercialização.

A Figura 2.3 mostra o fluxograma da estrutura de comercialização de energia proposta e quem são os responsáveis pela realização de cada macroprocesso dessa estrutura. Os agentes das UCs são responsáveis por obter os dados de entrada, isto é, obter o histórico de medições de consumo e geração de energia fornecidos pelo medidor inteligente instalado em cada UC, o estado de carga da bateria (se houver) e conhecer a tarifa contratada pela UC para compra e venda de energia da concessionária. A partir dos dados do histórico de medição e do estado de carga atual da bateria, o agente prevê a quantidade de energia consumida e gerada para a UC na qual está instalado e calcula a diferença entre elas para definir a quantidade de energia que será negociada no leilão da próxima hora. Após conhecida essa informação, ele define o preço que será ofertado para essa quantidade. O agente envia a quantidade de energia e o preço que serão ofertados no leilão duplo para a plataforma digital do leilão. A plataforma realiza as transações financeiras para próxima hora através de um leilão duplo e disponibiliza o resultado do leilão para os agentes e para concessionária. A concessionária compara a quantidade de energia que cada agente contratou no leilão com a quantidade de energia que ela forneceu ou recebeu de cada agente e

realiza um ajuste financeiro. Nesse ajuste, ela paga ou recebe pela energia que o agente teve que lhe comprar ou vender para suprir a diferença entre a energia que ele havia contratado no leilão e a que ele realmente trocou com a concessionária.

Figura 2.3 - Fluxograma proposto para o funcionamento da estrutura de comercialização de energia.

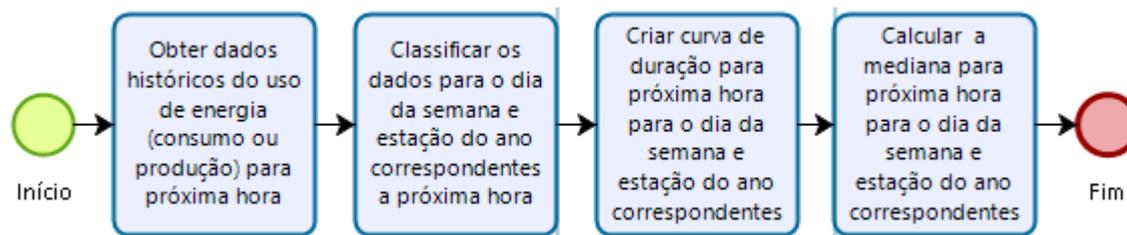


Fonte: AUTOR.

2.2 Previsão das ofertas dos agentes no leilão

A Figura 2.4 apresenta o fluxograma detalhado de como são feitas as previsões de consumo e geração de energia pelos agentes.

Figura 2.4 - Fluxograma proposto para prever o consumo e geração de energia de cada unidade consumidora.



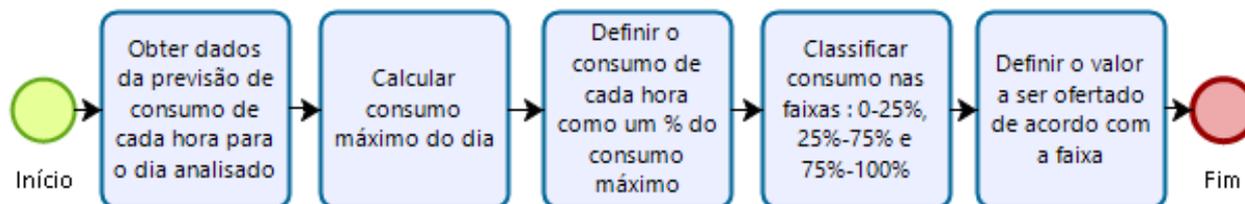
Fonte: AUTOR.

Conforme pode ser observado na Figura 2.4, para prever o consumo e a geração de energia da unidade consumidora para próxima hora, o agente precisa dos dados históricos de medição do consumo e da geração fornecidos pelo medidor inteligente instalado na UC. O agente classifica esses dados por dia da semana e por estação do ano e cria uma curva de duração para próxima hora para o dia da semana e estação do ano correspondentes. A partir da curva de duração, ele calcula a mediana para próxima hora para o dia da semana e estação do ano correspondentes. Após prever o consumo e a geração para próxima hora, ele define a quantidade de energia que será ofertada no leilão fazendo a diferença entre a geração prevista e o consumo previsto. Se a diferença for positiva, significa que a geração é maior que o consumo, assim o agente da unidade consumidora venderá o excesso de energia no leilão duplo e o lance dado será o preço mínimo que ele está disposto a receber pela venda dessa energia. Se a diferença for negativa, significa que o consumo é maior que a geração, assim o agente comprará o déficit de energia no leilão

duplo e o lance dado será o preço máximo que ele está disposto a pagar pela compra da energia que ele precisa para suprir seu consumo.

A previsão do preço a ser ofertado para cada quantidade de energia no leilão pelos agentes tradicionais é feita conforme o fluxograma apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Previsão das ofertas de preços dos agentes tradicionais.

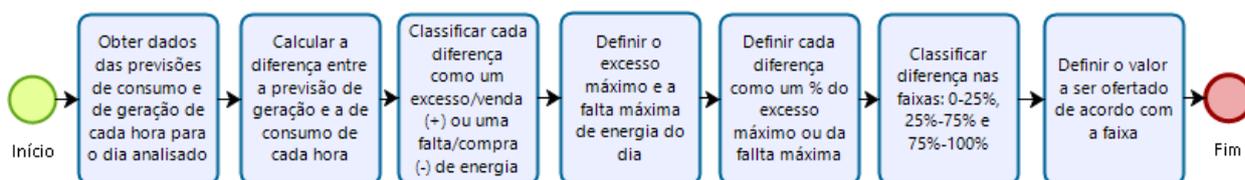


Fonte: AUTOR.

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.5, utiliza-se a previsão do consumo de cada unidade consumidora para prever os preços que serão ofertados no leilão por cada agente tradicional para cada hora do dia. A previsão é feita para o período de um dia para levar em consideração na definição do preço a influência da geração, do armazenamento e da modalidade da tarifa da concessionária. Para isso, obtém-se o consumo máximo do dia em análise e define-se que o consumo de cada hora é equivalente a um percentual do consumo máximo. A partir dessa definição, o consumo de cada hora é classificado de acordo com seu percentual dentro de 3 faixas: 0-25%, 25-75% e 75-100%. Se a hora do leilão está entre 9h e 14h, período no qual geralmente há geração, o agente faz uma oferta mais barata na faixa de 0 a 25%, pois a concorrência na venda de energia nesse período é maior, visto que nesse horário, além da concessionária, os prosumidores também vendem energia. Entre 18h e 5h, período no qual se encontra o horário de ponta e a noite, não tem geração e há pouca concorrência para venda de energia. Além da concessionária, somente prosumidores com armazenamento vendem energia. Assim, para tentar garantir sua entrada no leilão e pagar mais barato nesse período, o agente faz uma oferta mais cara na faixa de 75 a 100%, valor próximo ao da tarifa que a concessionária vende energia. Fora desses horários, cada faixa corresponde a uma faixa de oferta de preço, por exemplo, um consumo que se encontra entre 0 e 25% do valor máximo de consumo do dia equivale a um consumo pequeno que corresponde a uma oferta de preço barata. Dessa forma, se ele entra no leilão, ele paga barato, mas se não entra, paga a tarifa da concessionária para uma quantidade pequena de energia. Já se o consumo se encontra entre 75 e 100% do valor máximo de consumo, como o consumo é elevado, o agente quer ter certeza que entrará no leilão, pois assim, vai pagar por essa quantidade elevada de energia um valor mais barato que a tarifa da concessionária. Por isso, o agente dá uma oferta de compra cara e próxima da tarifa que a concessionária vende a energia, pois como será visto na explicação do leilão duplo, os lances de compra de todos os agentes são ordenados em ordem decrescente, assim só entram no leilão os lances de compra mais altos.

O fluxograma apresentado na Figura 2.6 mostra como é feita a previsão dos agentes prosumidores e do agente entusiasta quando desconsiderado o armazenamento.

Figura 2.6 - Previsão das ofertas de preços dos agentes prosumidores.



Fonte: AUTOR.

É possível observar no fluxograma da Figura 2.6 que o preço de compra ou de venda de energia ofertados pelos agentes prosumidores no leilão para cada hora são definidos a partir das previsões de consumo e de geração de cada hora para o dia em análise. Assim, calcula-se a diferença entre a previsão de geração e a previsão de consumo de cada hora para definir se será comprada (déficit) ou vendida (excesso) energia no leilão da próxima hora. A partir dessas informações, determina-se o excesso máximo

e o déficit máximo de energia do dia e define-se a diferença de cada hora como um percentual do excesso máximo ou do déficit máximo de energia do dia. A diferença de cada hora é classificada de acordo com seu percentual nas faixas: 0-25%, 25-75% e 75-100%. Utilizando a mesma lógica do agente tradicional, no período entre 18 e 5h, o agente prosumidor faz uma oferta mais cara para tentar entrar no leilão. Fora desse período, durante as outras horas do dia, se a diferença corresponde a um déficit de energia, o agente segue o mesmo raciocínio que o agente tradicional. Se consome pouco faz uma oferta mais barata, visto que se não entrar no leilão paga mais caro por uma quantidade pequena de energia. Se consome muito, faz uma oferta mais cara para tentar garantir sua entrada no leilão. Já se a diferença corresponder a um excesso de energia e sua geração for baixa, ele cobra caro para vender seu excesso, pois como no leilão os lances dos vendedores são ordenados em ordem crescente, se ele ficar de fora do leilão, venderá uma quantidade pequena de energia para concessionária. Já se sua geração for elevada, ele cobra barato para vender essa energia no leilão, pois ele vende uma quantidade elevada de energia por um preço maior do que o preço pago pela concessionária.

A Tabela 2.2 apresenta as equações que definem os preços a serem ofertados dentro de cada faixa, independente da classificação do agente. A of é a oferta de preço proposta pelo agente (R\$/kWh), tc é a tarifa de compra de energia pela concessionária (R\$/kWh), tv é a tarifa de venda de energia pela concessionária (R\$/kWh), fa é um valor aleatório entre 0 e 1, que é utilizado para diferenciar as ofertas dadas pelos agentes para cada hora dentro das faixas.

Tabela 2.2 - Equações utilizadas para definição dos preços a serem ofertados para cada faixa.

Faixa	Equação
0-25%	$of = tc + fa \times 0,25 \times (tv - tc)$
25-75%	$of = tc + 0,25 \times (tv - tc) + fa \times ((tv - 0,25 \times (tv - tc)) - (tc + 0,25 \times (tv - tc)))$
75-100%	$of = tv - fa \times 0,25 \times (tv - tc)$

Fonte: AUTOR.

Para definir os valores a serem ofertados no leilão para cada quantidade de energia pelo agente da UC com armazenamento, foi implementado um algoritmo para representar esse agente. Esse algoritmo utiliza como dados de entrada a quantidade de energia gerada, a quantidade de energia consumida, a quantidade de energia armazenada na bateria e a quantidade de energia que falta para completar a bateria. A partir das quantidades de energia gerada e consumida, ele calcula a diferença entre a geração e o consumo e determina se a unidade consumidora teria um excesso (diferença positiva) ou um déficit (diferença negativa) de energia na próxima hora. Após conhecida essa diferença, ele a compara com a quantidade de energia que foi armazenada na bateria nas horas anteriores ou com a quantidade de energia que falta para completar a bateria. Com base nessas comparações, o agente faz uma proposição de um conjunto de quatro ofertas, sendo cada uma utilizada para um caso comparativo diferente.

A Tabela 2.3 resume como a energia da UC é utilizada para cada oferta que entra no leilão para cada caso comparativo. Nessa tabela, observa-se que as ofertas de cada conjunto variam o seu valor podendo ser caras, médias ou baratas e podendo ser de compra ou de venda de energia. A cada leilão, o agente deve determinar qual conjunto de ofertas que ele vai enviar baseando-se no caso comparativo em que se encontra. Desse conjunto, todas as ofertas de um mesmo tipo podem participar de um mesmo leilão, por exemplo todas as ofertas de venda do conjunto ou todas as ofertas de compra. O preço de equilíbrio do leilão define quais ofertas do conjunto que vão participar baseando-se no seu valor, visto que cada conjunto possui ofertas de valores diferentes desde valores mais baratos até mais caros. Ofertas de tipos diferentes de um conjunto não podem participar de um mesmo leilão pois não é possível carregar e descarregar a bateria ao mesmo tempo e nem comprar e vender energia para si mesmo. Assim, para que uma oferta de venda de um conjunto não participe no mesmo leilão que uma oferta de compra desse conjunto, adota-se que uma oferta de venda é sempre maior que uma oferta de compra em um mesmo conjunto, visto que para que ocorra um leilão é necessário que a oferta de venda seja menor que a de compra.

Tabela 2.3 – Definição do que ocorre com a energia da UC para cada oferta que entra no leilão.

Diferença	Caso Comparativo	Conjunto	Oferta no leilão	Se oferta entra no leilão	Ilustração do que ocorre
excesso de energia	excesso > energia que falta para completar a bateria	1	Vende barato	Armazena excesso até completar toda energia que falta na bateria e vende excesso que ainda resta	
			Vende médio	Vende todo excesso de energia sem armazenar na bateria	
			Vende caro	Vende todo excesso de energia e toda energia que já estava armazenada na bateria das horas anteriores	
			-	Não compra energia	
	excesso < energia que falta para completar a bateria	2	-	Não vende barato e armazena excesso	
			Vende médio	Vende todo excesso de energia sem armazenar na bateria	
			Vende caro	Vende todo excesso de energia e toda energia que já estava armazenada na bateria das horas anteriores	
			Compra médio	Armazena excesso de energia e compra o que falta para completar a bateria	

Diferença	Caso Comparativo	Conjunto	Oferta no leilão	Se oferta entra no leilão	Ilustração do que ocorre
déficit de energia	déficit > energia que já está armazenada na bateria	3	Compra caro	Consome toda energia que já estava armazenada na bateria e compra o que ainda falta	
			Compra médio	Compra toda energia que falta e não consome energia que já estava armazenada na bateria	
			Compra barato	Compra toda energia que falta e compra energia que falta pra completar a bateria	
			-	Não vende energia	
	déficit < energia que já está armazenada na bateria	4	-	Não compra caro e consome o déficit da bateria	
			Compra médio	Compra toda energia que falta e não consome energia que já estava armazenada na bateria	
			Compra barato	Compra toda energia que falta e compra energia que falta pra completar a bateria	
			Vende caro	Consome energia que já estava armazenada na bateria e vende o que ainda resta na bateria	

Fonte: AUTOR.

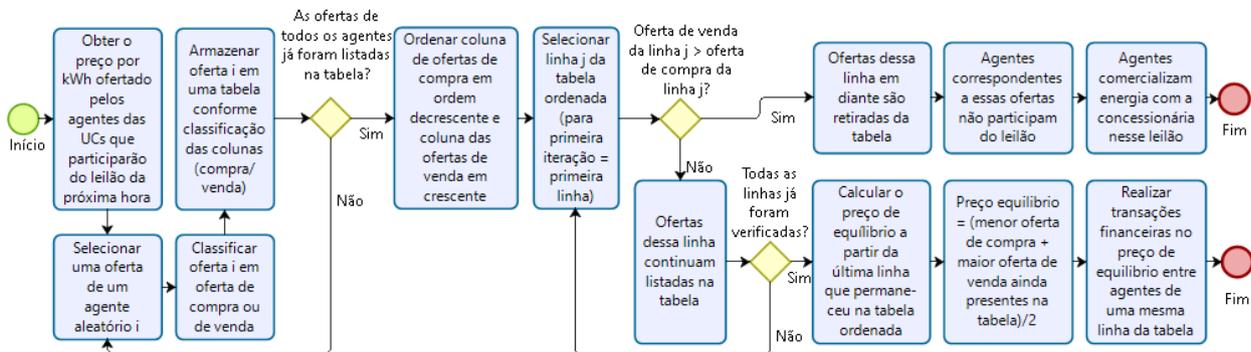
Após definidas as quantidades de energia que serão ofertadas no leilão por cada agente e o valor que o mesmo está disposto a pagar ou receber por essa quantia, o agente envia a oferta para comercialização na plataforma digital do leilão.

2.3 Comercialização de energia

Os agentes tomam decisões em relação à comercialização de energia a partir dos dados históricos de consumo e de geração de cada unidade consumidora e da tarifa da concessionária contratada por ela. Conforme foi explicado na seção anterior, a partir desses dados, é definido se cada unidade participará das comercializações com os outros consumidores, se ela venderá ou comprará energia e o lance que ela enviará ao leilão duplo. O leilão duplo é realizado pela plataforma digital de leilão a partir dos preços por kWh e das quantidades de energia enviadas pelos agentes das UCs. Foi suposto que a microrrede opera somente conectada a rede elétrica, assim as UCs da microrrede que não comercializam energia com as UCs prosumidoras ou entusiastas no leilão duplo para uma determinada hora, comercializam a energia com a concessionária contratada pelo consumidor.

Para comercializar energia entre os múltiplos compradores e múltiplos vendedores da microrrede, foi realizado um leilão duplo (mais conhecido como *double auction*), no qual os compradores dão um lance de preço máximo que estão dispostos a pagar por uma certa quantidade de energia e os vendedores (consumidores com geração) dão um lance de preço mínimo que estão dispostos a vender uma certa quantidade de energia (MENGELKAMP *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2014). A Figura 2.7 apresenta o funcionamento do leilão duplo.

Figura 2.7 - Comercialização de energia dentro da microrrede através de um leilão duplo.



Fonte: AUTOR.

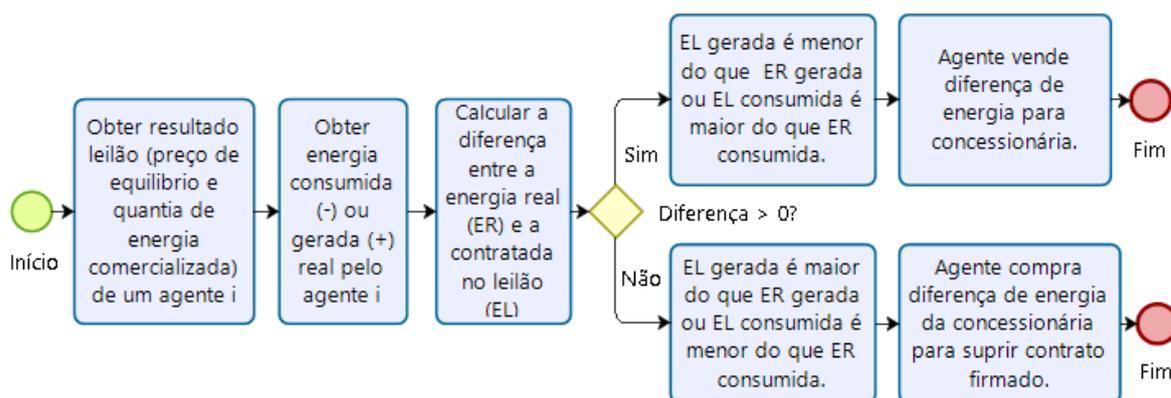
Como pode ser observado na Figura 2.7, para realização do leilão duplo, a plataforma digital de leilão de energia obtém os lances e as quantidades de energia enviados pelos agentes de cada unidade consumidora. Os lances dos compradores são ordenados em ordem decrescente e os lances dos vendedores em ordem crescente. Dessa forma, o comprador que deu o maior lance comercializa com o vendedor que deu o menor lance, o comprador que deu o segundo maior lance comercializa com o vendedor que deu o segundo menor lance e assim por diante. Para cada uma das transações, é avaliado se o lance dado pelo vendedor é maior que o lance dado pelo comprador. No momento em que o lance do vendedor é maior que o lance do comprador não ocorre comercialização e o preço de equilíbrio é dado pela média entre a oferta de compra e a oferta de venda da última transação, na qual o lance do vendedor ainda era menor que o lance do comprador. Para os casos em que não ocorre comercialização entre os agentes, ou seja, quando o lance do vendedor é maior que o lance do comprador, a energia é comprada ou vendida para concessionária. Já para os casos em que ocorre comercialização entre os agentes, todas as transações são realizadas no preço de equilíbrio e são bilaterais.

Como a parte financeira do leilão ocorre com uma hora de antecedência em relação às trocas de energia, quando há um agente com armazenamento participando do leilão, o sistema de controle do armazenamento permite que a bateria seja carregada ou descarregada exatamente conforme o resultado do leilão. Assim, o agente dessa UC consegue definir com mais facilidade e exatidão a oferta que fará para cada hora, visto que já sabe o quanto a bateria vai carregar ou descarregar.

2.4 Liquidação das diferenças de energia

Após passada a hora para a qual é realizado o leilão, é necessário comparar a transação contratada no leilão duplo com a troca de energia que foi realizada nessa hora para cada UC. A Figura 2.8 apresenta essa comparação em detalhe para 1 hora para uma UC.

Figura 2.8 - Comparação entre o que foi contratado no leilão e o que realmente ocorreu.



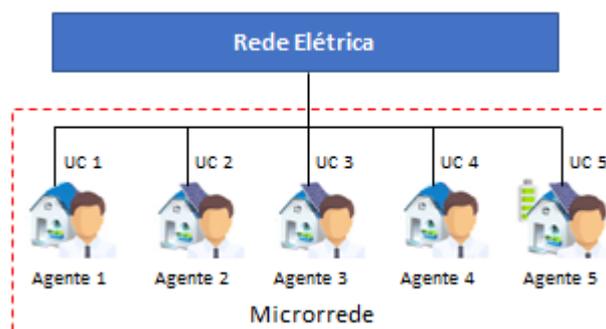
Fonte: AUTOR.

Para comparar o que foi contratado no leilão com o que foi realizado, calcula-se a diferença entre a quantidade de energia contratada para compra ou venda no leilão e a energia que foi realmente trocada entre a rede e cada unidade consumidora. Se essa diferença for negativa, a concessionária supre o déficit de energia na transação e o agente que era responsável por essa energia paga essa diferença à concessionária utilizando a tarifa de venda da concessionária para cada kWh faltante. Já se essa diferença for positiva, houve um excesso de energia fornecido para transação e a concessionária paga essa diferença para o agente que foi responsável por esse excesso utilizando a tarifa de compra da concessionária para cada kWh em excesso. Após realizada a liquidação das diferenças, compara-se o valor pago ou recebido na transação realizada entre os agentes no leilão com o valor pago ou recebido na transação que seria realizada com a concessionária se não houvesse leilão, sendo a diferença entre esses valores equivalente ao lucro ou a economia real obtida com a adoção do leilão.

3 DEFINIÇÕES E HIPÓTESES UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO

Uma microrrede é uma rede de baixa tensão de pequena escala que fornece energia para cargas elétricas ou térmicas de uma pequena comunidade ou região. Ela é essencialmente uma rede de distribuição ativa, visto que é composta por sistemas de geração distribuída e diferentes cargas em baixa tensão e apresenta fluxos de potência bidirecionais. As principais diferenças entre uma microrrede e uma rede convencional são que os geradores de energia da microrrede são de uma capacidade muito menor do que os geradores das redes convencionais, que a potência gerada na tensão de distribuição pode ser diretamente alimentada na rede de distribuição da concessionária e que os geradores de energia normalmente são instalados nas edificações das unidades consumidoras, assim as cargas elétricas ou térmicas são fornecidas de forma eficiente com perfis de tensão e frequência satisfatórios e com perdas desprezíveis nas linhas. As vantagens das microrredes são: a diminuição dos impactos ambientais devido à redução das emissões com a utilização da geração distribuída, a redução da distância entre o gerador e a carga, a melhoria da qualidade de energia e a redução de custos relacionados à geração. Além dessas vantagens, a microrrede pode compartilhar a energia gerada entre os consumidores localmente e desenvolver formas de operações regidas por interações de mercado (CHOWDHURY, CHOWDHURY e CROSSLEY, 2009). A microrrede analisada nesse trabalho foi composta por 5 unidades consumidoras para simplificar as simulações e análises realizadas, visto que esse número já é suficiente para observar o funcionamento da estrutura proposta. Como já foi mencionado anteriormente, foi definido que cada uma dessas unidades consumidoras seria representada no leilão por um *software* agente autônomo, dessa forma cada leilão foi realizado com 5 agentes e a concessionária. A Figura 3.1 ilustra essa composição.

Figura 3.1 - Composição da microrrede participante do leilão



Fonte: AUTOR.

É possível observar na Figura 3.1 a suposição de que a microrrede opera somente conectada a rede elétrica. Nota-se que as UC 2 e UC 3 são prosumidoras devido aos sistemas solares fotovoltaicos instalados nos seus telhados, que a UC 5 é entusiasta pois possui um sistema de geração e um sistema de armazenamento de energia e que as UC 1 e UC 4 são tradicionais visto que não possuem nem geração nem armazenamento. Tanto a classificação quanto a composição de cada UC são apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Composição de cada unidade consumidora

Unidade Consumidora	Classificação	Composição da Unidade Consumidora
UC 1	Tradicional	Casal, ambos trabalhando
UC 2	Prosumidora	Família com 1 criança, ambos pais trabalhando
UC 3	Prosumidora	Mãe com 2 filhos, com trabalho
UC 4	Tradicional	Mulher com mais de 65 anos
UC 5	Entusiasta	Casal com 2 filhos, marido trabalhando

Fonte: AUTOR.

Foi possível observar na Tabela 3.1 que cada unidade consumidora possui uma quantidade diferente de pessoas com idades e atividades distintas, o que resulta em diferentes perfis de consumo. Os dados históricos de consumo de energia elétrica de cada unidade consumidora foram obtidos pela simulação do consumo de cada uma utilizando o *software* Load Profile Generator. Nesse *software* é possível gerar curvas de carga para unidades consumidoras a partir da utilização de perfis de consumo pré-definidos ou criando seu próprio perfil a partir do comportamento das pessoas que moram na unidade consumidora e da forma como elas utilizam os equipamentos elétricos. Para esse trabalho foram utilizados os perfis de consumo pré-definidos de acordo com as composições das unidades consumidoras definidas na Tabela 3.1. Os dados foram gerados para cada hora (tempo de resolução de 1h) para um período que iniciou às 0h de 01/01/2012 e foi até às 24h de 31/12/2014. A localização geográfica considerada foi Berlin e foi definido que os equipamentos elétricos que seriam utilizados na análise se comportariam de forma a economizar energia. Foi determinado que a simulação seria realizada para o ano de 2014, assim os dados que foram obtidos para os anos de 2012 e 2013 seriam utilizados para fazer a previsão do consumo e os dados obtidos para 2014 representariam o consumo real de cada unidade consumidora.

Os dados históricos de geração de energia elétrica de cada UC que possui geração foram obtidos pela simulação da geração solar fotovoltaica de cada uma no simulador on-line *Renewables.ninja*. Neste, foi possível obter os dados de geração para o ano de 2014 provenientes de duas fontes de dados diferentes: o *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2) da NASA que cobre toda a superfície global da Terra e o *Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat* (SARAH) do *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (CM-SAF) que cobre toda a superfície da Europa. Assim, ficou definido que os dados provenientes do CM-SAF SARAH seriam utilizados para fazer a previsão da geração e os dados provenientes do MERRA-2 representariam a geração real de cada UC. Para obter os dados de geração no *Renewables.ninja*, foi necessário fornecer as seguintes informações: a capacidade instalada em kW do sistema solar fotovoltaico, as perdas do sistema, se o

sistema possui rastreamento, a inclinação do painel fotovoltaico em relação a horizontal e o azimute. A capacidade em kW do sistema solar fotovoltaico foi obtida para cada unidade consumidora com geração utilizando o seu consumo médio diário e um valor de aproximadamente 3h para as horas de sol pico em Berlin (SOLARGIS, 2019). Assim, obteve-se um sistema com a capacidade instalada de 3 kW para a UC 2, 4 kW para a UC 3 e 5,5 kW para a UC 5. Foi considerado um fator de desempenho global do sistema de aproximadamente 75% (SMA, 2019) e que o sistema não possui rastreamento. Para a inclinação do painel, foi considerada a inclinação ideal para Berlin de 40° (ROCK PAPER SUN, 2012) e foi considerado um azimute de 180°.

Além dos dados históricos de consumo e geração de energia elétrica, para a unidade consumidora com armazenamento também foi necessário considerar o estado de carga inicial do banco de baterias. Para o dimensionamento do banco, foi considerado que esse teria autonomia de 1 dia, uma profundidade de descarga de 50% e que deveria suprir um consumo médio de 16,42 kWh/dia. As baterias utilizadas teriam uma capacidade de 240 Ah e tensão de 12 V, o que resultaria em um banco capaz de armazenar 34,56 kWh/dia composto por 12 baterias, sendo 2 em série e 6 em paralelo.

Para completar a obtenção dos dados de entrada também foi necessário obter as tarifas de compra e venda de energia da concessionária. Para esse trabalho foi definido que seriam realizadas análises com duas modalidades de tarifa de venda de energia elétrica da concessionária: a convencional e a horária branca. A tarifa branca possibilita que o consumidor pague valores diferentes em função da hora e do dia da semana em que consome a energia. Nos dias úteis, essa tarifa tem três valores que são definidos de acordo com a demanda de energia: ponta (período com maior demanda de energia), intermediário (uma hora antes e uma hora depois do horário de ponta) e fora de ponta (período com menor demanda de energia). Esses períodos são diferentes para cada distribuidora e são estabelecidos pela ANEEL. Como as curvas de carga utilizadas se assemelham com as curvas de carga de residências do sul do Brasil, foram adotados os preços finais das duas modalidades de tarifa da concessionária CEEE para a classe “Residencial Convencional” (CEEE, 2019) apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Valores adotados para a tarifa de venda e compra de energia da concessionária na simulação.

Modalidade	Segmento Horário	Período de Vigência	Tarifa de venda (R\$/kWh)	Tarifa de compra (R\$/kWh)
Convencional	Convencional	24h	0,84	0,32
Horária Branca	Fora Ponta	0h00 às 16h59 22h00 às 23:59	0,73	0,28
	Intermediário	17h00 às 17h59 21h00 às 21h59	0,99	0,37
	Ponta	18h00 às 20h59	1,51	0,58

Fonte: AUTOR.

Para a venda de energia gerada pelas UC para a concessionária, foi adotado o cenário alternativo 5 proposto para revisão da Resolução Normativa nº482/2012 da ANEEL, no qual os valores referentes à transmissão do Fio A e do Fio B deixam de ser compensados, os encargos da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD), as perdas de energia e os encargos da tarifa de energia passam a ser pagos (ANEEL, 2018). O valor do Fio A é a componente da TUSD correspondente ao custo do uso de redes de distribuição ou de transmissão de terceiros. O valor do Fio B é a componente da TUSD correspondente ao custo do serviço prestado pela própria distribuidora. Esse cenário foi adotado nesse trabalho por ser considerado mais realístico e por tornar a estrutura proposta possível, visto que no sistema de compensação atual esses fatores não são considerados e a compra e a venda de energia pela concessionária são compensadas financeiramente com 1 kWh consumido sendo equivalente a 1 kWh produzido. Dessa forma, a tarifa de compra de energia pela concessionária considerada nesse trabalho equivale a aproximadamente 38% da tarifa de venda de energia da concessionária.

Foi definido que o período de análise desse estudo de caso seria de 1 dia, pois assim seria possível verificar o efeito da utilização da tarifa branca e o comportamento do armazenamento. Como o leilão é realizado na hora anterior à hora do consumo, para realizar a análise para períodos mais longos, como um mês ou um ano, seria necessário somente replicar as etapas realizadas para um dia para vários dias.

Para ilustrar o funcionamento da estrutura proposta e os benefícios aportados por ela, foram definidos 5 cenários para serem simulados no *software* Matlab. Nesses cenários foram analisados a influência da modalidade da tarifa da concessionária (convencional ou branca), do armazenamento e da adoção do leilão. As características de cada um desses cenários estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Cenários adotados para simular a estrutura de comercialização proposta.

Cenário	Comercializa no leilão?	Qual a modalidade da tarifa da concessionária?	Possui armazenamento instalado na UC?
0	Não	Convencional	Sem armazenamento
1	Sim	Convencional	Sem armazenamento
2	Sim	Convencional	Com armazenamento
3	Sim	Branca	Sem armazenamento
4	Sim	Branca	Com armazenamento

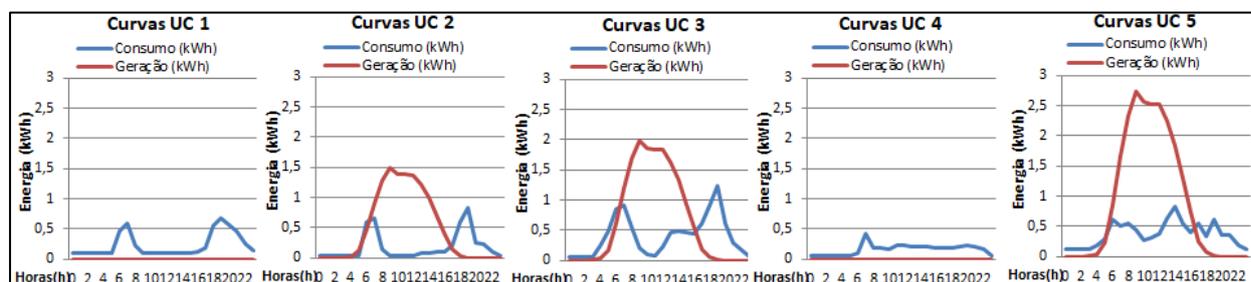
Fonte: AUTOR.

4 RESULTADOS

4.1 Resultado das previsões das ofertas enviadas por cada agente para o leilão

Os 5 cenários de análise propostos foram simulados para o dia 12/08/2014 (definido aleatoriamente) através da implementação do leilão duplo em um algoritmo no *software* Matlab. Para isso, foram obtidos os dados históricos de consumo e de geração de cada unidade consumidora no *software* Load Profile Generator e simulou-se o consumo e a geração que seriam previstos pelo agente de cada UC para próxima hora. A Figura 4.1 apresenta as curvas previstas de consumo e geração de cada UC para esse dia.

Figura 4.1- Curvas previstas de consumo e geração por unidade consumidora para o dia 12/08/2014



Fonte: AUTOR.

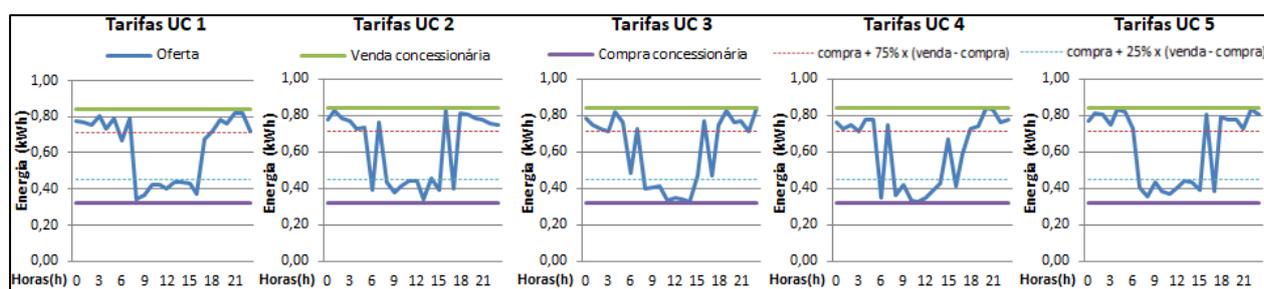
Na Figura 4.1, comparou-se a geração e o consumo previstos das unidades consumidoras. Observou-se que a UC 5 possui uma capacidade maior de geração, seguida pela UC 3 que possui a segunda maior capacidade e pela UC 2 que possui a terceira maior capacidade. Como o dia 12/08/2014 é um dia de verão em Berlin, observou-se que a geração prevista iniciou-se aproximadamente às 5h e foi até aproximadamente às 17h. A geração foi maior que o consumo das 7h às 16h para as UC 2 e UC 3 e das 6h às 16h para a UC 5. As UC 1 e UC 4 não possuem sistemas de geração, assim suas gerações apareceram zeradas nos gráficos. Como elas são unidades consumidoras tradicionais, elas sempre foram compradoras de energia no leilão, pois sempre precisavam comprar o equivalente ao seu consumo. Como o dia 12/08/2014 era uma terça-feira, ou seja, um dia de semana, as horas de trabalho influenciaram no consumo. Como a UC 1 é composta por um casal que trabalha, observou-se que o consumo durante as horas de trabalho é bem baixo, havendo dois picos: um entre a hora de acordar e a hora de partir para o trabalho e um entre a hora de voltar do trabalho e a hora de dormir. Esses mesmos picos podem ser observados nos perfis de consumo das UC 2 e UC 3, visto que em ambas todos adultos trabalham durante aproximadamente as mesmas horas, sendo que na UC 3 como há duas crianças que provavelmente estudam só um turno, o consumo aumenta após o meio-dia. A UC 4 é composta por uma senhora solteira com mais de 65 anos, assim como ela não trabalha, seu perfil de consumo não possui picos e é praticamente constante durante o dia. A UC 5 é composta por um marido que trabalha fora de casa, uma esposa que fica em casa e duas crianças, assim observou-se que há um consumo significativo em

praticamente todas as horas do dia se comparado com as outras unidades consumidoras, não havendo grandes picos de consumo.

A partir das previsões realizadas para cada UC, foram definidas as quantidades de energia que foram ofertadas no leilão para cada hora do dia. As previsões relacionadas às quantidades de energia das UC 1, UC 2, UC 3 e UC 4 foram iguais para todos os cenários, pois o armazenamento e a tarifa de energia não influenciam na quantidade de energia ofertada, somente o consumo e a geração influenciam, que são os mesmos para todos os casos. Para a UC 5, as quantidades de energia ofertadas variam para os cenários 2 e 4, pois a quantidade de energia armazenada na bateria após a realização de cada leilão influencia na oferta do leilão da próxima hora.

Considerando que a modalidade da tarifa da concessionária era a convencional (cenários 1 e 2), a previsão dos preços a serem ofertados a cada hora para cada quantidade de energia proposta por cada UC foram apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Preços a serem ofertados para cada quantidade de energia por UC para tarifa convencional e sem armazenamento

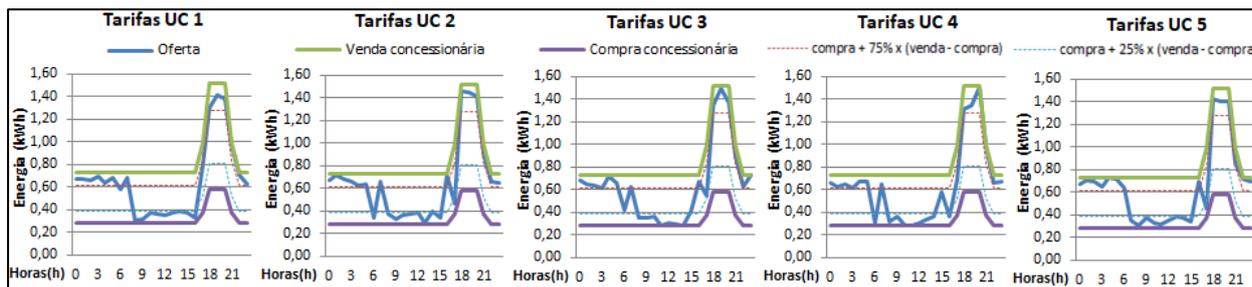


Fonte: AUTOR.

Os preços para a UC 5 na Figura 4.2 foram previstos para o cenário sem armazenamento e com tarifa convencional (1). A partir da Figura 4.2, foi possível observar que para que os compradores conseguissem entrar no leilão, era necessário que os valores previstos por eles para a oferta no leilão durante a noite se aproximassem do valor de venda de energia da concessionária. Isso era necessário pois nesse período a concorrência era menor, já que os únicos vendedores no leilão eram o agente entusiasta (UC 5), que vendia a energia armazenada no seu banco de baterias, e a concessionária. Como a concorrência era baixa, o agente entusiasta cobrava mais caro pela energia armazenada na sua bateria, pois era o único vendedor no leilão além da concessionária. Dessa forma, os compradores só podiam comprar energia dele ou da concessionária, o que lhe permitia cobrar um valor próximo ao valor de venda da concessionária para aumentar o seu lucro, mas um valor que ainda fosse menor do que o de venda da concessionária para que a venda de sua energia também fosse atrativa para os compradores. Também foi possível observar que os valores previstos para a oferta no leilão pelos compradores se aproximavam do valor de compra de energia pela concessionária durante o período em que os prosumidores (UC 2 e UC 3) e o agente entusiasta vendiam energia. Isso ocorreu pois a concorrência era maior nesse período, então haviam mais vendedores no leilão. Os agentes dos compradores previam valores mais baratos para serem ofertados com o objetivo de obterem uma economia maior. Como a oferta era maior nesse período, os vendedores precisavam cobrar mais barato para conseguir entrar no leilão e vender seu excesso de energia mais caro do que venderiam se vendessem para concessionária.

A Figura 4.3 apresenta os preços previstos por cada UC para cada quantidade de energia a ser ofertada a cada hora no leilão considerando que a tarifa da concessionária era a branca (cenários 3 e 4). Os valores previstos para a UC 5 nessa figura eram para o cenário 3, isto é, sem armazenamento. Foi possível observar na Figura 4.3 que, como no horário da ponta, tanto a tarifa de venda quanto a tarifa de compra da concessionária encareceram, os valores previstos para oferta no leilão aumentaram proporcionalmente. Observou-se também que os valores previstos para serem ofertados para os cenários com a tarifa branca seguem a mesma lógica que para os cenários com tarifa convencional.

Figura 4.3 - Preços a serem ofertados para cada quantidade de energia por UC para tarifa branca e sem armazenamento



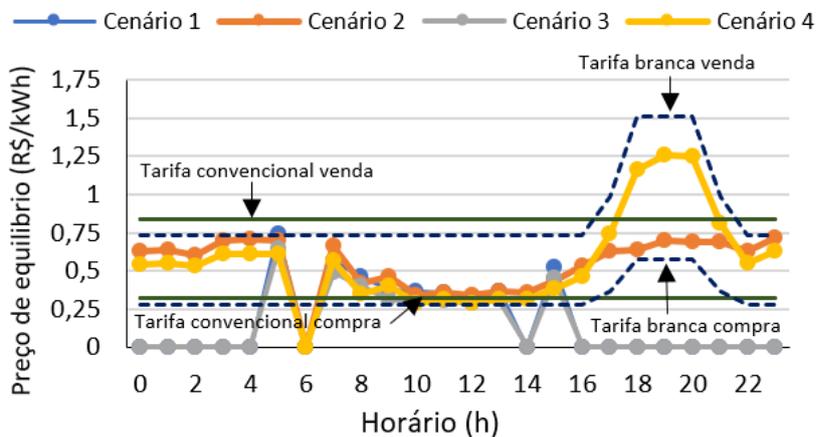
Fonte: AUTOR.

Para os cenários com armazenamento (2 e 4), ao invés de dar uma única oferta de compra ou de venda de energia, a UC 5 faz um conjunto de ofertas que variam em tipo (compra ou venda) e em valor para cada caso comparativo conforme foi explicado no Capítulo 2 na Tabela 2.3. O Apêndice A apresenta o conjunto de preços previstos pela UC 5 para cada hora do dia e para cada modalidade de tarifa baseando-se nessa tabela. As quantidades de energia e os preços que compuseram as ofertas enviadas por cada agente para o leilão de cada hora do dia 12/08/2014 para cada modalidade de tarifa podem ser encontrados na Tabela Apêndice B. Os preços ofertados no Apêndice B para a UC 5 são para os cenários sem armazenamento.

4.2 Resultados dos leilões

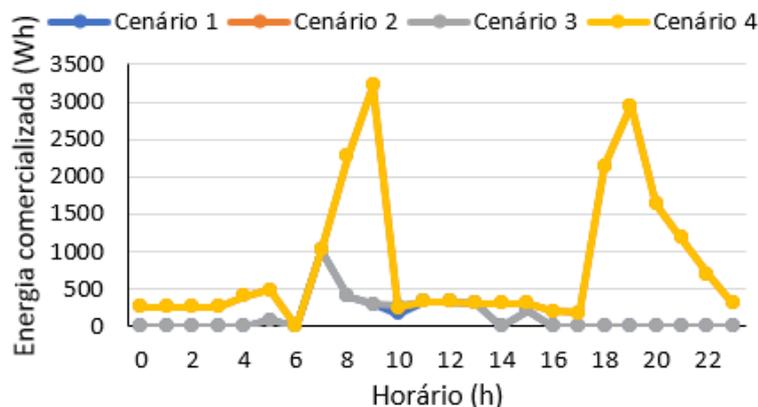
Após simuladas as comercializações de energia entre os integrantes da microrrede por intermédio de um leilão duplo para o período de 1 dia no Matlab, obteve-se o preço de equilíbrio do leilão e a energia comercializada pelos agentes das UCs para cada hora para os 5 cenários propostos, conforme pode ser observado na Figura 4.4 e na Figura 4.5, respectivamente.

Figura 4.4 - Preço de equilíbrio do leilão por hora e por cenário para o dia simulado



Fonte: AUTOR.

Figura 4.5 - Energia comercializada pelos agentes no leilão por hora e por cenário para o dia simulado

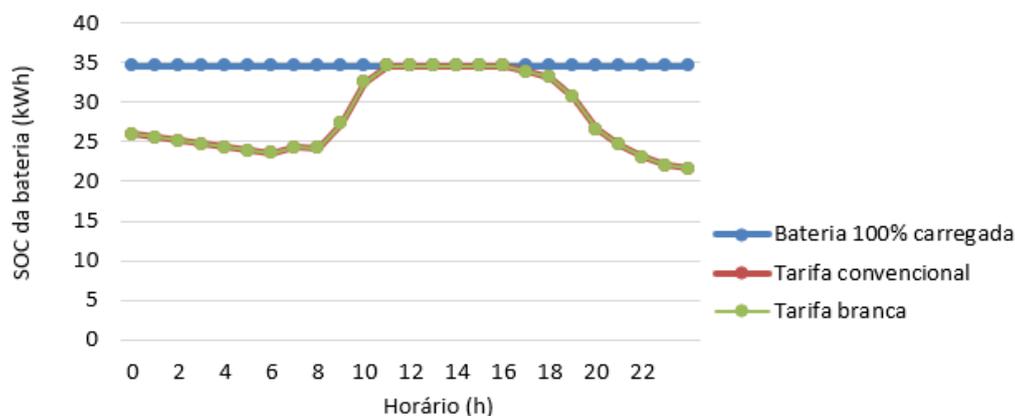


Fonte: AUTOR.

Foi possível observar nos resultados apresentados na Figura 4.4 e na Figura 4.5 que para os cenários sem armazenamento (1 e 3), a tarifa não influenciou significativamente no preço de equilíbrio nem na energia comercializada. Isso ocorreu devido ao fato de as comercializações só acontecerem durante o período do dia em que há geração, assim na hora da ponta e à noite não ocorreram leilões e as comercializações foram realizadas com a concessionária como se fosse um cenário sem leilão. Foi possível também observar que nesses cenários, a quantidade de energia comercializada é menor assim como os valores correspondentes ao preço de equilíbrio devido ao período mais restrito de comercialização imposto pela disponibilidade de energia para venda pelas UCs prosumidores e pelos critérios adotados para definição do preço de compra e de venda da energia de acordo com a oferta e a demanda. Para os cenários com armazenamento (2 e 4), como existia a possibilidade de armazenamento à noite e de o agente entusiasta comercializar energia em todas as horas do dia, percebeu-se que a quantidade de energia comercializada foi maior que para os casos sem armazenamento. A utilização da tarifa branca ou convencional também não influenciou significativamente na quantidade comercializada desses cenários. Entretanto, observou-se que a escolha da tarifa influencia no preço de equilíbrio, sendo pelo menos 1,7 vezes maior no período de ponta, beneficiando as unidades prosumidoras que venderam energia nesse horário. Também foi possível observar que ter um agente entusiasta com tarifa branca na microrrede permite que o preço de equilíbrio seja mais barato no período fora ponta, devido ao preço de venda de energia pela concessionária, utilizado como referência para definição do preço a ser ofertado no leilão, ser menor que para a tarifa convencional, beneficiando também as unidades consumidoras que compraram energia no leilão durante esse período. O Apêndice B apresenta o resultado do leilão para cada cenário.

A Figura 4.6 apresenta o estado da carga (SOC) da bateria para cada hora do dia simulado para os cenários com armazenamento (2 e 4).

Figura 4.6 - SOC da bateria da UC 5 durante o dia simulado



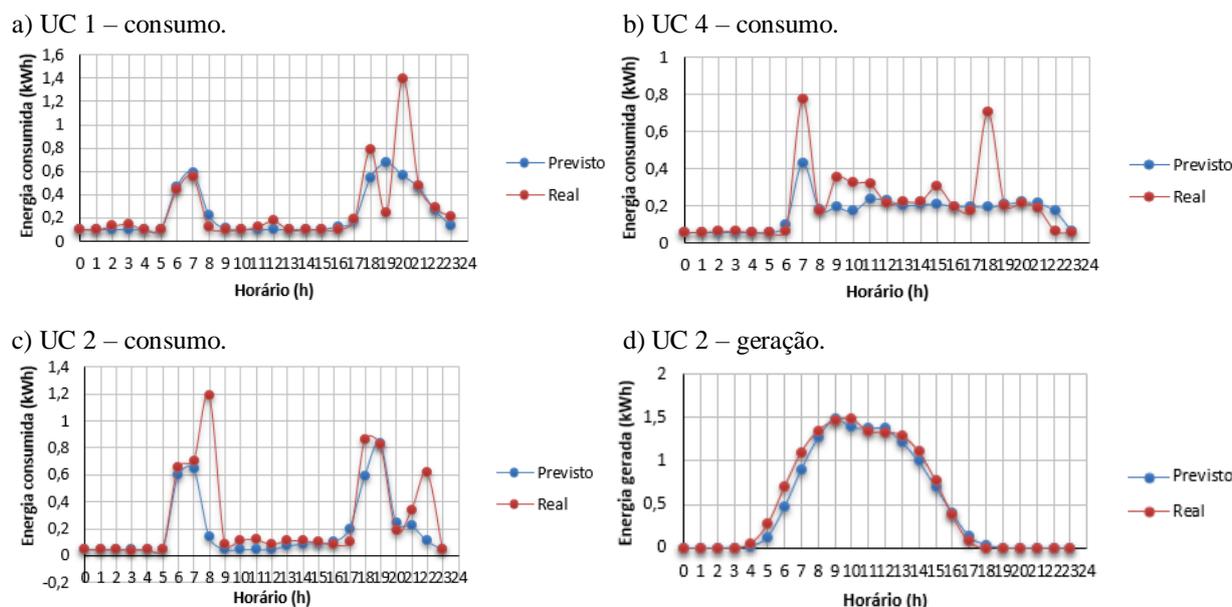
Fonte: AUTOR.

Como foi possível observar na Figura 4.6, a mudança de tarifa não influenciou no comportamento da bateria, visto que foram utilizados os mesmos critérios de aleatoriedade para definição dos preços a serem ofertados a partir dessas tarifas. Foi considerado para simulação que quando o dia 12/08/2014 iniciou às 0h, a bateria estava com um SOC de 50% da sua carga útil equivalente a uma carga de 25,92 kWh, lembrando que ela possui uma profundidade de descarga máxima de 50%. Às 0h, a UC 5 só podia comprar energia da concessionária ou vender para as outras unidades consumidoras visto que era a única com armazenamento na microrrede analisada. Dessa forma, como possuía ainda 50% da sua carga útil disponível para venda, a bateria descarregou nas primeiras horas do leilão, vendendo energia para as outras unidades consumidoras. No horário em que a geração começou a ser mais significativa (aproximadamente às 9h), o agente da UC 5 começou a comprar energia no leilão para carregar sua bateria, visto que durante o período do dia em que havia geração, existiam mais vendedores no leilão, pois os agentes prosumidores também vendiam energia, o que levava a concorrência a ser maior e o preço para comprar energia mais barato do que o preço da concessionária. A bateria carregou-se até o meio-dia e ficou 100% carregada até às 16h, o que foi explicado pelo fato da energia gerada pelo sistema fotovoltaico ser significativamente maior do que o consumo, suprimindo toda demanda de venda de energia do leilão, não sendo necessário descarregar a bateria. A partir das 17h, horário no qual a geração de energia praticamente se encerrou e os agentes prosumidores pararam de vender energia, a bateria começou a ser descarregada novamente. Como o horário de ponta se inicia às 18h e nesse período normalmente temos as maiores demandas de consumos do dia na microrrede, a bateria se descarregou mais rapidamente durante esse período, pois vendeu uma quantidade de energia maior no leilão. Após esse período, as pessoas começaram a dormir e o consumo diminuiu, a bateria continuou vendendo energia, mas uma quantidade menor devido à redução do consumo.

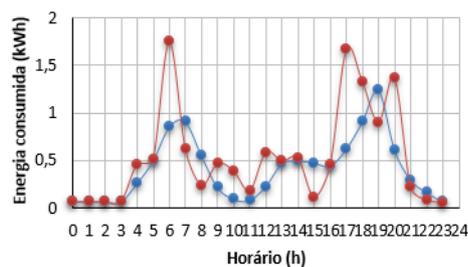
4.3 Liquidação das diferenças de energia

Após a realização do leilão de cada hora do dia, foi realizado o ajuste das diferenças entre o que foi contratado financeiramente no leilão baseado no consumo e geração previstos e as trocas de energia que realmente ocorreram de acordo com o consumo e a geração reais para o dia 12/08/2014. A Figura 4.7 apresenta uma comparação entre o consumo previsto e o consumo real para cada UC assim como uma comparação entre a geração prevista e a geração real para as UCs prosumidoras.

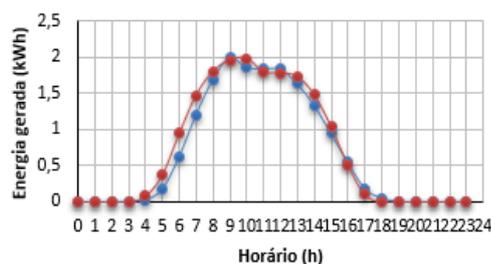
Figura 4.7 - Comparação entre energia prevista e real para cada UC



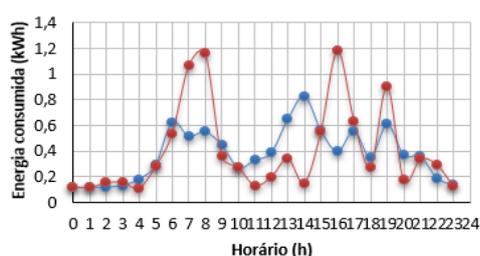
e) UC 3 – consumo.



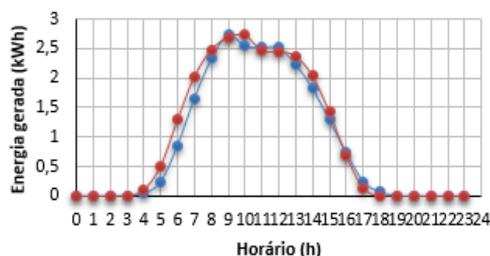
f) UC 3 – geração.



g) UC 5 – consumo.



h) UC 5 – geração.



Fonte: AUTOR.

Para as unidades consumidoras tradicionais (UC 1 e UC 4), representadas na Figura 4.7a e Figura 4.7b, foi possível observar que o consumo previsto e o real foi bem similar, exceto para os horários com picos de consumo. A UC 2 também apresentou essa diferença similar a Figura 4.7c. Já as UC 3 e UC 5 (Figura 4.7e e Figura 4.7g respectivamente) apresentaram uma diferença mais significativa entre o consumo previsto e real, apresentando valores reais de consumo geralmente maiores do que os previstos. Durante a noite, período no qual o consumo é bem menor, essas UCs apresentaram uma diferença entre o consumo real e previsto similar. Foi possível também observar que em todas as comparações realizadas para o consumo, o consumo real normalmente foi maior do que o previsto, o que significou que o previsor na maioria dos casos errou o consumo para um valor menor do que o consumo real. Isso faz com que as UCs somente tenham que comprar a diferença do seu consumo da concessionária, sendo melhor do que ter que comprar da concessionária para suprir a demanda do contrato firmado se o previsor errasse para um valor maior. Analisando as comparações entre a geração prevista e a real das UC 2, UC 3 e UC 5 na Figura 4.7d, na Figura 4.7f e na Figura 4.7h respectivamente, notou-se que em todas a diferença foi bem pequena, o que significa que os valores considerados como previstos foram bem próximos aos valores considerados como reais.

4.4 Comparação entre cenários

A Tabela 4.1 apresenta as quantidades de energia vendidas ou compradas por cada UC durante o dia simulado para cada cenário. Como no cenário 0 não há leilão, toda energia foi comercializada com a concessionária. Para os cenários com leilão e sem armazenamento (1 e 3), notou-se que, para todas as UCs, a maior parte da energia foi comercializada com a concessionária e não no leilão. Isso pode ser explicado pelo fato de a energia só ser comercializada no leilão durante as horas do dia em que há geração. Foi possível observar que para os cenários com leilão e com armazenamento (2 e 4), a quantidade de energia comercializada no leilão foi sempre maior do que para os cenários sem armazenamento. Isso ocorre devido ao fato da bateria também poder comercializar energia durante a noite, o que permite que haja leilões durante praticamente todas as horas do dia. Também observou-se que a modalidade da tarifa praticamente não influenciou nas quantidades de energia comercializadas. Isso ocorreu pois para definir os preços a serem ofertados a partir de cada tarifa, multiplicou-se os preços de cada modalidade pelos mesmos fatores aleatórios nas equações da Tabela 2.2, o que fez com que os preços de equilíbrio da tarifa branca fossem proporcionalmente maiores aos preços da tarifa convencional. Isso também explica porque as quantidades de energia comercializadas nos cenários 2 e 4 foram iguais e porque as quantidades de energia comercializadas nos cenários 1 e 3 foram bem parecidas. Apesar da diferença entre os preços de equilíbrio serem proporcionais, observou-se algumas diferenças

entre os valores dos cenários 1 e 3 na energia comprada no leilão pelas UC 1, UC 3 e UC 5. Isso ocorre pois quando definiu-se o preço a ser ofertado no leilão utilizando as equações apresentadas na Tabela 2.2, a multiplicação pelo fator aleatório resultou em um preço a ser ofertado com várias casas decimais. Foi definido que esse preço seria arredondado para o preço por kWh com duas casas decimais mais próximo. Assim, para algumas horas, esse arredondamento permitiu que mais ofertas entrassem no leilão com a tarifa branca, resultando nas pequenas diferenças que são apresentadas entre os cenários 1 e 3.

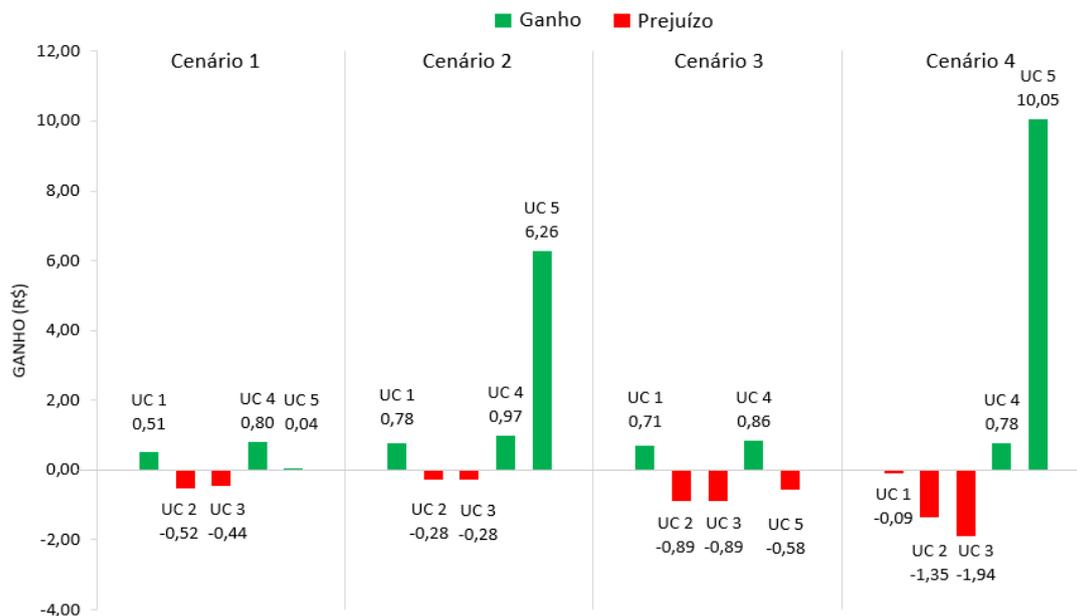
Tabela 4.1- Resumo das comercializações de energia ocorridas para cada cenário para dia simulado.

UC	Com quem comercializa?	Resultado total	Energia (kWh) comercializada para cada cenário				
			0	1	2	3	4
1	Leilão	Compra	-	-1,209	-4,783	-1,308	-4,783
		Venda	-	0	0	0	0
	Concessionária	Compra	-6,257	-5,048	-1,474	-4,949	-1,474
		Venda	-	0	0	0	0
2	Leilão	Compra	-	0	-2,195	0	-2,195
		Venda	-	0,625	2,905	0,625	2,905
	Concessionária	Compra	-3,065	-3,065	-0,870	-3,065	-0,870
		Venda	9,264	8,639	6,359	8,639	6,359
3	Leilão	Compra	-	-0,087	-4,026	-0,034	-4,026
		Venda	-	0,636	3,553	0,636	3,553
	Concessionária	Compra	-7,124	-7,037	-3,098	-7,090	-3,098
		Venda	11,463	10,827	7,910	10,827	7,910
4	Leilão	Compra	-	-1,847	-3,470	-1,847	-3,470
		Venda	-	0	0	0	0
	Concessionária	Compra	-5,124	-3,277	-1,654	-3,277	-1,654
		Venda	-	0	0	0	0
5	Leilão	Compra	-	0	-5,095	-0,053	-5,095
		Venda	-	1,882	13,111	1,981	13,111
	Concessionária	Compra	-3,603	-3,603	0	-3,550	0
		Venda	17,417	15,535	8,824	15,436	8,824

Fonte: Autor.

Para cada cenário, foi realizada uma comparação entre a economia obtida pelos compradores e o lucro obtido pelos vendedores em relação aos valores que seriam pagos ou recebidos se a comercialização fosse realizada somente com a concessionária e sem leilão, como é feito hoje. Essa comparação foi realizada para avaliar a influência do leilão, do armazenamento e da modalidade da tarifa da concessionária utilizada como referência para as comercializações e os benefícios que estes podem trazer para comercializações realizadas por intermédio de um leilão duplo entre consumidores e prosumidores. Os resultados dessa comparação estão apresentados na Figura 4.8. Essa figura mostra o ganho financeiro (economia ou o lucro) acumulado no final do dia 12/08/2014 por cada unidade consumidora proveniente dos leilões realizados nesse dia para cada cenário. Esse ganho foi calculado fazendo a diferença entre a fatura de eletricidade que seria paga para esse dia para o cenário 0 (sem leilão, tarifa convencional e sem armazenamento) e a que seria paga para cada um dos cenários.

Figura 4.8 - Ganho financeiro obtido com a comercialização no leilão por UC para cada cenário para o dia 12/08/2014



Fonte: AUTOR.

Foi possível observar que o leilão trouxe ganhos financeiros para algumas unidades consumidoras e prejuízo para outras. Isso ocorre devido à diferença entre as quantidades de energia que foram previstas nos contratos do leilão e as quantidades de energia reais. Como as previsões das UC 1 e UC 4 foram mais exatas, essas unidades tiveram ganhos em praticamente todos os casos. Também foi possível observar que, para os cenários 2 e 4, a existência do armazenamento na UC 5 influenciou fortemente nos ganhos dessa UC, devido sua possibilidade de vender energia praticamente em todas as horas do dia. É importante notar que o sistema de controle do armazenamento de energia permite que a bateria carregue e descarregue conforme o resultado do leilão, assim não há uma diferença entre o valor de energia contratado e o valor de energia real, o que também aumentou os ganhos da UC 5 nos cenários com armazenamento. Para o cenário 4, com armazenamento e tarifa branca, a UC 5 teve um ganho de aproximadamente R\$10,00 para o dia simulado. As UCs com geração, sem armazenamento e com maiores desvios em relação às previsões apresentaram prejuízo em sua participação no leilão devido à qualidade dos seus previsores. Observou-se também que, apesar da modalidade da tarifa influenciar menos nos ganhos que o sistema de armazenamento, ela também influenciou. Como ambas modalidades de tarifas foram multiplicadas pelo mesmo fator aleatório para definir as ofertas dos agentes no leilão, notou-se que os cenários com tarifa branca só aumentaram ou diminuíram os ganhos ou prejuízos devido a variação do valor da tarifa ao longo do dia.

5 CONCLUSÃO

Atualmente, o gerenciamento de energia inteligente é feito de forma desconectada, por exemplo, uma casa inteligente tenta aprimorar o seu uso de energia enquanto o operador do sistema de distribuição tenta prever e gerenciar a energia do bairro. Não existe uma cooperação ou troca de informações em tempo real entre a casa e o operador. Em futuras cidades inteligentes, espera-se que os bairros sejam mais autônomos e, portanto, capazes de gerenciar de forma mais eficiente e dinâmica seus recursos energéticos, levando em conta os recursos locais e as necessidades das partes interessadas. Considerando esses pontos, o presente trabalho teve como objetivo geral propor uma estrutura de comercialização de energia entre consumidores e prosumidores de uma microrrede por intermédio de um leilão duplo com uma hora de antecedência.

A partir das referências bibliográficas citadas e do trabalho desenvolvido, notou-se que a atratividade da solução proposta depende da alta penetração de novas tecnologias de comunicação e automação no lado do consumidor, da interface entre essas tecnologias e os usuários, da adoção de

sistemas, como o de armazenamento e o de geração e da proposição de novas políticas energéticas. É importante salientar que a estrutura de comercialização proposta não considerou o atual sistema elétrico brasileiro, no qual o sistema de distribuição de energia ainda é um monopólio e consumidores com geração participam do sistema de compensação de energia, que permite que a concessionária “armazene” energia na rede elétrica sem custo, visto que toda energia gerada é injetada na rede. Nesse sistema, 1 kWh consumido possui o mesmo valor que 1 kWh produzido. A produção compensa o consumo sem considerar os custos referentes à transmissão do Fio A e do Fio B, as perdas de energia, os encargos da TUSD e da tarifa de energia. Atualmente, as regras do sistema de compensação estão sendo revisadas e 5 alternativas estão sendo consideradas. Essas alternativas possibilitariam novos modelos de negócio, como o da estrutura de comercialização proposta, pois 1 kWh consumido deixaria de ter o mesmo valor que 1 kWh produzido, reduzindo o valor da tarifa de compra de energia pela concessionária e o tornando diferente do valor da tarifa de venda de energia, possibilitando que as unidades consumidoras enviem ofertas que estejam entre esses valores.

Para demonstrar a viabilidade da abordagem proposta, a comercialização entre os agentes foi avaliada através da simulação de uma microrrede em um algoritmo desenvolvido no Matlab. A simulação realizada teve como objetivos específicos ilustrar o funcionamento da estrutura proposta e avaliar os benefícios aportados por ela pelo lado da concessionária e pelo lado do consumidor. Para isso, foram propostos 5 cenários, nos quais foram analisados a influência da adoção do leilão, de sistemas de armazenamento por prosumidores e da adoção de cada modalidade de tarifa da concessionária (convencional ou branca), que foi utilizada como referência para a definição das ofertas enviadas para o leilão.

Observou-se que a estrutura proposta pode contribuir para um melhor gerenciamento do consumo utilizando o preço e as interações de mercado para conscientizar o consumo. Além disso, ela também permite uma melhor utilização dos recursos energéticos locais. No geral, os resultados apresentaram sinais econômicos interessantes. A implementação dessa estrutura pode incentivar a instalação de sistemas de geração e sistemas de armazenamento nas unidades consumidoras, visto que com os ganhos financeiros que podem ser obtidos a partir das comercializações nos leilões seria possível reduzir o *payback* dos investimentos realizados. A adoção da tarifa branca também poderia ser incentivada com essa estrutura, pois aumentaria os ganhos dos agentes, porém só seria aconselhado implementá-la com um previsor muito bom ou com um sistema de automação que permitisse controlar o consumo, visto que também poderia aumentar o prejuízo no ajuste financeiro.

Concluiu-se a partir dos resultados apresentados que a estrutura de comercialização proposta poderia ser considerada como um modelo interessante para descentralização do mercado de energia do sistema de distribuição, visto que ela apresentou benefícios tanto para os consumidores quanto para a concessionária. Os consumidores se beneficiaram pelo fato de poderem decidir como querem comprar, vender ou armazenar sua energia. As interações no leilão de um modo geral trouxeram ganhos financeiros interessantes para as unidades consumidoras, exceto para os casos nos quais a energia real consumida ou gerada teve um desvio significativo do valor que havia sido previsto pelas transações financeiras do leilão. Os ganhos apresentados para as unidades consumidoras poderiam ser melhorados, aperfeiçoando a inteligência do previsor do agente. A utilização de controladores de carga e de novas tecnologias de gerenciamento da demanda também poderiam contribuir para melhoria dos ganhos das UCs, visto que quanto menor é a diferença entre a energia prevista e a real, maior é o ganho financeiro. Isso ocorre pois não seria mais necessário realizar o ajuste financeiro com a concessionária, visto que a energia prevista e a real seriam praticamente as mesmas.

A concessionária também se beneficia da estrutura de comercialização proposta, visto que mesmo com a descentralização do mercado, ela ainda teria uma participação importante, suprindo a demanda das unidades consumidoras que ficaram de fora do leilão e realizando o ajuste financeiro entre a energia que foi prevista e a real. Dessa forma, ela ofereceria um novo tipo de serviço, pois as transações do leilão são somente financeiras e as outras trocas de energia são feitas por intermédio de sua rede elétrica. Ela também não correria o risco de ter seu papel excluído por um novo modelo de negócio que não a considera. Por fim, para possibilitar a implementação da estrutura, além das unidades consumidoras e da concessionária, ainda seria necessário ter uma terceira parte interessada para realizar o leilão, que nesse trabalho foi definido como uma plataforma digital de leilão. O modelo de negócio utilizado para

rentabilizar essa plataforma seria uma proposta interessante para um trabalho futuro, assim como o desenvolvimento da inteligência de um bom previsor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKTER, M. N.; MAHMUD, M.A.; Oo, A.M.T. A Hierarchical Transactive Energy Management System for Energy Sharing in Residential Microgrids. **Energies**, vol.10, n.12, Dez. 2017.
- AKTER, M. N.; MAHMUD, M.A.; Oo, A.M.T. A hierarchical transactive energy management system for microgrids. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2016, Boston, MA, p.1-5. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/7741099>>. Acesso em: Abril 2019.
- AMIN, U *et al.* Cost-Benefit Analysis for Proactive Consumers in a Microgrid for Transactive Energy Management Systems. In: Australasian Universities Power Engineering Conference, 2016, Brisbane, QLD. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/7749343>>. Acesso em: Abril 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída – Resolução Normativa nº 482/2012. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: Outubro 2019.
- CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. The Institution of Engineering and Technology, 1ª edição, 2009.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA - CEEE. Tarifas e Custos dos Serviços. Disponível em: <<http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx>>. Acesso em: Setembro 2019.
- CHANGE 38. People. Energize. Power. Disponível em: <pep.energy>. Acesso em: Julho 2019.
- FERRAZ, B.M.P. **Programa de Resposta à Demanda baseado em Preços aplicado a Consumidores de Baixa Tensão**. 2016. Tese – (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- SOLARGIS. Global Solar Atlas. Disponível em: < <https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em: Setembro 2019.
- HSG. D2.2 Ideal-type business models in local smart grids. **Empower H2020 project**. Disponível em: <<http://empowerh2020.eu/>>. Acesso em: jul. 2019.
- KAHROBAEE, S. *et al.* A Multiagent Modeling and Investigation of Smart Homes with Power Generation, Storage and Trading Features. **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol.4, n.2, p.659-668, Jun. 2013.
- KIRSCHEN, S.D.; STRBAC, G. **Fundamentals of Power Systems Economics**. John Wiley & Sons, Ltd., 1ª edição, 2004.
- LO3 ENERGY. Reshaping the energy future. Disponível em: <<https://lo3energy.com/>>. Acesso em: Julho 2019.
- MENGELKAMP, E. *et al.* Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. **Applied Energy**, v.210, p.870-880, Jan. 2018.
- PARK, C.; YONG, T. Comparative review and discussion on P2P electricity trading. **Energy Procedia**, vol. 128, p.3-9, Set. 2017.
- ROCK PAPER SUN. Solar Electric (PV) Output at Optimal Array Tilt Angle. Disponível em: < <http://www.rockpapersun.com>>. Acesso em: Setembro 2019.
- SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. Performance Ratio. Disponível em: < <https://www.sma.de>>. Acesso em: Setembro 2019.
- SONNEN. Juntos, reduza os custos de eletricidade. Disponível em: <<https://sonnen.de/>>. Acesso em: Julho 2019.
- VANDEBRON. 100% de Energia Renovável nos Países Baixos. Disponível em: <<https://vandebron.nl/>>. Acesso em: Julho 2019.

WANG, Y. *et al.* A Game-Theoretic Approach to Energy Trading in the Smart Grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v.5, n.3, p.1439-1450, Abr. 2014.

ZHANG, C. *et al.* Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects. **Energy Procedia**, vol. 105, p.2563-2568, Mai. 2017.

ZHANG, C. *et al.* Peer-to-Peer Energy Trading in a Microgrid. **Applied Energy**, v.220, p.1-12, Jun. 2018.

APÊNDICE A – Conjunto de preços previstos para serem ofertados no leilão pela UC 5 para cada hora do dia e para cada modalidade de tarifa para os cenários com armazenamento

Hora do Leilão	Conjunto a ser ofertado no leilão	Tipo da oferta	Ofertas para tarifa convencional		Ofertas para tarifa branca	
			Preço (R\$/kWh)	Energia (kWh)	Preço (R\$/kWh)	Energia (kWh)
0	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,49	0,114	0,43	0,114
		Compra barato	0,34	8,640	0,29	8,640
		Vende caro	0,53	8,526	0,46	8,526
1	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,50	0,115	0,44	0,115
		Compra barato	0,35	9,039	0,30	9,039
		Vende caro	0,55	8,126	0,47	8,126
2	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,45	0,115	0,39	0,115
		Compra barato	0,32	9,436	0,28	9,436
		Vende caro	0,46	7,729	0,40	7,729
3	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,63	0,124	0,55	0,124
		Compra barato	0,41	9,872	0,36	9,872
		Vende caro	0,69	7,284	0,60	7,284
4	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,63	0,137	0,55	0,137
		Compra barato	0,41	10,304	0,36	10,304
		Vende caro	0,69	6,839	0,59	6,839
5	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,61	0,053	0,53	0,053
		Compra barato	0,40	10,732	0,35	10,732
		Vende caro	0,67	6,496	0,58	6,496
6	2	-	-	-	-	-
		Vende médio	0,55	0,236	0,48	0,236
		Vende caro	0,76	6,286	0,66	6,286
		Compra médio	0,49	10,759	0,43	10,759
7	2	-	-	-	-	-
		Vende médio	0,56	1,144	0,49	1,144
		Vende caro	0,77	7,006	0,66	7,006
		Compra médio	0,50	9,130	0,43	9,130
8	2	-	-	-	-	-
		Vende médio	0,46	1,778	0,39	1,778
		Vende caro	0,71	6,947	0,62	6,947
		Compra médio	0,45	8,556	0,38	8,556
9	2	-	-	-	-	-
		Vende médio	0,52	2,294	0,45	2,294
		Vende caro	0,75	9,971	0,65	9,971
		Compra médio	0,47	5,015	0,41	5,015
10	1	Vende barato	0,34	0,246	0,29	0,246
		Vende médio	0,48	2,040	0,42	2,040
		Vende caro	0,73	15,241	0,63	15,241
		-	-	-	-	-
11	1	Vende barato	0,43	2,207	0,37	2,207
		Vende médio	0,66	0	0,58	0
		Vende caro	0,82	17,280	0,71	17,280
		-	-	-	-	-

Hora do Leilão	Conjunto a ser ofertado no leilão	Tipo da oferta	Ofertas para tarifa convencional		Ofertas para tarifa branca	
			Preço (R\$/kWh)	Energia (kWh)	Preço (R\$/kWh)	Energia (kWh)
12	1	Vende barato	0,37	2,135	0,32	2,135
		Vende médio	0,56	0	0,48	0
		Vende caro	0,76	17,280	0,66	17,280
		-	-	-	-	-
13	1	Vende barato	0,37	1,596	0,32	1,596
		Vende médio	0,55	0	0,48	0
		Vende caro	0,76	17,280	0,66	17,280
		-	-	-	-	-
14	1	Vende barato	0,33	1,011	0,29	1,011
		Vende médio	0,47	0	0,41	0
		Vende caro	0,72	17,280	0,62	17,280
		-	-	-	-	-
15	1	Vende barato	0,43	0,736	0,37	0,736
		Vende médio	0,67	0	0,58	0
		Vende caro	0,82	17,280	0,71	17,280
		-	-	-	-	-
16	1	Vende barato	0,37	0,355	0,32	0,355
		Vende médio	0,54	0	0,47	0
		Vende caro	0,76	17,280	0,66	17,280
		-	-	-	-	-
17	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,56	0,306	0,65	0,306
		Compra barato	0,37	0,712	0,44	0,712
		Vende caro	0,62	16,263	0,73	16,263
18	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,49	0,276	0,88	0,276
		Compra barato	0,34	1,411	0,61	1,411
		Vende caro	0,53	15,593	0,95	15,593
19	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,59	0,601	1,06	0,601
		Compra barato	0,39	3,960	0,70	3,960
		Vende caro	0,66	12,719	1,18	12,719
20	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,59	0,364	1,06	0,364
		Compra barato	0,39	8,010	0,70	8,010
		Vende caro	0,65	8,905	1,18	8,905
21	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,59	0,357	0,70	0,357
		Compra barato	0,39	9,915	0,46	9,914
		Vende caro	0,66	7,008	0,77	7,008
22	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,49	0,186	0,42	0,186
		Compra barato	0,34	11,518	0,29	11,518
		Vende caro	0,52	5,575	0,45	5,575
23	4	-	-	-	-	-
		Compra médio	0,70	0,132	0,61	0,132
		Compra barato	0,45	12,567	0,39	12,567
		Vende caro	0,71	4,580	0,62	4,580

APÊNDICE B – Ofertas enviadas por cada agente para o leilão de cada hora do dia 12/08/2014

h	UC 1			UC 2			UC3			UC 4			UC 5		
	E kWh	C R\$/ kWh	B R\$/ kWh												
0	-0,10	0,79	0,69	-0,04	0,76	0,67	-0,06	0,72	0,63	-0,06	0,72	0,62	-0,11	0,81	0,71
1	-0,10	0,76	0,66	-0,04	0,72	0,63	-0,06	0,79	0,70	-0,06	0,81	0,71	-0,11	0,80	0,70
2	-0,10	0,74	0,65	-0,04	0,81	0,71	-0,06	0,79	0,69	-0,06	0,79	0,69	-0,11	0,83	0,73
3	-0,10	0,78	0,68	-0,04	0,80	0,70	-0,06	0,71	0,62	-0,06	0,82	0,72	-0,12	0,74	0,65
4	-0,10	0,72	0,63	-0,02	0,80	0,70	-0,22	0,77	0,67	-0,06	0,73	0,64	-0,14	0,74	0,65
5	-0,10	0,73	0,63	0,09	0,74	0,65	-0,32	0,75	0,65	-0,06	0,75	0,65	-0,05	0,75	0,66
6	-0,47	0,51	0,44	-0,12	0,35	0,29	-0,22	0,54	0,47	-0,10	0,34	0,29	0,23	0,78	0,68
7	-0,59	0,75	0,65	0,26	0,73	0,64	0,29	0,73	0,64	-0,43	0,78	0,68	1,14	0,38	0,33
8	-0,22	0,60	0,52	1,13	0,38	0,32	1,14	0,35	0,30	-0,18	0,69	0,60	1,78	0,33	0,28
9	-0,11	0,39	0,33	1,45	0,44	0,38	1,78	0,45	0,38	-0,19	0,38	0,32	2,29	0,37	0,31
10	-0,10	0,34	0,29	1,35	0,42	0,36	1,77	0,45	0,38	-0,17	0,38	0,32	2,29	0,35	0,29
11	-0,10	0,43	0,37	1,34	0,42	0,36	1,77	0,33	0,28	-0,24	0,39	0,33	2,21	0,43	0,37
12	-0,10	0,34	0,29	1,33	0,33	0,28	1,61	0,35	0,30	-0,23	0,44	0,38	2,14	0,38	0,32
13	-0,10	0,41	0,35	1,15	0,43	0,37	1,16	0,34	0,29	-0,20	0,39	0,33	1,60	0,38	0,32
14	-0,10	0,42	0,36	0,92	0,53	0,46	0,84	0,46	0,39	-0,21	0,38	0,32	1,01	0,47	0,41
15	-0,10	0,45	0,39	0,61	0,50	0,43	0,47	0,60	0,52	-0,21	0,55	0,47	0,74	0,67	0,58
16	-0,12	0,35	0,29	0,31	0,80	0,70	0,10	0,74	0,64	-0,20	0,68	0,59	0,35	0,78	0,69
17	-0,18	0,63	0,74	-0,06	0,36	0,42	-0,44	0,47	0,54	-0,20	0,59	0,69	-0,31	0,56	0,65
18	-0,54	0,76	1,38	-0,55	0,75	1,37	-0,86	0,76	1,38	-0,19	0,76	1,38	-0,28	0,81	1,48
19	-0,67	0,77	1,41	-0,83	0,80	1,45	-1,24	0,75	1,36	-0,21	0,74	1,34	-0,60	0,76	1,39
20	-0,56	0,78	1,42	-0,24	0,74	1,34	-0,61	0,72	1,31	-0,22	0,80	1,46	-0,36	0,76	1,39
21	-0,46	0,80	0,94	-0,22	0,71	0,84	-0,29	0,78	0,92	-0,21	0,80	0,95	-0,36	0,76	0,90
22	-0,26	0,78	0,68	-0,11	0,73	0,64	-0,16	0,76	0,66	-0,17	0,83	0,73	-0,19	0,81	0,71
23	-0,14	0,72	0,63	-0,05	0,78	0,68	-0,06	0,77	0,67	-0,06	0,80	0,70	-0,13	0,71	0,62

E: Energia (kWh). Sinal negativo (-) representa um déficit de energia que equivale a uma oferta compradora. Sinal positivo (+) representa um excesso de energia que equivale a uma oferta vendedora.

C: Tarifa Convencional (R\$/kWh)

B: Tarifa Branca (R\$/kWh)

h: hora do leilão

APÊNDICE C – Resultado do leilão para cada cenário para cada hora.

Cenário	1				3			
	Comprador	Vendedor	Energia negociada (kWh)	Preço de equilíbrio (R\$/kWh)	Comprador	Vendedor	Energia negociada (kWh)	Preço de equilíbrio (R\$/kWh)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	3	2	0,870	0,75	3	2	0,340	0,65
					5	2	0,530	0,65
6	-	-	-	-	-	-	-	
7	4	5	0,429	0,57	4	5	0,429	0,49
	1	5	0,586	0,57	1	5	0,586	0,49
8	4	5	0,180	0,47	4	5	0,180	0,40
	1	5	0,220	0,47	1	5	0,220	0,40
9	4	5	0,191	0,38	4	5	0,191	0,32
	1	5	0,106	0,38	1	5	0,106	0,32
10	4	5	0,170	0,37	4	5	0,170	0,29
					1	5	0,990	0,29
11	4	3	0,235	0,36	4	3	0,235	0,31
	1	3	0,990	0,36	1	3	0,990	0,31
12	4	2	0,228	0,34	4	2	0,228	0,29
	1	2	0,990	0,34	1	2	0,990	0,29
13	4	3	0,203	0,37	4	3	0,203	0,31
	1	3	0,990	0,37	1	3	0,990	0,31
14	-	-	-	-	-	-	-	-
15	4	2	0,211	0,53	4	2	0,211	0,45
16	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-
Cenário	2				4			
0	2	5	0,440	0,63	2	5	0,440	0,54
	3	5	0,630	0,63	3	5	0,630	0,54
	4	5	0,580	0,63	4	5	0,580	0,54
	1	5	0,100	0,63	1	5	0,100	0,54
1	2	5	0,430	0,64	2	5	0,430	0,55
	3	5	0,630	0,64	3	5	0,630	0,55
	4	5	0,580	0,64	4	5	0,580	0,55
	1	5	0,990	0,64	1	5	0,990	0,55
2	2	5	0,430	0,60	2	5	0,430	0,53
	3	5	0,630	0,60	3	5	0,630	0,53
	4	5	0,580	0,60	4	5	0,580	0,53
	1	5	0,100	0,60	1	5	0,100	0,53
3	2	5	0,400	0,70	2	5	0,400	0,61
	3	5	0,580	0,70	3	5	0,580	0,61
	4	5	0,580	0,70	4	5	0,580	0,61
	1	5	0,990	0,70	1	5	0,990	0,61
4	2	5	0,210	0,71	2	5	0,210	0,61
	3	5	0,229	0,71	3	5	0,229	0,61

Cenário	2				4			
	Comprador	Vendedor	Energia negociada (kWh)	Preço de equilíbrio (R\$/kWh)	Comprador	Vendedor	Energia negociada (kWh)	Preço de equilíbrio (R\$/kWh)
4	4	5	0,580	0,71	4	5	0,580	0,61
	1	5	0,980	0,71	1	5	0,980	0,61
5	3	5	0,322	0,70	3	5	0,322	0,61
	4	5	0,580	0,70	4	5	0,580	0,61
	1	5	0,990	0,70	1	5	0,99	0,61
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	4	5	0,429	0,66	4	5	0,429	0,57
	1	5	0,586	0,66	1	5	0,586	0,57
8	4	3	0,180	0,42	4	3	0,180	0,35
	5	2	1,132	0,42	5	2	0,1132	0,35
	5	3	0,741	0,42	5	3	0,741	0,35
	1	3	0,220	0,42	1	3	0,220	0,35
9	5	2	1,446	0,46	5	2	1,446	0,40
	5	3	1,776	0,46	5	3	1,776	0,40
10	4	5	0,170	0,34	4	5	0,170	0,29
	1	5	0,760	0,34	1	5	0,760	0,29
11	4	3	0,235	0,36	4	3	0,235	0,31
	1	3	0,990	0,36	1	3	0,990	0,31
12	4	2	0,228	0,34	4	2	0,228	0,29
	1	2	0,990	0,34	1	2	0,990	0,29
13	4	3	0,203	0,37	4	3	0,203	0,31
	1	3	0,990	0,37	1	3	0,990	0,31
14	4	5	0,207	0,36	4	5	0,207	0,31
	1	5	0,990	0,36	1	5	0,990	0,31
15	4	5	0,211	0,44	4	5	0,211	0,38
	1	5	0,101	0,44	1	5	0,101	0,38
16	4	5	0,197	0,53	4	5	0,197	0,46
17	1	5	0,176	0,63	1	5	0,176	0,74
18	2	5	0,554	0,64	2	5	0,554	1,16
	3	5	0,857	0,64	3	5	0,857	1,16
	4	5	0,191	0,64	4	5	0,191	1,16
	1	5	0,544	0,64	1	5	0,544	1,16
19	2	5	0,828	0,70	2	5	0,828	1,26
	3	5	1,238	0,70	3	5	0,1238	1,26
	4	5	0,208	0,70	4	5	0,208	1,26
	1	5	0,670	0,70	1	5	0,670	1,26
20	2	5	0,244	0,69	2	5	0,244	1,25
	3	5	0,613	0,69	3	5	0,613	1,25
	4	5	0,220	0,69	4	5	0,220	1,25
	1	5	0,562	0,69	1	5	0,562	1,25
21	2	5	0,223	0,69	2	5	0,223	0,81
	3	5	0,295	0,69	3	5	0,295	0,81
	4	5	0,211	0,69	4	5	0,211	0,81
	1	5	0,460	0,69	1	5	0,460	0,81
22	2	5	0,108	0,63	2	5	0,108	0,55
	3	5	0,162	0,63	3	5	0,162	0,55
	4	5	0,172	0,63	4	5	0,172	0,55
	1	5	0,261	0,63	1	5	0,261	0,55
23	2	5	0,470	0,72	2	5	0,470	0,63
	3	5	0,630	0,72	3	5	0,630	0,63
	4	5	0,600	0,72	4	5	0,600	0,63
	1	5	0,136	0,72	1	5	0,136	0,63