

Gerenciamento de Energia no Mercado Livre com Usinas Virtuais e Contratos Inteligentes via Blockchain

Arthur Coelho Estevão¹, Rodolfo S. Villaça¹,
Alysson Augusto P. Machado³, Rodrigo Fiorotti³, Helder Roberto de O. Rocha²

¹Depto de Informática (DI) – Univ. Federal do Espírito Santo (Ufes)

arthur.estevao@edu.ufes.br, rodolfo.villaca@ufes.br

²Depto de Engenharia Elétrica (DEL) – Univ. Federal do Espírito Santo (Ufes)

helder.rocha@ufes.br

³Inst. Federal do Espírito Santo (Ifes)

{alysson.machado, rodrigo.fiorotti}@ifes.edu.br

Abstract. This article proposes an energy management system for the free market that uses blockchain and smart contracts to mediate the interaction between prosumers, overcoming the limitations of the Electric Energy Compensation System (SCEE) — which currently prevents the transfer of surplus credits. The solution integrates Virtual Power Plants (VPPs), using tokens to represent energy credits, with a smart contract that automatically manages their purchase and sale. The system was simulated using real consumption data and photovoltaic generation. The implementation uses the Sepolia blockchain and Chainlink oracles to retrieve the energy tariffs used by utility companies. The results show that the system provides users with autonomy, cost reduction, and efficient management of energy resources.

Resumo. Este artigo propõe um sistema de gerenciamento de energia no mercado livre que utiliza blockchain e contratos inteligentes para intermediar a interação entre prosumidores, superando as limitações do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) — que atualmente impede a transferência de créditos excedentes. A solução integra Virtual Power Plants (VPP), utilizando tokens como representação de créditos energéticos, com um contrato inteligente que gerencia automaticamente sua compra e venda. O sistema foi simulado com dados reais de consumo e geração fotovoltaica. A implementação utiliza a blockchain Sepolia e oráculos Chainlink para obter as tarifas de energia usadas pelas concessionárias. Os resultados mostram que o sistema proporciona aos usuários: autonomia, redução de custos e uma gestão eficiente dos recursos energéticos.

1. Introdução

Historicamente, os *Synchronous Generators* (SG) têm sido a base dos sistemas de energia, impulsionados por recursos como carvão e gás natural. No entanto, as *Non-Synchronous Renewable Energy Sources* (NS-RES), como energia eólica e solar, estão transformando o setor elétrico. Essas tecnologias, juntamente com os *Distributed Energy Resources* (DER) e os *Battery Energy Storage Systems* (BESS), trazem desafios e oportunidades

des para a gestão da energia, exigindo soluções para integração e estabilidade das redes [El-Bidairi et al. 2020], tais como as *Virtual Power Plants* (VPP) [Saboori et al. 2011].

No Brasil, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), regulamentado pela RN 482/2012 da ANEEL, incentiva a geração distribuída ao permitir que consumidores injetem energia na rede para compensar seu consumo. Embora promova economia para prosumidores, o SCEE apresenta limitações, como a impossibilidade de transferir créditos excedentes e a dependência de tarifas elevadas do mercado cativo durante períodos de baixa geração.

Uma alternativa é o Mercado Livre de Energia, onde os prosumidores podem negociar diretamente com fornecedores, estabelecendo contratos personalizados. Esse modelo, aliado a tecnologias como *blockchain* e contratos inteligentes, pode descentralizar as transações, oferecendo maior flexibilidade, transparência e eficiência na gestão de créditos de energia. A *blockchain* é uma tecnologia de registro distribuído que garante segurança, imutabilidade e transparência nas transações, sendo ideal para aplicações que exigem confiança e rastreabilidade, como a comercialização de energia entre prosumidores. Ao eliminar intermediários e permitir transações diretas entre os participantes, a *blockchain* reduz custos e aumenta a eficiência do sistema.

Neste contexto, este artigo propõe uma solução *headless*, baseada em contratos inteligentes e *blockchain*, para o gerenciamento de créditos de energia entre prosumidores no mercado livre. A solução permite a compra e venda descentralizada de energia, com tarifas mais competitivas em comparação ao mercado tradicional. Para o desenvolvimento, foram utilizadas ferramentas como Solidity para contratos inteligentes, Python para simulação e análise de dados, Django REST e Truffle para a API e gerenciamento de contratos. A *blockchain* utilizada foi a Ethereum na rede de testes Sepolia, e oráculos Chainlink foram integrados para acessar dados externos, como as tarifas de energia fornecidas pela API Django. A avaliação da solução incluiu a simulação da geração fotovoltaica com base em dados meteorológicos e a análise dos dados de consumo. Os resultados demonstraram a eficiência do sistema em reduzir a dependência dos usuários da energia fornecida pela concessionária, promovendo maior autonomia e eficiência no uso dos recursos energéticos.

2. Conceitualização e Revisão Bibliográfica

Esta seção descreve os principais conceitos sobre VPP e *blockchain* para a formulação da metodologia, além de apresentar alguns trabalhos relacionados, com o intuito de fundamentar as contribuições sobre o tema desta pesquisa.

2.1. *Virtual Power Plants* (VPP)

Segundo [Saboori et al. 2011], a geração de energia distribuída pode ser melhor compreendida e integrada por meio do conceito de *Virtual Power Plants* (VPP), composta pela integração de diversas unidades geradoras distribuídas, formando uma “única unidade virtual geradora”. Essa abordagem possibilita o gerenciamento individualizado de cada unidade e, ao mesmo tempo, funcione de forma integrada, otimizando os prosumidores conectados à rede.

A VPP integra diversos DER’s, como fontes eólica, solar, termelétrica e cargas residenciais/industriais, formando uma rede cooperativa de troca energética. Nesse modelo descentralizado, há interação direta entre participantes (sem concessionárias), com fluxo bidirecional de energia entre geradores, prosumidores e BESS.

Esta arquitetura possibilita aos usuários a flexibilidade de adquirir energia tanto da rede cativa tradicional quanto da rede VPP, conforme suas necessidades e condições de mercado. A operação coordenada do sistema promove a otimização da capacidade instalada através do gerenciamento inteligente dos excedentes energéticos, que podem ser armazenados nos BESS durante períodos de baixa tarifa e subsequentemente disponibilizados quando os preços de mercado atingem patamares mais elevados, resultando em significativos ganhos de eficiência operacional e econômica para todos os participantes da rede.

2.2. Oráculos e a *ChainLink*

Os oráculos de *blockchain* são serviços de terceiros que fornecem dados externos aos contratos inteligentes, funcionando como pontes entre *blockchains* e o mundo externo. *Blockchains* e contratos inteligentes, por si só, não podem acessar dados *off-chain*. No entanto, para muitos acordos contratuais, é essencial obter informações externas para sua execução. Nesse contexto, os oráculos desempenham um papel crucial, pois estabelecem a conexão entre dados *off-chain* e *on-chain*, com ampliação do escopo de aplicação dos contratos inteligentes dentro do ecossistema *blockchain* [Beniiche 2020].

De acordo com [Beniiche 2020], o *ChainLink* é uma rede de oráculos que conecta contratos inteligentes a dados *off-chain*, superando as limitações dos oráculos centralizados, que podem ser pontos únicos de falha. A arquitetura do *ChainLink* é modular e inclui três contratos principais: o contrato de reputação, que avalia o desempenho dos provedores de dados; o contrato de correspondência de pedidos, que gerencia propostas de SLA (*Service Level Agreement*) e seleciona oráculos com base na reputação; e o contrato de agregação, que processa as respostas dos oráculos para gerar o resultado final. Para aprimorar a usabilidade, o *ChainLink* automatiza a correspondência entre oráculos. Em vez de interações manuais, os compradores enviam propostas de SLA para um contrato de correspondência de pedidos, que gera um *log* monitorado pelos oráculos. Oráculos qualificados fazem lances, comprometendo-se com penalidades definidas no SLA. Após a seleção dos oráculos, os não selecionados recebem suas penalidades de volta, enquanto os selecionados executam as tarefas conforme o acordo.

O *software* do nó *ChainLink* foi desenvolvido para interagir com o *blockchain* e gerenciar tarefas externas por meio de subtarefas, como solicitações HTTP e análise JSON. Adaptadores externos, com APIs REST, permitem a integração com uma variedade de serviços e APIs complexas. Muitos desses adaptadores serão disponibilizados como código aberto, promovendo compatibilidade e colaboração comunitária. A modularidade e a capacidade de suportar adaptadores personalizados garantem que o *ChainLink* seja uma solução robusta e adaptável para a integração de dados *on-chain* e *off-chain*.

2.3. Trabalhos Relacionados

A integração de *blockchain* e contratos inteligentes no gerenciamento de energia tem sido amplamente estudada para otimizar recursos e descentralizar as transações. [Mazzola et al. 2020] discutem a transição para um mercado de energia descentralizado baseado em Peer-to-Peer (P2P), com ênfase na importância das microrredes e na eficiência das transações sem intermediários. Por sua vez, [Yang et al. 2021] desenvolvem uma plataforma de gerenciamento de energia para VPPs, permitindo transações de energia entre usuários residenciais com fontes distribuídas, como renováveis e armazenamento de energia, e obtendo uma redução de até 38,6% nos custos dos usuários.

Zekiye et al. (2024) propõem um sistema P2P em microrredes, destacando sua eficiência ao reduzir o desperdício de energia em 73,6% e a dependência da rede elétrica em 12,3%. [Khan et al. 2023] apresentam uma microrrede para transações de energia com foco em segurança e privacidade, utilizando um mecanismo de consenso centrado nos prosumidores para incentivar a participação e garantir a disponibilidade de energia. Além disso, [Machado et al. 2024] propõem uma abordagem para otimizar sistemas de armazenamento em Usinas Virtuais (VPPs), utilizando contratos inteligentes para distribuir os lucros com base em métricas como Fator de Carga e Relação pico-média modificada.

Esses estudos demonstram como o uso de *blockchain* e contratos inteligentes, aliado à descentralização das transações energéticas, pode resultar em maior eficiência, transparência e redução de custos no gerenciamento de energia. Embora os trabalhos anteriores apresentem soluções interessantes, este artigo propõe um sistema que combina *blockchain*, contratos inteligentes e tarifas do grupo tarifário B1-residencial, sem a necessidade de baterias. O sistema proposto adapta-se a diferentes perfis de consumo e tarifas, oferecendo uma solução escalável e eficiente para o mercado livre de energia.

3. Implementação

Este trabalho propõe um sistema de simulação de prosumidores em uma rede *blockchain*, visando a otimização da conta de energia elétrica por meio da negociação automatizada de créditos energéticos. O sistema utiliza contratos inteligentes e *tokens* para representar os créditos como ativos financeiros (em R\$), possibilitando sua compra e venda conforme condições pré-estabelecidas.

A implementação foca em consumidores monômios de baixa tensão e busca, através dos contratos inteligentes, oferecer uma **Tarifa de Energia (TE)** inferior à praticada pela concessionária regional. A análise considera duas modalidades tarifárias: convencional e branca. A TE aplicada é baseada na Resolução 1000 da ANEEL [ANEEL 2021], desconsiderando a Tarifa de Utilização do Sistema de Distribuição (TUSD).

3.1. Utilização de Créditos em Diferentes Modalidades Tarifárias

O objetivo central é desenvolver, no âmbito do contrato inteligente, um mecanismo capaz de estabelecer uma TE inferior àquela praticada pela concessionária regional, proporcionando uma melhor utilização de seus créditos. Na modalidade convencional, não há diferenciação de preço de energia elétrica ao longo do dia, aplicando-se uma tarifa única para todo o consumo registrado. A equação a seguir calcula o **Faturamento da Energia Elétrica Ativa** em Reais (R\$):

$$\text{FEA} = \text{EEAM} \cdot \text{TE}, \quad (1)$$

onde EEAM corresponde ao montante de **Energia Elétrica Ativa Medida** no ciclo de faturamento, em megawatt-hora (MWh), e TE refere-se à **Tarifa final de Energia Elétrica Ativa**, que permanece constante ao longo do dia, não apresentando variação por posto tarifário. Por outro lado, na modalidade tarifária branca, há distinção no valor da tarifa de acordo com o período do dia em que ocorre o consumo. Esses períodos são denominados postos tarifários, definidos pela ANEEL como: "ponta", "intermediário" e "fora de ponta". Essa estrutura tarifária busca refletir o custo real de fornecimento de energia em função

da demanda horária. O **Faturamento da Energia Elétrica Ativa** por posto tarifário i , expresso em **Reais (R\$)**, na modalidade branca, é determinado pela seguinte equação:

$$\text{FEA} = \sum_i \text{EEAM}(i) \cdot \text{TE}(i), \quad (2)$$

onde $\text{EEAM}(i)$ representa o montante de **Energia Elétrica Ativa Medida** no ciclo de faturamento, em megawatt-hora (MWh), para cada posto tarifário i , e $\text{TE}(i)$ corresponde à **Tarifa final de Energia Elétrica Ativa** aplicável ao respectivo posto. O posto tarifário “ponta” possui a maior tarifa, pois corresponde aos períodos de maior demanda por energia elétrica, geralmente entre 18h e 21h, exigindo maior capacidade da infraestrutura elétrica para atender ao consumo elevado. O posto “intermediário” apresenta uma tarifa menor que o “ponta”, mas superior ao “fora de ponta”, e abrange os períodos imediatamente anteriores e posteriores ao horário de ponta. Por fim, o posto “fora de ponta” possui a tarifa mais baixa, correspondendo aos períodos de menor demanda por energia elétrica.

3.2. Arquitetura Blockchain

A Figura 1 representa o fluxo de dados na rede *blockchain*, ilustrando a configuração implementada para a gestão descentralizada de energia. Esse sistema utiliza uma abordagem sem interface baseada em dois contratos inteligentes: *energyToken.sol*, responsável pelo controle dos tokens dos usuários, e *energy.sol*, que gerencia a compra e venda descentralizada de energia. Ambos foram desenvolvidos em Solidity e implantados na rede de testes Sepolia usando o framework Truffle. Cada usuário interage com esses contratos por meio de uma carteira MetaMask, que permite a comunicação segura com a *blockchain*.

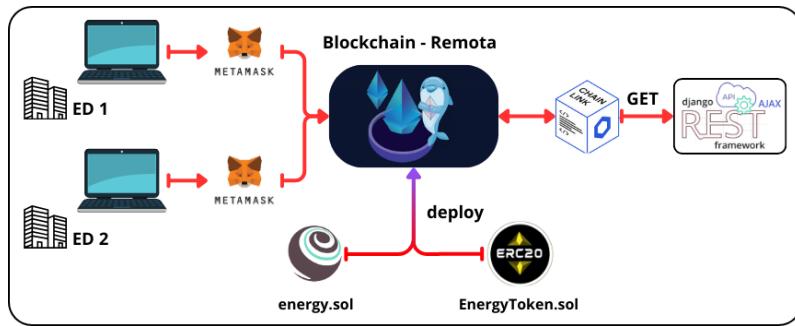


Figura 1. Fluxograma VPP-Blockchain

A atualização da TE ocorre por meio da API Django, que fornece os valores mais recentes, por intermédio de um nó *Chainlink*, que desempenha um papel fundamental nesse processo, buscando os dados off-chain e disponibilizando-os on-chain por meio de seus oráculos. O oráculo *Chainlink* utilizado na implementação foi o 0x6090149792dAAeE9D1D568c9f9a6F6B46AA29eFD (*Chainlink DevRel*), utilizando o JobId 53f9755920cd451a8fe46f5087468395 (MultiWord Job Spec), garantindo que o contrato principal possua sempre as tarifas atualizadas, permitindo uma gestão eficiente e transparente do sistema de energia descentralizado.

As tarifas foram estabelecidas com base nas resoluções homologatórias nº 2.749, de 06/08/2020, e nº 2.918, de 03/08/2021, publicadas pela concessionária responsável pela distribuição elétrica no Espírito Santo [EDP-ES 2025]. Como não foram localizadas as

tarifas referentes a 2016 e 2017, optou-se pelo uso das tarifas do ano bissexto subsequente, 2020, como referência para 2016.

Créditos são definidos como o excedente energético (kWh) após dedução do consumo, convertidos em tokens mediante aplicação da TE para atribuir valor monetário (R\$). Dessa forma, para cada kWh excedente, o correspondente em reais é obtido aplicando a TE, refletindo o montante financeiro equivalente à energia gerada a mais. Esse conceito está alinhado às parcelas de consumo descritas nas Equações 1 e 2, porém voltado à injeção de energia. Além disso, o *token* possui funcionalidades que permitem aos usuários realizar operações no sistema.

Com isso, é possível aplicar duas abordagens para reduzir a tarifa: manter fixo o montante cobrado e aumentar a quantidade que o usuário pode consumir ou, inversamente, fixar a quantidade consumida e reduzir o montante cobrado. O *token* se fundamenta nessa estrutura. Quando um usuário solicita uma retirada, o contrato inteligente converte a quantidade de energia desejada (em kWh) para *tokens*, utilizando a tarifa do contrato naquele momento. Essa tarifa é calculada com base na razão entre o total de *tokens* disponíveis e a energia armazenada no sistema. À medida que retiradas e depósitos ocorrem, a tarifa do contrato é ajustada automaticamente, com garantia de que os valores refletem o equilíbrio entre a oferta de créditos energéticos e a demanda dos usuários. Esse ajuste dinâmico permite que a tarifa do contrato seja progressivamente reduzida em relação à tarifa da concessionária, por meio da segunda abordagem, reduzindo uma pequena quantidade do montante de *tokens* dos usuários. A Figura 2 ilustra um exemplo do funcionamento desse mecanismo, detalhando as principais funcionalidades do contrato:

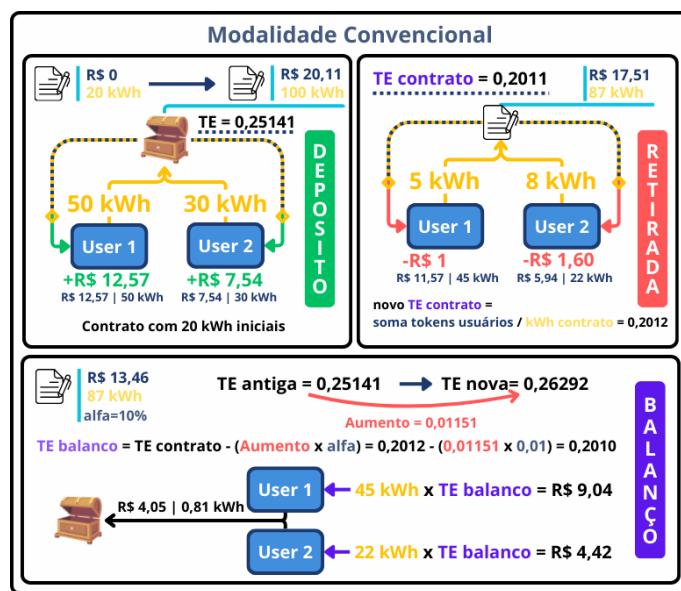


Figura 2. Funcionamento do contrato

Depósito: Permite que os usuários gerem *tokens* no contrato por meio de seus créditos. O valor depositado é convertido em *tokens* utilizando a tarifa de energia vigente fornecida pela concessionária.

Retirada: Funcionalidade que possibilita o uso dos *tokens* para abatimento do custo de consumo em um determinado período. A conversão de *tokens* ocorre com base na tarifa do

contrato, ajustada de modo a ser inferior à tarifa praticada pela concessionária.

Balanço: Essa funcionalidade, acessível apenas ao administrador do contrato, tem como objetivo garantir a sustentabilidade do sistema e reduzir gradualmente a tarifa do contrato ao longo do tempo. O balanço ocorre geralmente uma vez por ano, tendo como gatilho o momento em que a variação da TE da concessionária. Durante esse processo, uma pequena quantidade de *tokens* dos usuários é queimada, visando uma estratégia de controle da inflação e valorização do ativo por meio da diminuição da Te do contrato. Essa queima impede que os usuários acumulem *tokens* indefinidamente sem utilizá-los e, ao mesmo tempo, possibilitando a redução progressiva da tarifa do contrato.

O balanço opera da seguinte maneira: quando a concessionária reajusta sua tarifa, o contrato requer atualização de referência para manter a proporcionalidade entre *tokens* e energia. Para isso, o sistema calcula uma nova tarifa interna temporária TE do Balanço ($Te_{Balanco}$) Equação 3:

$$Te_{Balanco} = Te_{Contrato} - (\text{Aumento} \cdot \alpha) \quad (3)$$

onde a TE do contrato ($Te_{Contrato}$) representa a tarifa vigente antes do balanço, em R\$/kWh, "Aumento" corresponde à diferença entre a tarifa da concessionária no mês anterior e no mês atual, expressa em R\$/kWh, e α é um fator percentual que define a fração desse aumento a ser considerada no ajuste, sendo um parâmetro configurável que varia entre 0 e 100%. Por exemplo, se α for 100%, o montante de *tokens* dos usuários levará em conta exatamente o valor aumentado na tarifa da concessionária.

Após o cálculo da $Te_{Balanco}$, o novo valor de *tokens* do usuário é obtido multiplicando a $Te_{Balanco}$ pelo valor anterior de créditos do usuário em kWh. Como consequência, a quantidade de energia que cada usuário possuía em *tokens* passa a ser ligeiramente inferior ao valor original. Por exemplo, na Figura 2, o usuário 1 possuía *tokens* equivalentes a 45 kWh antes do balanço e, após o ajuste, esse saldo foi reduzido para 44,93 kWh. Esse mecanismo incentiva o uso dos créditos em prazo adequado, evitando o acúmulo excessivo de *tokens* e garantindo que o contrato continue operando com tarifas progressivamente menores em relação às da concessionária.

Cálculo do Te Token: Mecanismo interno executado sempre que há uma mudança nos *tokens*, seja por Depósito, Retirada ou Balanço. Ele ajusta automaticamente a tarifa do contrato (Te Contrato) com base na razão entre o total de *tokens* disponíveis e a quantidade total de energia armazenada no sistema (em kWh). Esse ajuste dinâmico contribui para a redução gradual da tarifa do contrato, oferecendo um benefício econômico aos usuários.

O contrato possibilita a venda de créditos pelos usuários a preços mais altos (Te da concessionária) e comprem a preços mais baixos (Te do contrato), buscando sempre uma tarifa de compra, que seja igual ou inferior à tarifa oferecida pelas concessionárias. Na Figura 3, é possível observar a variação da tarifa de energia tanto do contrato quanto da concessionária ao longo da simulação, considerando os 10 edifícios conectados à VPP. Para melhor visualização, foi calculada a média das tarifas horárias brancas.

3.3. Modelagem do Consumo Energético

Para a análise de consumo, um dos pontos primordiais utilizados no sistema foi o *dataset* disponibilizado pela *SpringerNature* [Team 2020] e utilizado por [Miller et al. 2020]. Esse

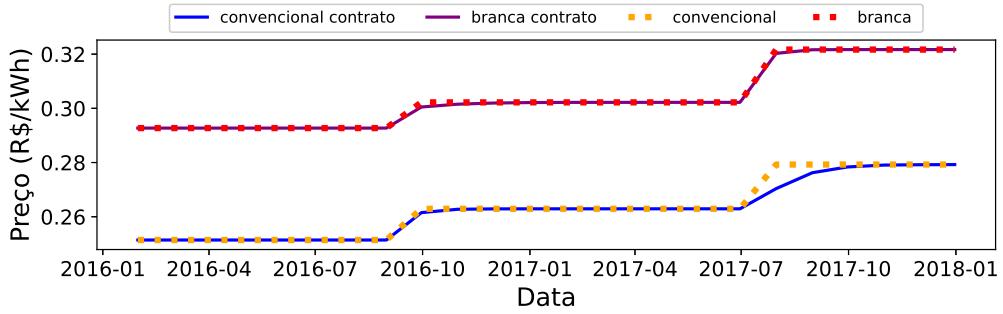


Figura 3. Variação das Tarifas de Energia concessionaria x contrato

dataset descreve um conjunto de dados abertos provenientes de 3.053 medidores de energia, instalados em 1.636 edifícios não residenciais, ao longo de dois anos completos (2016 e 2017), com registros em frequência horária, totalizando aproximadamente 53,6 milhões de medições (17.544 medições por medidor). Para esta análise, foram selecionados aleatoriamente 10 edifícios, que foram tratados como prosumidores a partir da adição de uma carga de injeção simulada, representando a geração própria de energia. Esses edifícios foram conectados ao VPP para efeito de análise, e a Figura 4 apresenta o consumo mensal correspondente. Dos dez usuários analisados, Isaiah e Reyna possuem registros apenas para o segundo ano, sem justificativa aparente para essa ausência de dados no primeiro ano.

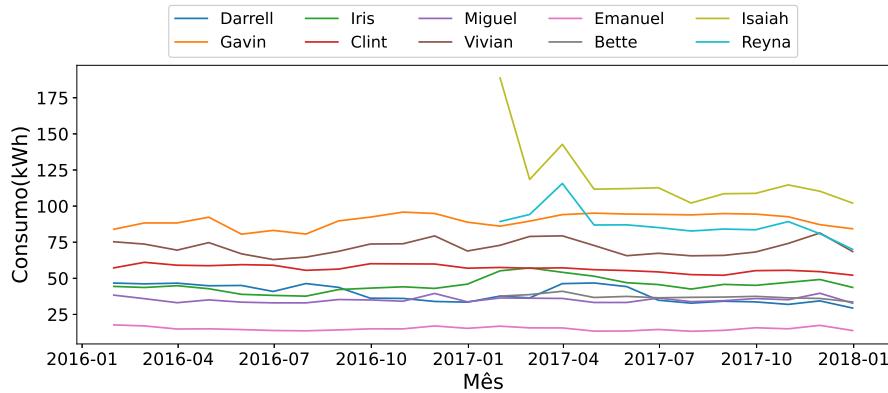


Figura 4. Consumo de energia por usuário no *dataset* utilizado

3.4. Sistemas Fotovoltaico (PV)

Foi utilizado um algoritmo para simular dados de geração solar, uma vez que não havia disponibilidade de informações reais de um sistema fotovoltaico instalado. A simulação foi realizada com base em dados meteorológicos da região de Vitória referentes aos anos de 2016 e 2017 [INMET 2025]. O objetivo foi fornecer uma estimativa da geração de energia caso um sistema de placas fotovoltaicas fosse instalado na região. Nessa simulação, foi utilizado como referência o módulo fotovoltaico ODA280-30-P, Tabela 1, determinando a quantidade necessária de placas N_p para cada edifício com base no consumo médio horário, conforme expressa a Equação 4:

$$N_p = \frac{c_m}{p \cdot Ir \cdot h_e \cdot ap} \quad (4)$$

onde c_m é o consumo médio, horário, p é a potência nominal do módulo, ap é o fator de

aproveitamento (0.75, considerando uma perda de 25%), I_r é a irradiação solar média (4,5 Wh/m²), e h_e é o tempo de exposição ao sol (6h).

Tabela 1. Especificações do Módulo Fotovoltaico ODA280-30-P

Especificação	Unidade	Valor
Imppt	corrente no ponto de máxima potência (A)	8,77
Vmppt	tensão no ponto de máxima potência (V)	31,94
Not	temperatura nominal de operação da célula (°C)	45
Isc	corrente de curto circuito da célula (A)	9,41
Voc	tensão de circuito aberto do módulo (V)	38,33
K_i	coeficiente de corrente/temperatura (A/°C)	0,06
K_v	coeficiente de tensão/temperatura (V/°C)	-0,3
R_{NOCT}	irradiância total (W/m ²)	1000
τ_a	produto da transmitância-absortância (p.u)	0,9
η_c	eficiência de conversão do módulo (%)	18,99

Para calcular os valores de potência ao longo do período, é necessário determinar a temperatura dos painéis solares. Para isso, foi utilizada a equação proposta por [Yang et al. 2018], conforme descrito na Equação 5 em que V_v representa a velocidade do vento, em m/s, I_r a irradiação, em m/s e demais dados provenientes da Tabela 1. Os dados de irradiância solar, temperatura ambiente e velocidade do vento foram obtidos no portal do [INMET 2025] para a estação A612, localizada na região de Vitória.

$$T_c = T_a + \left[\frac{I_r}{R_{NOCT}} \cdot \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8 \cdot V_v} \right) \cdot (Not - 20) \cdot \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau_a} \right) \right] \quad (5)$$

Com a temperatura dos painéis (T_c) determinada, as Equações 6 e 7 são utilizadas para calcular a corrente elétrica e a tensão no ponto de medição. Esses cálculos dependem exclusivamente dos valores de corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), coeficientes de temperatura de corrente (K_i) e tensão (K_v).

$$I = I_r \cdot (Isc + K_i \cdot (T_c - 25)) \quad (6)$$

$$V = Voc - K_v \cdot (T_c - 25) \quad (7)$$

$$FF = \frac{V_{mppt} \cdot Imppt}{Voc \cdot Isc} \quad (8)$$

Já o Fator de Forma (FF), dado pela Equação 8, é uma medida para avaliar a eficiência dos painéis fotovoltaicos e é calculado com base em parâmetros fundamentais, como a tensão máxima de potência (V_{mppt}), corrente máxima de potência ($Imppt$), tensão de circuito aberto (Voc) e corrente de curto-circuito (Isc).

$$Pot_{PVM} = N_{Paineis} * FF * V * I \quad (9)$$

Com base nas equações apresentadas, podemos formular a expressão que descreve a potência do sistema fotovoltaico (Pot_{PVM}) em cada instante de tempo por meio da Equação 9. Essa equação fornece as informações essenciais para a criação de um *dataframe* com os dados de geração no período completo dos anos de 2016 e 2017. Como exemplo, as gerações do dia 1º de janeiro de 2016 podem ser visualizadas na Figura 5.

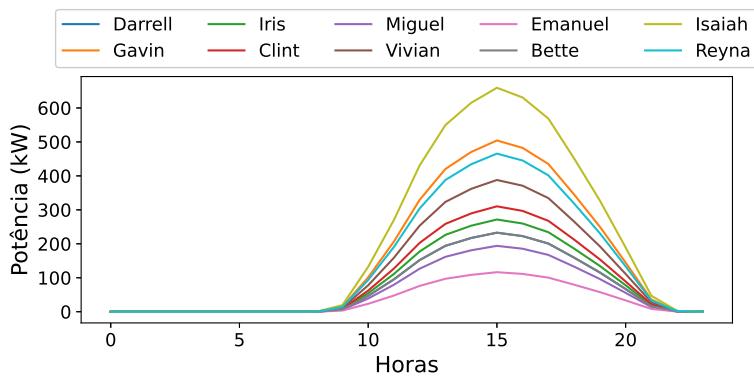


Figura 5. Geração fotovoltaica em 1º de janeiro de 2016

4. Avaliação e Resultados

A análise inicial baseou-se na avaliação dos boxplots que representam a economia dos usuários, conforme ilustrado na Figura 6. Dentre todos os participantes, Gavin se destaca por apresentar uma mediana elevada e uma ampla variação de economia, evidenciando um desempenho mais consistente. Os quartis – primeiro (Q1) e terceiro (Q3) – destacam a dispersão dos dados e a concentração das economias ao redor da mediana. A amplitude interquartil positiva indica que a economia de Gavin, em determinados momentos, foi significativamente maior, contribuindo para a estabilidade de seu desempenho. Além disso, o valor mínimo, os quartis e o máximo das economias estão concentrados em faixas positivas, sugerindo a ausência de aumentos de custo no conjunto de dados.

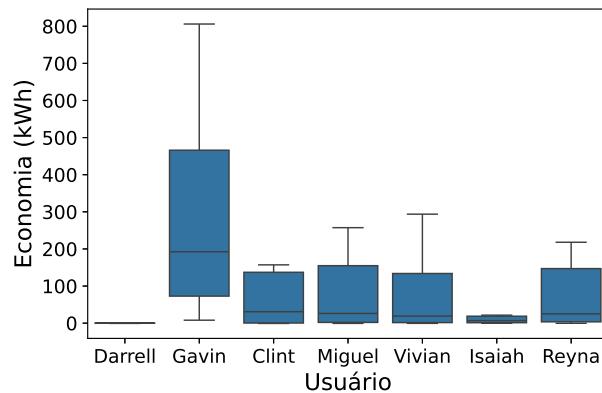


Figura 6. Economia por Usuário

A Tabela 2 complementa essa análise ao apresentar a economia geral e a valorização de créditos de energia por usuário e modalidade. De modo geral, a solução demonstrou viabilidade, com todos os usuários registrando economias positivas ou neutras. A modalidade convencional gerou economias mais expressivas, como observado em Gavin (2,6%) e Miguel (1,8%), enquanto a modalidade branca apresentou menor valorização, com alguns usuários obtendo créditos como Clint (1,5%) e Isaiah (0,4%).

Um aspecto relevante a ser analisado é a relação entre valorização de créditos e economia geral. Embora a valorização de créditos represente um indicador de eficiência na gestão de recursos, ela nem sempre se traduz em redução imediata de custos. Por

Tabela 2. Economia geral e valorização de créditos de energia

Usuário	Modalidade Tarifária	Economia geral (%)	Valorização crédito (%)
Darrell	Convencional	0,0	2,2
Gavin	Convencional	2,6	0,0
Iris	Branca	0,0	-1,8
Clint	Branca	1,5	0,1
Miguel	Convencional	1,8	0,0
Vivian	Convencional	1,2	0,0
Emanuel	Convencional	0,0	-3,7
Bette	Branca	0,0	-1,2
Isaiah	Branca	0,4	0,0
Reyna	Convencional	0,8	0,0

exemplo, Emanuel registrou uma desvalorização de (-3,7%) nos créditos, mas manteve uma economia geral neutra (0,0%), indicando que essa desvalorização não resultou em prejuízo financeiro. Por outro lado, Darrell apresentou a maior valorização de créditos (2,2%), mas sem ganhos percentuais de economia, reforçando que a valorização de créditos pode estar mais associada a estratégias de uso do sistema do que a economias diretas.

A Figura 7 integra a análise ao agrupar os usuários por modalidade tarifária – convencional e branca. Observa-se que a modalidade convencional apresenta maior dispersão nos resultados, com valores que variam em economias mais expecivas. Em contrapartida, a modalidade branca exibe uma mediana inferior, com dados mais concentrados em uma faixa moderada. A correlação entre os achados das Figuras 6, 7 e Tabela 2 sugere que a escolha da modalidade tarifária exerce influência significativa nos resultados individuais. No entanto, a economia final não depende exclusivamente da modalidade adotada, mas também do número de usuários inseridos em cada modalidade e de seus respectivos padrões de consumo, configurando um cenário de análise multifatorial.

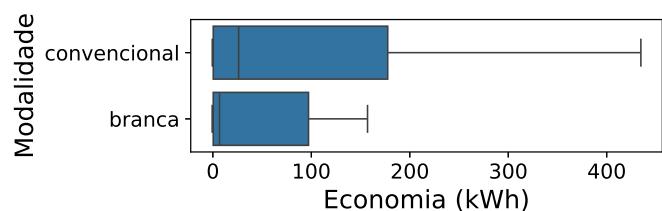


Figura 7. Economia por Modalidade

Para validar essa hipótese, foi realizada uma simulação fora da *blockchain*, utilizando um código em Python que replicou a execução do contrato com 50 usuários conectados. Essa abordagem foi adotada em razão da quantidade elevada de usuários simulados e dos custos operacionais associados à execução direta na *blockchain*, os quais inviabiliza testes em larga escala. A simulação externa permitiu analisar, de forma eficiente e econômica, o comportamento do contrato diante do aumento da base de usuários, garantindo maior controle sobre as variáveis do experimento, sem incorrer em custos de transação. O resultado obtido, apresentado na Figura 8, confirma que o aumento da base de usuários potencializa a economia individual dos principais participantes, devido a sinergias coletivas, otimização de recursos compartilhados e ajustes dinâmicos nas tarifas do contrato. Além disso,

a ampliação do número de usuários contribui para uma maior estabilidade nos resultados e reforça a importância de fatores como a modalidade tarifária e os padrões de consumo.

Por fim, a Figura 9 ilustra a comparação entre a compra de energia realizada por Gavin nos cenários com e sem a utilização da *blockchain*, destacando também a interação com o contrato inteligente na simulação com 50 usuários. Observa-se que, embora a quantidade total de energia adquirida tenha se mostrado semelhante em ambos os cenários, a tecnologia da *blockchain* permitiu um uso mais eficiente da energia em períodos específicos, especialmente no final dos anos de 2016 e 2017. A análise quantitativa revela que o sistema proposto gerou uma economia líquida de R\$874,58, reduzindo os custos totais de energia de R\$22.247,66 (no modelo tradicional) para R\$21.373,08 (com *blockchain*), o que representa uma economia de 3,93%. Além disso, observou-se um aumento de 1,33% no cenário com 50 usuários, refletindo uma redução na compra de energia. Esses resultados indicam que o contrato inteligente contribuiu para uma gestão mais eficiente dos recursos e para uma valorização estratégica do ativo ao longo do tempo.

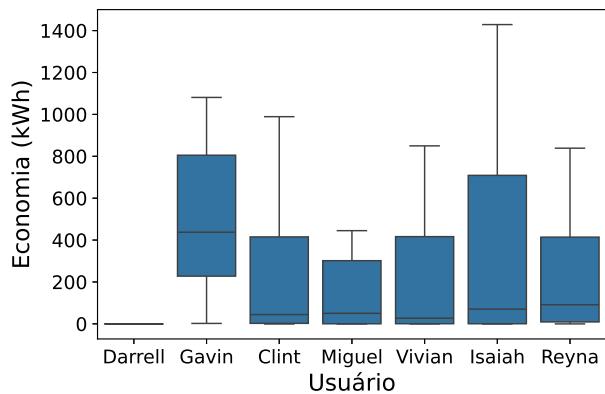


Figura 8. Economia por Usuário (50 usuários conectados)

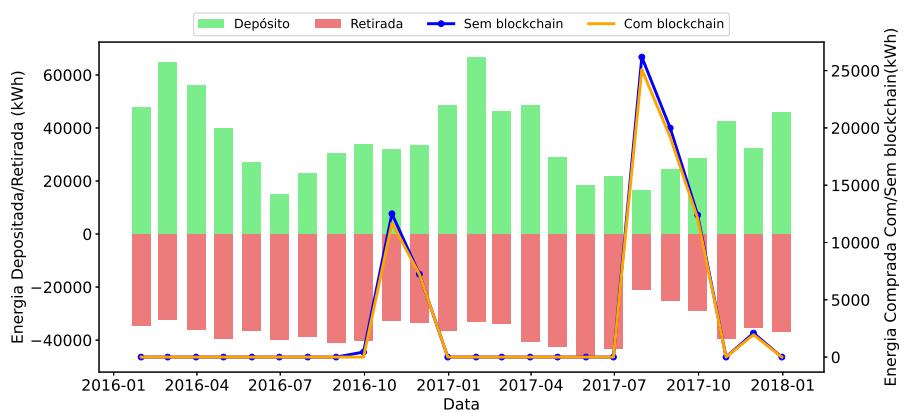


Figura 9. Compra de energia da concessionária com e sem a utilização da blockchain e interação do usuário Gavin com o contrato

5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma solução baseada em contratos inteligentes e *blockchain* para otimizar a comercialização de créditos de energia entre prosumidores no mercado livre. A abordagem mostrou-se eficaz ao promover descentralização e transparência nas transações,

eliminando intermediários e reduzindo custos. Simulações com dados reais confirmaram sua viabilidade, com menor dependência da concessionária e maior eficiência energética. A integração com oráculos *Chainlink* permitiu atualização dinâmica das tarifas, assegurando melhores condições comerciais.

Apesar da viabilidade técnica e econômica comprovada em cenários simulados, a adoção em larga escala do modelo proposto ainda enfrenta desafios regulatórios e operacionais. A abertura total do mercado livre de energia no Brasil, prevista para 2026, cria um cenário favorável à implementação de soluções descentralizadas como esta. No entanto, tal transição exige adaptações fundamentais, como a incorporação da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a padronização de contratos inteligentes que estejam em conformidade com as novas diretrizes regulatórias do setor elétrico.

Do ponto de vista da segurança, a arquitetura proposta apresenta mecanismos robustos. A exigência de créditos energéticos reais, tokenizados, como pré-requisito para qualquer operação, funciona como uma barreira econômica contra ataques do tipo *Sybil*, dificultando a criação de múltiplas identidades falsas em larga escala. Adicionalmente, o uso da rede *Chainlink* como mecanismo de oráculo fortalece a confiabilidade dos dados externos, mitigando os riscos de manipulação que normalmente afetam sistemas baseados em fontes centralizadas.

No aspecto técnico-operacional, a atual implementação na rede de testes Sepolia da *Ethereum* constitui um ambiente adequado para validações preliminares. No entanto, a migração para soluções de camada 2, como *Polygon*, pode trazer benefícios expressivos, reduzindo significativamente os custos de transação e ampliando a escalabilidade do sistema. Alternativamente, o uso de *blockchains permissionadas* pode eliminar os custos variáveis de *gas*, adotando um modelo transacional mais previsível para microtransações energéticas. Essas redes também possibilitam tempos de consenso da ordem de milissegundos e maior aderência a requisitos regulatórios, permitindo que concessionárias e órgãos reguladores atuem como validadores autorizados. A adoção de modelos híbridos, que combinem características de *blockchains permissioned* e *permissionless*, pode ainda oferecer maior flexibilidade para acomodar os diversos perfis de prosumidores que devem ingressar no mercado a partir de 2026.

Como trabalhos futuros, recomenda-se: a inclusão de consumidores binomiais, visando atender demandas mais complexas; o desenvolvimento de uma interface interativa (*front-end*) para facilitar a usabilidade do sistema; e a avaliação da viabilidade econômica do *deployer*, considerando modelos sustentáveis de remuneração. Por fim, propõe-se um estudo aprofundado sobre o parâmetro α , que regula a proporção de tokens descontados no balanço, a fim de compreender melhor seus impactos na economia dos usuários, na estabilidade tarifária e na eficiência global do sistema.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) por meio dos editais CCAF/2022 - CPID e Edital Especial CPID, e Projetos #2021-5N0G8, #2022-BWBR2, #2023-RWXSZ. Outros agradecimentos: Proap/Capes – Código de Financiamento 001; CNPq – 309737/2021-4; Fapesp – 2020/05182-3.

Referências

- ANEEL (2021). Resolução normativa aneel nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021(*). Agência Nacional de Energia Elétrica, Disponível em <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acessado em: 19 junho 2024.
- Beniiche, A. (2020). A study of blockchain oracles. *arXiv preprint arXiv:2004.07140*.
- EDP-ES (2025). Tarifas vigentes. EDP Espírito Santo Distribuição de Energia Elétrica S.A, Disponível em <https://www.edp.com.br/tarifas-vigentes/>. Acessado em: 07 Março 2025.
- El-Bidairi, K. S., Nguyen, H. D., Mahmoud, T. S., Jayasinghe, S., and Guerrero, J. M. (2020). Optimal sizing of battery energy storage systems for dynamic frequency control in an islanded microgrid: A case study of flinders island, australia. *Energy*, 195:117059.
- INMET (2025). Tabela de dados das estações - vitoria a612. Instituto Nacional de Meteorologia, Disponível em <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A612>. Acessado em: 19 Janeiro 2025.
- Khan, M. H. D., Imtiaz, J., and Islam, M. N. U. (2023). A blockchain based secure decentralized transaction system for energy trading in microgrids. *IEEE Access*, 11:47236–47257.
- Machado, A. A. et al. (2024). Profit distribution through blockchain solution from battery energy storage system in a virtual power plant using intelligence techniques. *Journal of Energy Storage*, 98:113150.
- Mazzola, L., Denzler, A., and Christen, R. (2020). Towards a peer-to-peer energy market: an overview.
- Miller, C. et al. (2020). The building data genome project 2, energy meter data from the ashrae great energy predictor iii competition. *Scientific data*, 7(1):368.
- Saboori, H., Mohammadi, M., and Taghe, R. (2011). Virtual power plant (vpp), definition, concept, components and types. In *2011 Asia-Pacific power and energy engineering conference*, pages 1–4. IEEE.
- Team, S. D. C. (2020). Metadata record for: The building data genome project 2, energy meter data from the ashrae great energy predictor iii competition. Dataset.
- Yang, Q. et al. (2021). Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant. *Applied Energy*, 294:117026.
- Yang, R. L. et al. (2018). Estimação da temperatura em células fotovoltaicas para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em curitiba. In *Conferência Internacional de Energias Inteligentes-Smart Energy CIEI&EXPO 2018*.