

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL – UNIJUÍ**

PABLO RUAN SVICK BEERBAUM

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA SOLAR, AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE E
AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Ijuí

2024

PABLO RUAN SVICK BEERBAUM

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA SOLAR, AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE E
AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Engenharia Elétrica apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Mestre Marcelo Weber Fuhrmann

Ijuí

2024

PABLO RUAN SVICK BEERBAUM

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE INSTALAÇÃO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR, AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO
LIVRE E AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO ELETRICISTA e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 19 de dezembro de 2024

Prof. Marcelo Weber Fuhrmann

Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Orientador

Prof. Luís Fernando Sauthier

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica/UNIJUÍ

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Weber Fuhrmann

Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Orientador

Prof. Luís Fernando Sauthier (UNIJUÍ)

Mestre pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
(UNIJUÍ) – Banca Examinadora

Dedico este trabalho aos meus pais, Orlando e Elenir. Sem eles eu não chegaria a lugar algum.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus, por me conceder a dádiva da vida, preservar minha saúde e fortalecer minha perseverança ao longo de toda a minha jornada acadêmica, em especial durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus pais, Orlando e Elenir, pela educação transmitida, pelo incentivo aos estudos desde cedo, pela paciência nestes cinco anos de graduação e principalmente por não medirem esforços para que este sonho meu pudesse ser realizado.

À minha querida namorada Pricila, que nunca me deixou desanimar quando os problemas pareciam intransponíveis, foi apoio e fortaleza nos momentos onde a vontade de desistir ameaçava superar a determinação de seguir em frente.

Aos amigos, colegas e as novas amigadas que obtive nestes últimos anos, que sempre estiveram ao meu lado, obrigado por todos os momentos juntos, pelas conversas e risadas e também pelo apoio nos momentos difíceis. Agradeço também por compreenderem minhas ausências nas vezes em que precisei me dedicar inteiramente às minhas responsabilidades acadêmicas.

Além disso, agradeço ao meu orientador, Marcelo Fuhrmann, cuja orientação, paciência e generosidade ao compartilhar seus conhecimentos foram inestimáveis para o meu crescimento acadêmico, muito obrigado pela confiança depositada no meu projeto.

Por fim, quero agradecer de coração aos colegas e amigos da Dinâmica Instaladora Elétrica, que se destacaram pelo companheirismo, disposição e apoio e que me ensinaram muito do que sei como futuro Engenheiro Eletricista. Bem como, com os conhecimentos e também orçamentos necessários para a elaboração deste trabalho. A colaboração de todos foi fundamental para a realização deste trabalho de conclusão de curso e para o meu desenvolvimento profissional.

As pessoas não são lembradas pelo número de vezes que
fracassam, mas sim pelo número de vezes que têm
sucesso.

Thomas Edison

RESUMO

BEERBAUM, P.R.S. **Análise Comparativa entre Instalação de Geração Distribuída Solar, Ambiente de Contratação Livre e Autoprodutor de Energia Elétrica.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica de alternativas energéticas atuais, considerando a implementação de geração distribuída, autoprodução de energia e adequação ao mercado livre de energia. A pesquisa utiliza como base um estudo de caso para comparar os custos e benefícios das modalidades citadas, explorando variáveis como investimentos iniciais, eficiência operacional, retorno financeiro e impacto econômico. A análise considera as alterações técnicas e as particularidades de cada opção, avaliando aspectos regulatórios e de sustentabilidade. Foram definidos diferentes cenários para simulação e cálculo, baseados em dados reais de consumo e custos energéticos, a fim de propiciar uma visão abrangente das possibilidades de economia. A metodologia empregada inclui revisão bibliográfica, cálculos e modelagens, permitindo uma abordagem estruturada para os resultados apresentados. As considerações finais destacam as vantagens econômicas e estratégicas de cada modelo analisado, indicando oportunidades de redução de custos e maior eficiência no uso da energia.

Palavras-chave: Gestão Energética, Geração de Energia, Mercado Livre de Energia, Retorno financeiro, Planejamento de Custos.

ABSTRACT

BEERBAUM, P.R.S. Análise Comparativa entre Instalação de Geração Distribuída Solar, Ambiente de Contratação Livre e Autoprodutor de Energia Elétrica. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

This undergraduate thesis aims to analyze the technical and economic feasibility of current energy alternatives, focusing on the implementation of distributed generation, self-production of energy, and adaptation to the free energy market. The research is based on a case study to compare the costs and benefits of the mentioned modalities, exploring variables such as initial investments, operational efficiency, financial return, and economic impact. The analysis considers the technical modifications and specific characteristics of each option, evaluating regulatory and sustainability aspects. Different scenarios were defined for simulation and calculation, based on real data on energy consumption and costs, to provide a comprehensive view of potential savings. The methodology includes a literature review, calculations, and modeling, enabling a structured approach to the results presented. The final considerations highlight the economic and strategic advantages of each analyzed model, pointing out opportunities for cost reduction and greater energy use efficiency.

Keywords: Energy Management. Power Generation. Free Energy Market. Financial Return. Cost Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Governança do setor elétrico brasileiro.	22
Figura 2: Composições de Custo ACR e ACL.....	27
Figura 3: Esquema de Funcionamento de Uma célula fotovoltaica	28
Figura 4: Fluxograma da metodologia proposta.....	32
Figura 5: Adequações a serem executadas na caixa de medição do cliente	36
Figura 6: Custos de energia elétrica em fontes incentivadas.....	37
Figura 7: Caixa de Medição Padrão Autoprodutor de energia elétrica	40
Figura 8: Fatura de Energia Elétrica.....	42
Figura 9: Custo de Implantação de Geração fotovoltaica	45
Figura 10: Padrão de medição instalado.....	47
Figura 11: Desenho da norma do padrão de medição instalado	48
Figura 12: Custo para adequação do sistema para faturamento em ACL	49
Figura 13: Consumo de Energia Horário Diário Médio	51
Figura 14: Consumo de Energia Horário Diário Médio em dias úteis	51
Figura 15: Curva de Geração Fotovoltaica padrão	52
Figura 16: Curva de Geração (Grid Zero) x Curva de Consumo	53
Figura 17: Custo de Adequação do Padrão de Medição para Autoprodutor	54
Figura 18: Custo de Implantação de Geração fotovoltaica para Autoprodutor.....	55
Figura 19: Quadro Resumo do Estudo de Caso.....	59

LISTA DE SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AMFORP	<i>American Share Foreign Power Company</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutor de Energia
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEAL	Contrato de Comercialização de Energia em Ambiente Livre
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCER	Contrato de Comercialização de Energia Regulada
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
CMBEU	Comissão Mista Brasil-Estados Unidos para o Desenvolvimento Econômico
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CUSD	Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
DEMEI	Departamento Municipal de Energia de Ijuí
FC	Fator de Correção
GD	Geração Distribuída
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IP	<i>Internet Protocol</i>
MAE	Mercado Atacadista de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIE	Produtor Independente de Energia
PIS	Programa de Integração Social
PLD	Preço da Liquidação das Diferenças
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RGE	Rio Grande Energia
SCL	Sistema de Contabilização e Liquidação
SIN	Sistema Interligado Nacional

SMF	Sistema de Medição para Faturamento
TC	Transformador de Corrente
TE	Tarifa de Energia
TI	Transformadores de Instrumentação
TP	Transformador de Potencial
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO.....	14
1.2	PROBLEMA.....	15
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivos Específicos	17
1.4	ESTRUTURAÇÃO	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	HISTÓRIA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	19
2.2	AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO REGULADO (ACR)	22
2.3	AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE (ACL).....	25
2.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR	27
2.5	AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA.....	32
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA. 32	
3.3	ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE.....	35
3.4	ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O ACL COMO AUTOPRODUTOR38	
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA.....	42
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA Fotovoltaica	43
4.2.1	Custos de Implantação de um Sistema Fotovoltaico	44
4.2.2	Retorno de investimento para Geração Distribuída Solar	45
4.2.3	Análise da Instalação de Geração Distribuída Solar.....	46
4.3	ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE.....	47
4.3.1	Custos de Adequação do Sistema de Medição para Faturamento para Mercado Livre.....	48
4.3.2	Retorno de investimento para Ambiente de Contratação Livre.....	49
4.3.3	Análise da Adequação para Ambiente de Contratação Livre	50
4.4	ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O ACL COMO AUTOPRODUTOR50	

4.4.1 Custos de Implantação do Sistema de Medição para Faturamento para Autoprodutor.....	54
4.4.2 Retorno de investimento para Autoprodutor de Energia Elétrica.....	55
4.4.3 Análise da Adequação para Autoprodutor de Energia.....	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
5.1 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho analisa a viabilidade técnica e financeira da implementação de geração distribuída, autoconsumo de energia ou acesso ao mercado livre. Por meio de um estudo de caso, são investigadas opções para otimizar despesas com energia e explorar abordagens sustentáveis no cenário atual de consumo e mercado de energia. A geração distribuída desponta como uma alternativa promissora para descentralizar a produção energética, diminuindo a dependência das redes convencionais e favorecendo uma eficiência maior. O autoconsumo, por outro lado, confere aos consumidores um controle mais significativo sobre suas necessidades energéticas, enquanto o acesso ao mercado livre proporciona oportunidades de negociação e redução de despesas. Portanto, este estudo visa ilustrar um panorama abrangente das opções, levando em conta tanto os benefícios quanto os obstáculos envolvidos. Ademais, examina-se como essas alternativas podem auxiliar na sustentabilidade e na segurança energética em um contexto de transformação global.

1.1 CONTEXTO

A energia solar está atualmente difundida no sistema elétrico brasileiro e é uma alternativa viável de diminuição no custo de energia elétrica, vê-se também atualmente, o ambiente de contratação livre de energia como uma outra alternativa de redução nos gastos, e a instalação de um autoprodutor de energia. (ESPOSITO; FUCHS, 2013)

Desta forma o tema é um estudo que busca comparar tecnicamente e financeiramente entre estas opções de redução nos custos de energia elétrica, analisando suas características e suas particularidades.

Este trabalho adota uma abordagem dedutiva, com foco na pesquisa aplicada, visando a aplicação prática do conhecimento científico para a resolução de problemas específicos. Para tanto, serão utilizados métodos qualitativos e técnicas de estudo de caso, incluindo uma análise detalhada dos custos e benefícios dos ajustes no ambiente de contratação de energia livre, na geração distribuída solar e no autoprodutor de energia elétrica. As técnicas de pesquisa envolvem revisão bibliográfica, coleta de dados e análise técnica e financeira dos cenários propostos.

1.2 PROBLEMA

Para reduzir custos energéticos, opções como energia solar, mercado livre e autoprodução se destacam. A energia solar é acessível para quem possui espaço e busca autonomia. O mercado livre favorece grandes consumidores com tarifas negociáveis, enquanto o autoprodutor é ideal para indústrias que podem investir em geração própria.

A gestão energética de um país afeta diretamente seu desenvolvimento. Enquanto componente fundamental do sistema socioeconômico e ambiental, o acesso à energia, a segurança do abastecimento energético, a qualidade e o preço afetarão diretamente a competitividade da indústria e a competitividade das atividades cotidianas (MENKES, 2004).

Por este motivo, a tarifação de energia é um assunto de extrema importância para a sociedade, um fator relevante aos custos de vida no caso de residências e também de custos operacionais das empresas, que são embutidos no valor final dos seus produtos.

Conforme Ministério de Minas e Energia, BRASIL:

A tarifa de energia elétrica é a composição de valores calculados que representam cada parcela dos investimentos e operações técnicas realizadas pelos agentes da cadeia de produção e da estrutura necessária para que a energia possa ser utilizada pelo consumidor. A tarifa representa, portanto, a soma de todos os componentes do processo industrial de geração, transporte (transmissão e distribuição) e comercialização de energia elétrica. São acrescidos ainda os encargos direcionados ao custeio da aplicação de políticas públicas. Os impostos e encargos estão relacionados na conta de luz (Ministério de Minas e Energia, BRASIL, 2023).

Atualmente o Sistema de Medição para Faturamento (SMF) mais adotado no Brasil, é o sistema cativo, onde a concessionária local quem fornece energia para o cliente cobra a tarifa que é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) conforme Ministério de Minas e Energia, Brasil (2023): “A conta de luz de cada consumidor contém o preço final, que é a tarifa definida pela Aneel, mais os impostos não incluídos nos custos da energia elétrica, como ICMS, PIS e COFINS”.

Como pode-se analisar, o custo da energia elétrica é um valor relevante tanto nas casas quanto nas empresas. Percebe-se então a necessidade de reduzir estes custos, muitas vezes apenas mudando os hábitos de consumo, mas, muitas vezes não é o suficiente para uma redução drástica no valor da fatura de energia, portanto, busca-se alternativas e investimentos para redução neste custo (SEBRAE, 2023).

Atualmente, uma das alternativas mais promissoras para a redução de custos na conta de energia elétrica é a instalação de sistemas de geração distribuída (GD), especialmente aqueles que utilizam módulos fotovoltaicos. Esses dispositivos convertem a energia

proveniente da radiação solar em energia elétrica de corrente contínua (CC). Posteriormente, essa energia é transformada em corrente alternada (CA) por meio de um inversor, tornando-se apta para uso nos equipamentos elétricos convencionais. Durante o período diurno, a energia gerada pode ser consumida diretamente, enquanto o excedente é injetado na rede elétrica da concessionária, à qual o consumidor está vinculado. Essa energia injetada gera créditos que podem ser utilizados durante a noite ou em dias de menor luminosidade, contribuindo significativamente para a economia e a sustentabilidade no consumo energético (ALVES, 2019).

Analisando o cenário por outro lado, existe também a possibilidade de implantação de um sistema de faturamento no Ambiente de Contratação Livre (ACL), comumente conhecido como: mercado livre de energia, o qual reduz os custos de energia, além do fato de ser um meio de alavancar o desenvolvimento de fontes renováveis de energia, como grandes parques eólicos, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e biomassa. Conforme Queiroz, Ledesma e Ando Junior (2023):

O ambiente de contratação livre tem se consolidado como um vetor para o desenvolvimento das fontes renováveis, conciliando a oferta dessas fontes com o interesse crescente dos consumidores por matrizes energéticas renováveis. No ano de 2017, registrou-se que cerca de 30% de toda a energia consumida pelo mercado livre foi proveniente de fontes renováveis de pequeno porte (eólica, biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e solar); também verificou-se que 70% da energia elétrica proveniente de usinas a biomassa e das pequenas centrais hidrelétricas foram comercializadas nesse ambiente (QUEIROZ; LEDESMA; ANDO JUNIOR, 2023).

O Brasil como país, já é um exemplo de sistema elétrico para o mundo todo, tendo uma grande flexibilidade em seu sistema, essa flexibilidade se dá pelo fato de o sistema ser uma única e grande reserva de água compartilhada que funciona como uma bateria gigante e pode produzir mais energia do que normalmente consome, tudo isto ligado no Sistema Interligado Nacional (SIN), que é operado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Conforme Santos, Barbosa, Silva e Abreu (2008):

Essas particularidades foram herdadas do modelo criado pela Eletrobrás, a partir da década de 1960, período em que a estatal passou a ser responsável não apenas pelo funcionamento individual das usinas e pelo gerenciamento do sistema integrado, mas também pelo planejamento de sua expansão em longo prazo. O planejamento de décadas da Eletrobrás, visando aproveitar as idiosincrasias de nossa geografia, tornou o sistema elétrico brasileiro o mais confiável, barato, flexível e limpo entre as grandes nações do planeta (SANTOS; BARBOSA; SILVA; ABREU, 2008).

Porém, apesar de ser um exemplo mundial de sistema integrado, seguro, flexível, composto em grande parte por energia limpa e totalmente coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, no quesito de contratação livre de energia, está apenas engatinhando, tendo países muito à frente do Brasil, inclusive na América Latina.

Conforme Queiroz, Ledesma e Ando Junior (2023):

Sendo o Chile como um dos precursores do mercado livre de energia elétrica a nível mundial, esse mercado não é uma novidade na América Latina; países como Colômbia, El Salvador, Guatemala, Paraná, Peru, Uruguai, República Dominicana, Bolívia e México, cada um com suas próprias características, permitem os consumidores elegíveis a escolher seu fornecedor de energia. Desde 2007, o mercado europeu (27 países membros) está totalmente aberto, até mesmo os consumidores residenciais podem escolher seu supridor. Entretanto, ainda existem países como África do Sul e China que possuem o mercado de energia elétrica fechado (QUEIROZ; LEDESMA; ANDO JUNIOR, 2023).

1.3 OBJETIVOS

Realizar uma análise comparativa financeira e técnica entre instalação de unidade de geração distribuída solar, faturamento de energia em ambiente de contratação livre de energia elétrica e autoprodutor, buscando perceber os prós e contras de cada um dos métodos e qual a melhor opção.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Explanar os conceitos de geração distribuída, ambiente de contratação livre e autoprodutor de energia elétrica;
- Analisar e avaliar as diferenças entre geração distribuída, ambiente de contratação livre e autoprodutor de energia elétrica;
- Verificar o custo para instalação e adequação de cada uma das opções;
- Avaliar as opções apresentadas analisando aspectos financeiros e técnicos;

1.4 ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 aborda a contextualização do tema, definindo os objetivos da pesquisa e apresentando os elementos fundamentais do estudo, como a caracterização do problema, as motivações que levaram à sua escolha e a justificativa para sua realização. No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica que reúne e organiza os principais conceitos e temas relacionados à pesquisa, explorando os tópicos mais relevantes para o desenvolvimento das soluções propostas. O Capítulo 3 detalha a metodologia empregada no estudo, com ênfase nas estratégias de pesquisa adotadas, no delineamento experimental, nos cálculos envolvidos e nas formulações matemáticas aplicadas

ao projeto. No Capítulo 4, a metodologia é aplicada na prática por meio de um estudo de caso, que inclui a análise dos custos relacionados à energia, os investimentos necessários para a implantação dos modelos propostos, o retorno financeiro esperado e a avaliação das modificações realizadas. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir da pesquisa, acompanhadas de considerações finais e sugestões para o aprofundamento do tema em estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRIA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

As primeiras experimentações com eletricidade no Brasil estavam direcionadas à iluminação pública e ao transporte. O marco inicial remonta a 1879, quando no Rio de Janeiro foi inaugurado o serviço permanente de iluminação interna na estação central da ferrovia Dom Pedro II, também conhecida como Central do Brasil. A fonte de energia utilizada era um dínamo. Dois anos depois, em 1881, na mesma cidade, a primeira iluminação pública foi instalada em uma seção do jardim do Campo da Aclamação, que hoje corresponde à praça da República. Nesse mesmo ano, durante a abertura da Exposição Industrial, a eletricidade foi empregada para iluminar as dependências do edifício do Ministério da Viação, localizado no largo do Paço, atualmente conhecido como praça XV, também na cidade do Rio de Janeiro (GOMES; ABARCA; FARIA; FERNANDES, 2002).

A história inicial do setor elétrico brasileiro remonta ao final do século XIX e início do século XX, quando o país começou a explorar o potencial da eletricidade para impulsionar o seu desenvolvimento industrial e melhorar a qualidade de vida da população, conforme Lorenzo (2002):

A eletricidade começou a ser produzida no Brasil nos anos finais do século XIX, quase simultaneamente ao início do seu uso comercial na Europa. Participaram dessa organização inicial pequenas empresas privadas nacionais e empresas de governos municipais de pequenas localidades que se destacavam no cenário nacional. Nos primeiros anos do século XX, com a chegada das primeiras concessionárias estrangeiras, a produção de energia elétrica começou a aumentar, possibilitando o consumo urbano e industrial em áreas próximas às fontes produtoras. (LORENZO, 2002).

Nos anos 20 ocorreram processos de abertura do mercado energético para empresas estrangeiras, buscando maior investimento externo para viabilizar e acelerar o desenvolvimento industrial neste período, o que acarretou em avanços técnicos e tecnológicos no setor de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, principalmente no estado de São Paulo, grande produtor de café, à época, e conseqüentemente aqueceu a economia e indústria no local, tornando assim o polo industrial nacional.

Em consequência, ocorreram avanços também no setor férreo, expansões urbanas, dependentes da energia produzida principalmente pelas multinacionais mencionadas por Helena Lorenzo (apud FELICIANO, 1988): “Os principais grupos foram: a holding *Brazilian Traction, Light and Power C. Ltda.*[...]; a *American Share Foreign Power Company (Amforp)*”.

Nesse contexto, em meio ao notável processo de concentração de mercado nas mãos dos grupos Light e Amforp, começaram a ser delineadas as primeiras medidas de ordenação institucional das atividades de produção e distribuição de energia elétrica. (GOMES; ABARCA; FARIA; FERNANDES, 2002).

Durante os três primeiros anos da década de 1930, algumas ações regulatórias iniciais foram tomadas: cessaram as autorizações para novos empreendimentos de aproveitamento de recursos hídricos, foi proibida a aquisição de empresas e a cláusula-ouro, um mecanismo utilizado desde o primeiro contrato com a São Paulo Light, que garantia reajustes sistemáticos das tarifas baseados na cotação do ouro, foi extinta.

A partir de 1934, a União passou a deter a competência para legislar e conceder serviços públicos de energia elétrica, que anteriormente eram regidos exclusivamente por contratos celebrados com estados, municípios e o Distrito Federal (GOMES; ABARCA; FARIA; FERNANDES, 2002).

Na década de 1950, o Brasil passou por mudanças significativas na sua industrialização. O governo de Vargas estabeleceu a Comissão Mista Brasil - Estados Unidos para o Desenvolvimento Econômico (CMBEU) em colaboração com os EUA. A CMBEU identificou desequilíbrios na economia brasileira, especialmente nos setores de transporte e energia, resultando em acordos de cooperação financeira com instituições internacionais. O Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico (BNDE, posteriormente BNDES) foi criado em 1952 para administrar esses recursos. A CMBEU também destacou desafios no setor elétrico, que levaram a propostas de expansão liderada por grandes empresas privadas, enquanto o governo se concentraria na regulamentação. Durante o governo de Juscelino Kubitschek, a empresa pública assumiu o papel central no desenvolvimento do setor elétrico, levando à criação de companhias estaduais de energia elétrica e da Central Elétrica de Furnas. O Plano de Metas de JK combinou investimentos do Estado, empresas privadas e capital estrangeiro, com ênfase na energia. O BNDES desempenhou um papel fundamental no financiamento da expansão da capacidade de geração de energia elétrica no Brasil (GOMES; ABARCA; FARIA; FERNANDES, 2002).

Durante o governo militar (1964 a 1985), ocorreram muitas mudanças relacionadas ao nacionalismo, inclusive no setor elétrico, com maior participação nas atividades econômicas e principalmente com a Eletrobrás, que apesar de ter sido criada antes da ditadura (1962) teve papel importante no setor durante este período, desenvolvendo metodologias e estatizando o setor elétrico. A criação da Eletrobrás definiu metas ambiciosas para aumentar a capacidade de energia elétrica no Brasil, reduzindo a participação de capitais privados, especialmente

estrangeiros, no setor. O Estado fortaleceu seu papel nas atividades econômicas e modernizou empresas estatais. Com empréstimos externos abundantes e um contexto favorável nos mercados financeiros internacionais, o Estado se tornou o principal financiador e executor da infraestrutura, possibilitando o chamado "milagre brasileiro," um período de desenvolvimento acelerado (LORENZO, 2002).

Na década de 1980, o Brasil enfrentou uma crise da dívida que resultou em uma recessão econômica e na rápida expansão da dívida interna. Isso limitou significativamente a capacidade do Estado de mobilizar recursos para investimentos. O setor elétrico brasileiro também foi afetado por esses eventos, desempenhando um papel na resolução dos problemas econômicos do país. Durante essa década, os interesses da Eletrobrás, representando o governo central, entraram em conflito com os das empresas estaduais de energia. Esse conflito teve raízes em interesses econômicos regionais, na disputa pela geração de energia que foi priorizada para as empresas do Grupo Eletrobrás pelo governo federal e na competição por recursos cada vez mais escassos, especialmente para a conclusão de obras. Além disso, a introdução do princípio de equalização tarifária para a taxa média de remuneração do setor em 1981, sem considerar as particularidades de cada empresa, agravou a situação financeira das concessionárias, principalmente as estaduais. Isso ocorreu porque quaisquer ganhos de produtividade alcançados por uma empresa eram transferidos para outras concessionárias, a fim de manter a taxa média. Esses problemas resultaram em pressões significativas sobre o setor elétrico, aumentando os custos operacionais e afetando os planos de expansão das empresas elétricas (LORENZO, 2002).

A partir da década de 90, o Brasil iniciou uma abrangente reestruturação do seu setor elétrico, marcando o início de um processo de desestatização. Essa mudança visava aumentar a eficiência e competitividade do setor, com a visão de que o Estado passaria a atuar predominantemente como regulador da atividade econômica do país. Em 1990, o Plano Nacional de Desestatização foi estabelecido como parte de um esforço para abrir o setor elétrico à iniciativa privada e privatizar empresas estatais. O objetivo era estimular investimentos no setor elétrico e melhorar a eficiência das empresas de energia (DIAS, 2023).

Um marco importante nesse processo foi a promulgação da Lei das Concessões em 1995, que determinou que a concessão de serviços de energia elétrica fosse realizada por meio de licitação pública. Isso possibilitou a participação de empresas privadas em atividades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. No mesmo ano, foi criado o Mercado Atacadista de Energia (MAE), que funcionava como um ambiente de negociação e contratação

de energia elétrica entre agentes geradores e distribuidores, aumentando a eficiência nas transações do setor (LORENZO, 2002).

Em 1996, ocorreram importantes privatizações de empresas de energia elétrica, como a Light e a Cerj. Além disso, foi estabelecida a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que se tornou responsável pela regulamentação técnica e econômica, supervisão e mediação no âmbito do setor elétrico. Esse conjunto de reformas transformou profundamente o setor elétrico brasileiro, abrindo caminho para uma maior participação do setor privado e uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos do país (DIAS, 2023).

Considerando as mudanças citadas e as demais criações de órgãos regulatórios no sistema elétrico, têm-se a Figura 1 como um resumo das entidades relacionadas ao gerenciamento, fiscalização e regulação.

Figura 1: Governança do setor elétrico brasileiro.



Fonte: Rech (2019)

2.2 AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO REGULADO (ACR)

O Mercado Cativo de Energia, conhecido como Ambiente de Contratação Regulada (ACR), compreende os consumidores que obtêm energia com tarifas fixadas pelo Governo e que pagam mensalmente por serviços como distribuição e geração de energia, juntamente com outros encargos, na fatura emitida pela distribuidora local. Esses consumidores são frequentemente denominados consumidores cativos. Nesse ambiente, a regulação estatal desempenha um papel central na determinação de preços e na garantia de que os serviços

essenciais de energia sejam amplamente acessíveis e previsíveis para os consumidores (RECH, 2019).

No Mercado Cativo de Energia, os consumidores têm a obrigação de adquirir energia elétrica exclusivamente da concessionária responsável pela distribuição na sua região. Nesse ambiente, a energia é adquirida por meio de leilões pelas distribuidoras, com preços determinados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Além disso, as bandeiras tarifárias são aplicadas, influenciando o valor da conta de energia de mês a mês, dentro de faixas de preços predefinidas, de acordo com a necessidade de uso de usinas termoeletricas. Os reajustes de preços, que ocorrem ao longo do ano, levam em consideração fatores como a inflação, os custos de geração de energia e os investimentos realizados pelas distribuidoras. Isso significa que, mesmo com uma tarifa regulamentada, os preços da eletricidade podem variar devido a diversos fatores, afetando a conta de energia dos consumidores cativos (RECH, 2019).

Para formalizar um contrato no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), o consumidor deve seguir um processo que envolve diversas etapas relacionadas ao acesso ao sistema de distribuição. Isso inclui a realização de uma consulta de acesso, fornecimento de informações sobre o acesso, submissão de uma solicitação de acesso e, por fim, a obtenção de um parecer de acesso ao sistema de distribuição. Tanto a consulta quanto a solicitação de acesso devem ser encaminhadas à distribuidora atuante na região de concessão, respeitando prazos adequados para possíveis adaptações no sistema de distribuição e para a elaboração dos contratos. Esse procedimento visa a assegurar a regularidade na celebração de contratos no âmbito do ACR (CCEE, 2023).

Após a submissão da solicitação de acesso, o requerente deve fornecer à distribuidora todas as informações pertinentes às suas cargas, especialmente aquelas que possam impactar negativamente no sistema de distribuição, levando a possíveis violações dos padrões de qualidade de energia estabelecidos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (CCEE, 2023).

A contratação de energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) segue um processo que envolve a assinatura dos contratos de uso do sistema de distribuição (CUSD), regulamentados pela Resolução Normativa nº 205 de 22 de Dezembro de 2005. Esses contratos estabelecem os procedimentos e as condições gerais para a contratação e utilização do sistema das concessionárias. Além disso, é necessário formalizar o contrato de compra de energia regulada (CCER), que abrange os contratos de venda de energia no ambiente de contratação

regulada (ANEEL, 2010). Esses procedimentos asseguram a regularidade e transparência nas transações de energia elétrica no ACR.

No Ambiente de Contratação Regulada, os consumidores não possuem a possibilidade de negociação no custo de energia, se sujeitando às tarifas impostas pela ANEEL, além da imprevisibilidade da variação anual, por conta das bandeiras tarifárias das Distribuidoras (RECH, 2019).

Nesse contexto, para simplificar os custos associados ao ambiente regulado, os consumidores cativos, que recebem diretamente o serviço da distribuidora em sua região, encontram os seguintes custos na fatura de energia:

- TE (Tarifa de Energia) é a energia consumida que corresponde ao custo médio dos contratos de compra e geração de energia que a distribuidora mantém, conforme estabelecido nos contratos do Contrato de Compra de Energia Regulada (CCER);
- Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD): Representa a tarifa de uso do sistema de distribuição e engloba o pagamento feito às empresas de transmissão pela entrada da energia em sua rede de distribuição, bem como os custos relacionados à operação e manutenção da infraestrutura de rede, conforme estabelecido nos contratos do Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD).

Ou seja, o valor final da energia é um somatório de vários custos e tarifas que compõe a conta de energia, além disso, há outros custos relacionados à perdas técnicas, encargos do setor e impostos que também contribuem para o valor final da fatura de energia efetivamente cobrada do consumidor (RECH, 2019).

No sistema de faturamento em ambiente de contratação regulada, existem modalidades de tarifa de energia. Estas variam conforme os grupos, sendo o grupo A os consumidores atendidos em alta tensão, e grupo B os consumidores de baixa tensão. Os detalhes de cada sistema estão definidos abaixo (LAU, 2018):

- Baixa tensão (fornecimento até 2300 volts):
- Subgrupo B1 – residencial e residencial baixa renda;
- Subgrupo B2 – rural e cooperativa de eletrificação rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

Os consumidores de baixa renda e rurais tem tarifas diferenciadas, com descontos no primeiro caso até 65% e no segundo até 73% se for fornecimento rural para irrigante, e a partir

de 2018, consumidores com consumo superior a 500kWh, podem aderir à tarifa branca, que tem descontos para os consumos fora do horário de ponta, que é das 18h às 21h (LAU, 2018).

Alta tensão (fornecimento a partir de 2300V):

- Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou mais;
- Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 a 138 kV;
- Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV;
- Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 a 44 kV;
- Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV;
- Subgrupo AS para sistema subterrâneo.

Para os consumidores do grupo A existem três modalidades de tarifa distintas, sendo que a tarifa convencional se baseia em um contrato de uma demanda única de valor igual, apenas quando a demanda for menor que 300kW, têm-se a tarifa horo-sazonal verde, disponível apenas para os subgrupos A3a, A4 e AS, citados anteriormente. (LAU, 2018).

Neste tipo, o consumidor pode adotar um valor de demanda independente da hora do dia, mas que pode ter variação sazonal, ou seja, durante o ano de acordo com as necessidades de cada caso, e também existe a tarifa horo-sazonal azul, também disponível apenas para os subgrupos supracitados, mas neste caso há valores de demanda para horário de ponta e horário fora de ponta, diferentemente da horo-sazonal verde que dispunha de um valor único durante todo o dia (LAU, 2018).

2.3 AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE (ACL)

Nos países desenvolvidos, o mercado livre de energia é uma realidade de longo prazo. A prática de contratar energia diretamente de geradores ou comerciantes é comum em nações que possuem um sistema elétrico descentralizado, como os Estados Unidos, a União Europeia e áreas da Ásia e Oceania (REGINALDO MEDEIROS, 2019).

No ambiente de contratação livre, a comercialização de energia ocorre por meio de transações entre diversos agentes, incluindo concessionárias, permissionárias, autorizadas, detentoras de registro de geração, comerciantes, importadores e consumidores livres ou especiais que atendem aos requisitos estabelecidos na regulamentação (REGINALDO MEDEIROS, 2019).

Os contratos realizados no Ambiente de Contratação Livre (ACL) são chamados de Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Livre (CCEAL). Esses contratos são caracterizados pela liberdade de negociação entre as partes envolvidas, abrangendo condições de atendimento, preços e outras particularidades. Eles devem ser registrados no Sistema de Contabilização e Liquidação (SCL), incluindo informações sobre as partes envolvidas, prazo de vigência, modulação (se aplicável), submercado e outros parâmetros conforme especificados no contrato (RECH, 2019).

Em linhas gerais, no ACL, os CCEAL substituem os Contratos de Compra de Energia Regulada (CCER) do mercado regulado. Isso significa que consumidores livres ou especiais têm a possibilidade de adquirir energia diretamente de um gerador, permitindo a negociação de preços, condições de pagamento e atendimento. No entanto, ambas as partes envolvidas devem obrigatoriamente ser registradas como agentes na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (RECH, 2019).

A principal justificativa para a busca de instalação de medição em ACL e também o faturamento de energia neste ambiente de contratação é o custo de energia que é menor que o custo no Ambiente de Contratação Regulado, e também a previsibilidade de valores da fatura, auxiliando no fluxo de caixa das empresas, essa previsão pode ser feita porque quando os contratos são fechados, os valores são válidos ao longo de todo o período de contratação e não sofrem oscilações imprevisíveis que podem impactar negativamente o orçamento da empresa, conforme Reginaldo Medeiros (2019):

As empresas que optaram pelo mercado livre buscam, principalmente, redução nos custos e previsibilidade na fatura de eletricidade. Desde 2003, o mercado livre proporcionou, em média, uma economia de 29% em comparação com o mercado cativo. As regras de ambos os mercados são definidas pela Aneel. Todos os contratos de energia são contabilizados mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (REGINALDO MEDEIROS, 2019).

No atual modelo, existem dois tipos de contratantes livres, os consumidores livres e os consumidores especiais. Os consumidores livres devem ter demanda acima de 3000kVA e serem atendidos em tensão acima de 69kV, para poderem contratar energia de forma livre de qualquer fonte energética. Já os consumidores especiais, devem ter demanda acima de 500kVA, mas que apenas podem contratar energia de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidrelétrica (apenas de pequenas e micro centrais hidrelétricas) (DIAS, 2023).

Apesar deste impedimento atual referente à demanda, a partir de 2024, todos os clientes do grupo A (descritos no item 7.2), com tensão de fornecimento acima de 2,3kV, poderão adotar o sistema de faturamento em ACL, independente de sua demanda de energia (DIAS, 2023).

No ACL, o consumidor, apesar de ter adquirido energia livremente de outro agente, ainda deve efetivar o CUSD com a permissionária de sua região. (RECH, 2019).

E também, conseqüentemente pagar o TUSD para a mesma, pela taxa de uso da rede de distribuição, necessário para o manutenção da qualidade das redes e das instalações de fornecimento de energia, porém, com o objetivo de promover fontes alternativas na geração de energia elétrica, a legislação brasileira aprovou a Lei nº 9.427 (BRASIL, 1996), permitindo que empreendimentos que utilizem fontes renováveis, como pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), hidrelétricas de até 1000 kW, energia solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada, possam abater até 50% do valor da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) durante suas operações comerciais. (RECH, 2019).

Isso estimula o investimento nesse segmento do mercado de energia, a Figura 2 traz um comparativo entre ACL e ACR.

Figura 2: Composições de Custo ACR e ACL



Fonte: Reginaldo Medeiros (2019)

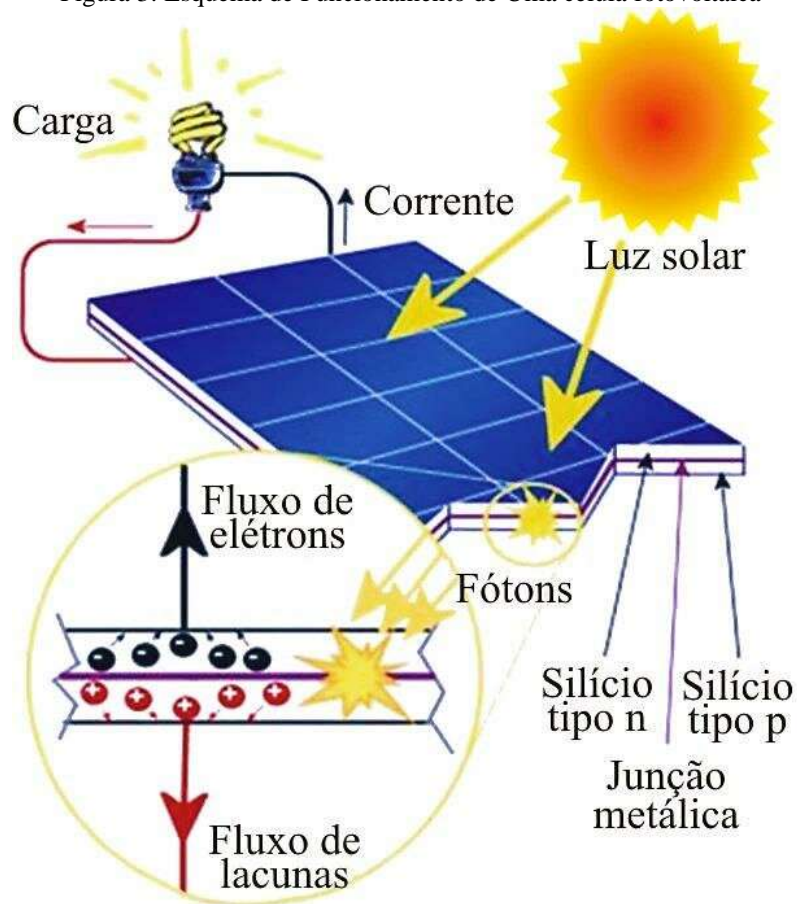
2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR

A busca pela sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais são preocupações globais, especialmente no que se refere às fontes de energia. A dependência contínua de recursos não renováveis, como o petróleo, pode esgotar os recursos naturais em 50 anos. A

energia solar fotovoltaica é uma alternativa promissora, pois é limpa, compacta e de baixa manutenção. O Brasil, com seu alto nível de irradiação solar, tem potencial para explorar essa fonte de energia. Embora os custos iniciais sejam elevados, esforços estão sendo feitos para tornar essa tecnologia mais acessível (ESPOSITO; FUCHS, 2013 ; SILVA; ARAÚJO, 2022).

Ao longo da história, a evolução da célula fotovoltaica passou por diversos marcos. Em 1883, a primeira célula fotovoltaica feita de selênio tinha apenas 1% de eficiência. Avanços significativos ocorreram em 1941, quando Ohl criou a primeira fotocélula de silício monocristalino, e em 1954, quando pesquisadores nos Estados Unidos desenvolveram células de silício monocristalino com uma eficiência de 6%. Em 1959, novos métodos de crescimento de cristais de silício foram desenvolvidos, reduzindo os custos de produção de células solares. A teoria da junção P-N de Shockley e a explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein também contribuíram para o avanço da tecnologia fotovoltaica (ALVES, 2019).

Figura 3: Esquema de Funcionamento de Uma célula fotovoltaica



Fonte: Voudoukis (2018)

As células fotovoltaicas tiveram seu início de uso nas décadas de 1960 e 1970, principalmente em satélites, devido à corrida espacial entre os EUA e a URSS. Hoje, países com avançada tecnologia espacial continuam a empregar a energia solar para suprimento energético em missões espaciais. Pesquisas continuam a ser realizadas visando aprimorar a eficiência das células fotovoltaicas sem prejudicar o meio ambiente (ALVES, 2019).

A ANEEL aprovou a Resolução Normativa no 482/2012, em que se estabelece condições para a minigeração e microgeração de energia elétrica, por meio de fontes renováveis de energia. Além do conceito de mini e microgeração, a ANEEL também estabelece normas para operação de sistemas de compensação de energia elétrica e para ligação de fábricas a distribuidoras, isso abriu as portas para grandes usinas fotovoltaicas que são implantadas em várias regiões do Brasil, com destaque para o Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste (ALVES, 2019).

A geração distribuída envolve a produção de energia elétrica no local de consumo ou nas suas proximidades, permitindo que o consumidor injete ou receba energia diretamente da rede da distribuidora, tornando-se uma alternativa vantajosa ao aproveitar recursos abundantes, como a energia solar, e promover o uso de fontes renováveis de energia, tudo isso próximo aos centros de consumo de eletricidade. (ESPOSITO; FUCHS, 2013 ; SILVA; ARAÚJO, 2022 ; ALVES, 2019; NAKABAYASHI, 2014).

2.5 AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA

Autoprodutores de energia são consumidores que geram sua própria eletricidade, seja integral ou parcialmente, adquirindo ou construindo usinas, inclusive fotovoltaicas. Existem duas formas de arranjos para autoprodutores: a geração e consumo no mesmo local (*in situ*) ou a geração distante do consumo, envolvendo o uso de redes de transmissão/distribuição. Essa prática é comum em consumidores conectados em média ou alta tensão, tipicamente empresas de grande porte, como indústrias (FLESCHE et al., 2022).

Os consumidores que optam pela autoprodução devem ajustar seu Sistema de Medição e Faturamento (SMF), o que geralmente envolve a substituição de transformadores de instrumentação, os Transformadores de Corrente e Transformadores de Potencial. A adaptação das proteções e a instalação de comunicações e configurações de internet e comunicação com o CCEE, em resumo a adequação do SMF é uma exigência regulatória para facilitar a

comunicação de dados da distribuidora com a CCEE. O agente autoprodutor se torna o agente de medição perante a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), assumindo responsabilidades que antes eram da distribuidora. Cada distribuidora pode ter seus procedimentos e obrigações específicos para consumidores interessados em aderir à autoprodução de energia (FLESCH et al., 2022).

Através da Autoprodução de Energia (APE), os geradores assumem o risco de preço e a garantia de suprimento energético, resultando em redução de custos e maior competitividade nas operações. Isso permite que as empresas sigam uma política interna de produção e consumo de energia, ampliando seu controle sobre esse recurso e agregando valor estratégico aos produtos. A APE pode ser implementada fisicamente junto à carga ou remotamente, onde a geração e o consumo ocorrem em locais separados, implicando no uso custoso de redes de transmissão/distribuição (CUNHA, 2022).

Um modelo de negócios comum para a Autoprodução de Energia (APE) envolve o consumidor investir na construção de uma usina geradora exclusiva para seu uso, localizada em suas instalações de produção ou em outro local de sua escolha. As vantagens incluem isenções de encargos setoriais, como a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), sobre a energia consumida internamente. Além disso, a energia excedente pode ser vendida no mercado. Como o consumidor é o proprietário da usina, não são necessários contratos de fornecimento de energia, garantindo previsibilidade de custos e controle operacional. Esse modelo é adequado para consumidores com alta demanda energética que buscam previsibilidade de custos e evitam a volatilidade de preços e incertezas no fornecimento (CUNHA, 2022).

Diferente das gerações distribuídas, que geram créditos energéticos perante à concessionária, autoprodutores de energia elétrica podem vender o excedente de energia gerada em casos específicos e sempre é relacionado ao Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) que é relacionado à hora do dia e é calculado pela CCEE, no entanto, a venda envolve custos de participação, bem como obrigações de contabilidade e liquidação financeira, tornando o processo mais viável para aqueles que conseguem produzir consistentemente mais do que as suas necessidades e têm um excedente significativo de energia (SOUZA, 2022).

3 METODOLOGIA

Neste item, será abordada a metodologia a ser aplicada no estudo de caso, abordando os seguintes tópicos: o dimensionamento da usina fotovoltaica, as alterações requeridas para a migração do cliente para o mercado livre de energia e os ajustes essenciais para a transição do cliente para um status de autoprodutor de energia elétrica. Esta análise tem o objetivo de oferecer uma compreensão abrangente do processo e das exigências presentes em cada possibilidade, que será aplicada no estudo de caso.

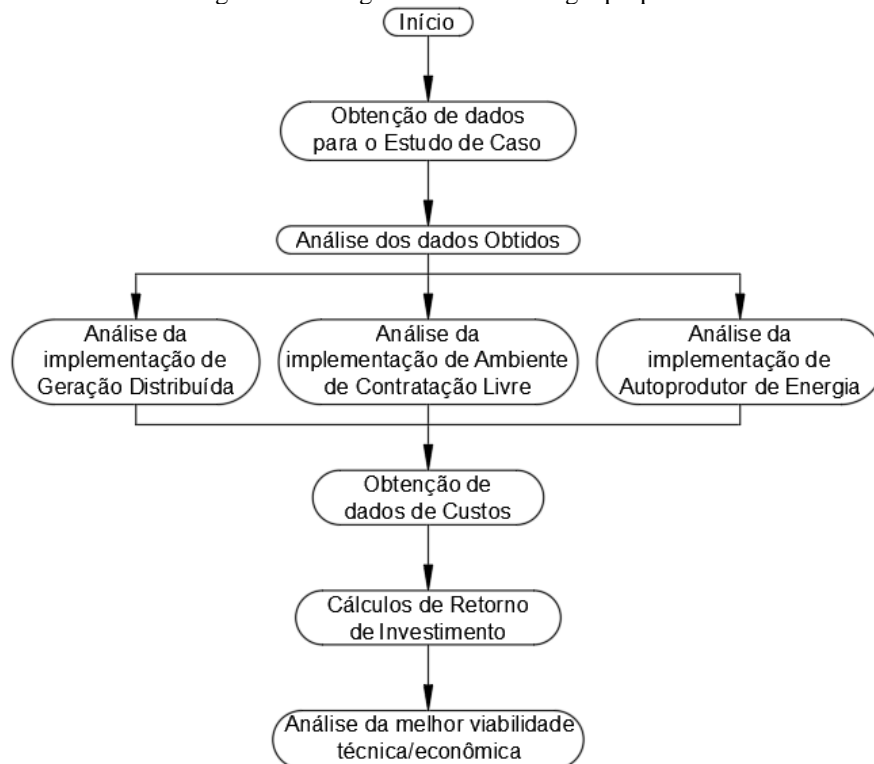
Para auxiliar na compreensão, a pesquisa foi organizada em etapas sequenciais que abordam desde o início do estudo até a avaliação final dos resultados. Abaixo, estão apresentadas descrições com mais detalhes de cada etapa do delineamento como também, tem-se a Figura 4, que demonstra de forma simples o fluxograma da metodologia proposta.

A primeira etapa envolve o planejamento do estudo onde são definidas as etapas de objetivos, escopo e metodologia. Além de incluir a revisão bibliográfica, com o objetivo de identificar lacunas no conhecimento e demonstrar qual é o atual estado das técnicas de diminuição no custo de energia elétrica.

Dados de consumo de energia elétrica e de precificação, são analisados a partir de faturas de consumo de energia e também de informações históricas da CCEE e concessionárias. Esses dados fornecem informações detalhadas sobre os padrões de uso de energia, e possibilitam os dimensionamentos e coleta de orçamentos.

Com base nos dados coletados, é desenvolvido o estudo de caso e conseqüentemente o cálculo do retorno financeiro é possível de ser realizado, com isto é possível chegar à conclusão final deste estudo.

Figura 4: Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: O autor (2024)

3.1 ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA

A caracterização do perfil de consumo do consumidor, também os dados de consumo, localização do empreendimento e demais dados que podem ser obtidos na referida fatura. É necessária a análise desta, para a obtenção da demanda contratada pelo cliente, as tarifas de energia, bem como a média do consumo anual em horário de ponta em horário fora de ponta.

Também é importante uma visita ao consumidor, para a obtenção de dados do padrão de entrada existente, melhor posição para usina fotovoltaica, entre outras questões a serem alinhadas, para ser possível as análises de viabilidades técnicas e econômicas subsequentes.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Para a instalação de um sistema de geração fotovoltaica, é preciso realizar o dimensionamento do sistema de painéis e inversores solares. Para este dimensionamento deve-se ter a potência de geração necessária, a irradiância e as perdas do sistema (KIKUMOTO, 2019; NAKABAYASHI, 2014).

A partir da fatura de energia, é possível extrair os dados de consumo de energia elétrica. O cálculo da energia necessária para ser gerada pelo sistema, é executado através do fator de correção, para se obter a energia consumida no horário de ponta, de tarifa fora de ponta (pois a geração solar se dá no horário fora de ponta que, conforme a Resolução Homologatória N° 3.206, de 13 de Junho de 2023, para consumidores dentro da área de concessão da RGE, é das 18 horas e 00 minutos e as 20 horas e 59 minutos), ou seja, calcula-se o fator de correção (FC), através da divisão entre os valores de TE Ponta e TE Fora Ponta, conforme a Equação 1 (ANEEL, 2016).

$$FC = \frac{TE\ Ponta}{TE\ Fora\ Ponta} \quad (1)$$

Com o valor do fator de correção pode-se calcular a geração total necessária para suprir todo o consumo deste cliente, baseando-se nos consumos médios de ponta e fora ponta, a geração diária pode ser calculada com a Equação 2 (ANEEL, 2016).

$$Geração\ Necessária\ Dia = \frac{Cons.\ Médio\ F.\ Ponta + (FC \times Cons.\ Medio\ Ponta)}{30\ dias} \quad (2)$$

Para calcular a potência CC do sistema, deve-se dispor da irradiância que é a potência da radiação solar recebida por unidade de área. Ela é medida em quilowatts por metro quadrado (kW/m²) e representa a quantidade de energia solar que incide em uma superfície, que deve ser obtida no Atlas solar do estado onde está situado o cliente, ou município, caso tenha.

No sistema, também deverá ser considerado 15% de perdas técnicas CC, isso inclui perdas em condutores, inversores e sombreamento.

Também deverá ser considerado um sobredimensionamento do sistema (*overload*), de 25%, visando otimização do sistema durante o período com incidência solar e também a diminuição no impacto da degradação natural dos módulos fotovoltaicos, valor adotado com base em médias de *overloads* nas folhas de informação (*datasheets*) dos inversores da marca Fronius.

A Equação 3 têm-se o cálculo da potência do sistema fotovoltaico em corrente contínua (CC) (MELO, 2020).

$$Potência_{CC} = \frac{Geração\ Necessária}{[irradiação\ diária \times (100\% - 15\% \text{ de perdas})]} \quad (3)$$

Para calcular a potência do sistema em corrente alternada (CA), deve-se utilizar o percentual de sobredimensionamento do sistema, citado anteriormente, sendo este, um valor de 25%, a Equação 4 descreve este dimensionamento:

$$Potência_{CA} = \frac{Potência_{CC}}{(100\% + 25\%)} \quad (4)$$

Através da Equação 4, têm-se o dimensionamento e a potência do inversor e do sistema fotovoltaico necessário para atender a demanda energética do consumidor. Para dimensionar um sistema fotovoltaico de forma adequada, é fundamental considerar as características do local de instalação, a demanda energética específica do consumidor, a escolha dos equipamentos mais apropriados e a garantia da segurança e eficiência da instalação. O dimensionamento deve ser realizado por profissionais qualificados e com experiência em sistemas fotovoltaicos, visando otimizar o desempenho do sistema.

Para o cálculo de retorno de investimento (*payback*) do sistema fotovoltaico é necessário um orçamento das instalações para suprir este cliente, conforme dimensionado com as fórmulas citadas anteriormente. A partir dessas estimativas, será construído o cenário de análise, o qual deve contemplar a instalação deste sistema, incluindo projetos quadros de proteção e regularização junto a concessionária.

Para o cálculo do *payback* da geração distribuída solar é necessária a modelagem deste sistema em um *software* específico para geração solar, calculando-se a geração de energia anual e posteriormente quanto a unidade consumidora deixará de consumir da rede da concessionária. A gerada pode ser multiplicada pelo valor da tarifa de energia fora ponta, obtendo-se o valor em reais da redução de despesas com energia. Para este cálculo deve ser considerado também um valor de manutenção anual do sistema, trazendo assim uma economia líquida, pós despesas do sistema.

Com esta redução de despesas anual, pode-se calcular o tempo em que a economia irá superar o custo da implementação do sistema, que se dará com o custo de investimento dividido

pela redução de despesas anual, analisa-se o valor total da geração e não o valor da fatura de energia, pois neste tipo de implementação, a energia excedente gerada pelo sistema, será computada como crédito perante a concessionária de energia. O *payback*, em anos, pode ser vislumbrado na Equação 5.

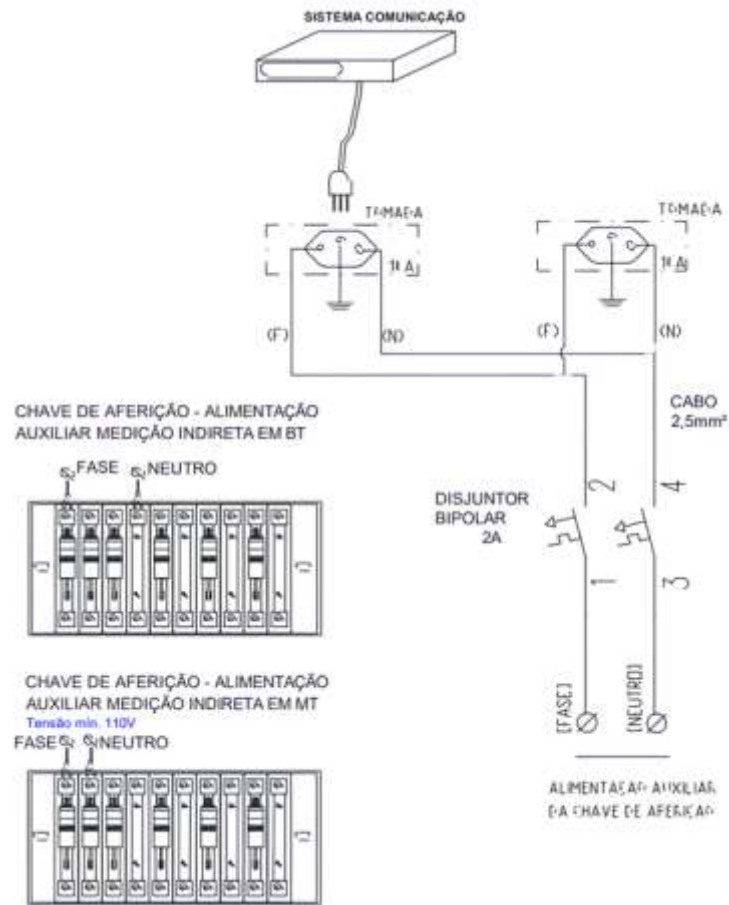
$$\textit{Payback} = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Economia Líquida Anual}} \quad (5)$$

3.3 ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE

A adequação do sistema de faturamento e medição em ambiente de contratação regulada, para o ambiente de contratação livre, se dará, com a instalação de certos componentes no padrão de medição do cliente, os quais, dependerão do padrão adotado no local. O padrão existente deverá estar em conformidade a norma técnica da RGE/CPFL, GED 2861.

O caso a ser estudado, tem os componentes necessários em um sistema de medição em ambiente regulado, para a adequação ao mercado livre de energia, deve-se fazer alterações na disposição dos equipamentos internos da mesma, além de instalação de novos componentes, conforme a Figura 5, que se refere desenho 33 do GED 2861.

Figura 5: Adequações a serem executadas na caixa de medição do cliente



Fonte: CPFL (2022)

Analisando estas adequações a serem realizadas, percebe-se a simplicidade de instalação destes equipamentos, sendo apenas necessária a instalação de um disjuntor bipolar de 2 *ampères* (A) e de tomadas internas à caixa de medição, para alimentação elétrica dos equipamentos de medição e comunicação com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), o que pode até ser realizado dentro da caixa de medição existente do cliente, se esta, estiver no padrão da concessionária local.

Assim, após a análise das adequações, é necessária a solicitação de um orçamento desta adequação, para que se tenha o custo destas instalações a serem realizadas e, assim, seja possível calcular o retorno sobre o investimento.

Além das informações sobre custos de adequação, no cálculo de retorno de investimento, é necessário a informação de custo de energia elétrica no ambiente de contratação livre, o que pode ser consultado no site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fazendo uma média dos custos de energia por mega watt-hora (MWh), realizados no leilão de energia, de fontes incentivadas, que aconteceu em outubro de 2022, sendo que este suprimento

de energia será iniciado em 2027 (A-5) sendo que a média do valor por MW deste leilão, foi de 252,35 R\$/MWh, conforme Figura 6.

Figura 6: Custos de energia elétrica em fontes incentivadas

Fonte	Rio/Fonte	Potência Habilitada (MW)	Preço de Lance (R\$/MWh)
PCH	dos Cedros	24,000	279,54
PCH	Verde	29,788	279,45
PCH	Jaguariaíva	18,150	278,89
PCH	CAVERNOSO	6,480	276,69
PCH	dos Patos	6,000	277,42
CGH	ENGANO	4,948	279,26
PCH	Iapó	12,833	275,40
PCH	DO PEIXE	5,996	279,50
PCH	CÓRREGO DO SALTO	5,200	277,44
CGH	ANTONINHA	3,664	277,40
PCH	Córrego da Pratinha	10,000	277,46
EOL	Cinética do Vento	41,580	175,00
EOL	Cinética do Vento	48,510	175,00
EOL	Cinética do Vento	25,200	178,00
UFV	Radiação Solar Global	64,627	170,70
UFV	Radiação Solar Global	64,627	171,95
UFV	Radiação Solar Global	57,000	172,20
UFV	Radiação Solar Global	57,782	171,20
BION	Bagaço de Cana de Açúcar	10,000	211,80
BION	Bagaço de Cana de Açúcar	15,000	211,50
RSUN	Resíduo Sólido Urbano	17,500	603,50

Fonte: CCEE (2022)

Tendo as informações citadas anteriormente, pode-se calcular o retorno de investimento desta opção de instalação, o cálculo se dá da análise dos custos de energia elétrica atualmente aplicados no mercado cativo de energia, atualmente praticados pela distribuidora, custo de implantação do sistema de faturamento em livre mercado e também a análise da variação do custo de energia comparando o modelo atual e o novo (CARDOSO; ROCHA, 2017).

Conforme análise e obtenção dos dados da fatura a ser realizado, conforme o subitem 3.1, tem-se o valor da tarifa de energia em horário de ponta e a média do consumo em horário de ponta, também se analisa a tarifa TE Fora de ponta e a média de consumo em horário fora de ponta, para calcular o quanto custa o MWh deste cliente no ambiente regulado, é necessário

utilizar Equação 6 (multiplica-se por 1000 para transformar o quilo (k) em mega (M)), conforme demonstrado na Equação 6.

$$Custo\ ACR = \left(\frac{Cons.\ Ponta \times TE_{Ponta} + Cons.\ F.\ Ponta \times TE_{Fora\ Ponta}}{Cons.\ Ponta + Cons.\ Fora\ Ponta} \right) \times 1000 \quad (6)$$

Ao analisar a fatura de energia, pode-se analisar também, o consumo anual do cliente, que deve ser usado para calcular o *payback* da migração para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), sendo necessário comparar o custo de energia do ambiente regulado com o custo de contratação no ACL, levando em conta também os custos de adequação para a mudança, conforme demonstrado na Equação 7:

$$Diferença\ de\ Custos = Custo\ ACR - Custo\ ACL \quad (7)$$

Fazendo uma projeção, de que este consumidor irá consumir novamente a mesma quantidade de energia anual, tem-se que a diferença em reais é simplesmente a diferença de custos multiplicada pelo consumo anual, analisando com o custo de implantação do ACL, o *payback* se dará a partir desta relação entre custo de adequação e a economia anual. Pode-se fazer uma prospecção de 10 anos à frente, que é, em média, o tempo de vida útil de um inversor solar, de quanto o consumidor deixaria de gastar neste período, considera-se também, uma inflação (aumento do custo de energia, referente à impostos) de 5% anuais (inflação média considerada).

3.4 ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O ACL COMO AUTOPRODUTOR

Quando se trata de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, geralmente está associado à geração distribuída. Porém, ao tratar de consumidores livres, a regulamentação ainda o coloca na categoria de geração distribuída, principalmente no que diz respeito às potências incluídas neste modelo. Para um consumidor livre é necessário que ele se torne um Autoprodutor de Energia (APE). É importante ressaltar que esse tipo de geração de energia (APE) permite apenas injeções ocasionais e momentâneas de energia na rede. Ao contrário dos Ambiente de Contratação Regulada (ACR) onde os geradores participam de mecanismos de compensação de energia. Como o Autoprodutor está inserido no Mercado Livre de Energia, ele pode contratar energia diretamente de fontes geradoras, incentivadas ou não, para suprir uma

eventual diferença de energia necessária para os momentos onde não há geração de energia solar. Portanto, ao dimensionar sistemas fotovoltaicos para consumidores livres na modalidade APE, é preciso focar no consumo instantâneo e não considerar a injeção na rede distribuidora como parte do processo (AGUIAR NETO, 2022).

A migração para o ACL, como autoprodutor de energia elétrica (APE), se dá com certos processos a serem seguidos, como a análise da demanda contratada, revisão dos contratos com Distribuidora e associação à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), também a instalação de um SMF específico para este fim e suas instalações técnicas (FLESCH, 2024).

Para este tipo de instalação, são necessárias alterações no padrão de medição, conforme normativa da concessionária de energia local, conforme a norma, neste estudo apenas está sendo considerado a adequação do sistema de medição para o padrão adotado na concessionária de energia, instalação de equipamentos específicos e também o comissionamento da medição com o CCEE, não sendo considerados os valores de possíveis multas por rescisões de contratos atualmente em vigor com a distribuidora de energia, sendo eles o Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) e o Contrato de Compra de Energia Regulada (CCER) (FLESCH, 2024).

O sistema Grid Zero é proposto nesta instalação, para evitar a injeção de excesso de energia na rede elétrica. Ao contrário do modelo em ACR, onde os excedentes são convertidos em crédito pelo consumidor, o *grid zero* limita a produção para que só possa ser consumida localmente. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é direcionada ao painel de distribuição, abastecendo diretamente os equipamentos da unidade consumidora (SOUZA, 2022).

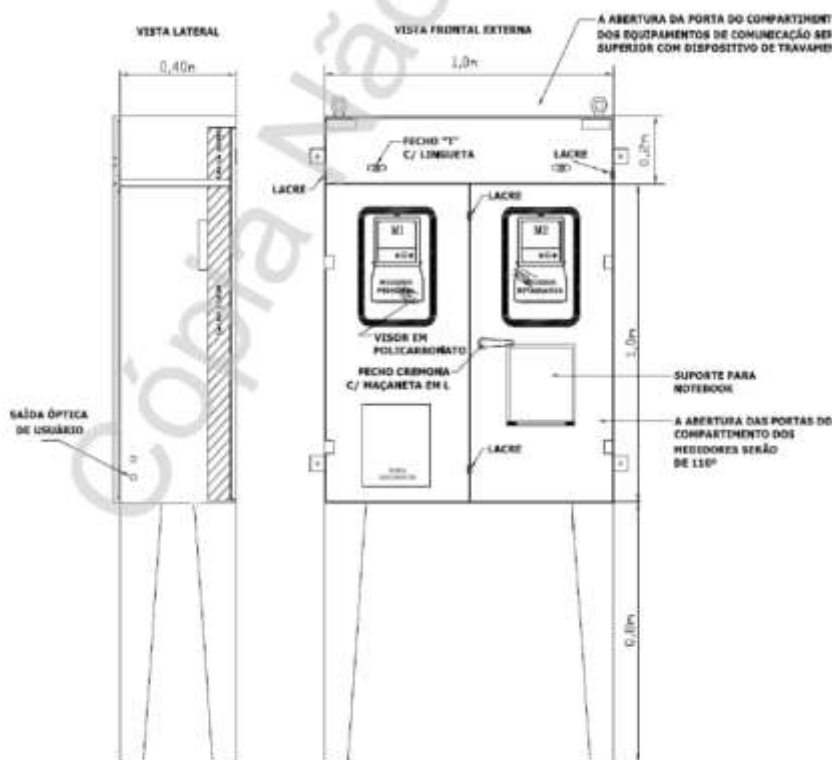
Esse tipo de sistema utiliza um inversor inteligente que ajusta a quantidade de energia produzida com base na demanda imediata, o que permite que a produção atenda exatamente ao consumo necessário naquele momento. É ideal para clientes que pretendem otimizar o seu autoconsumo e reduzir a dependência da rede pública sem modificar os contratos celebrados com a concessionária. Além disso, o sistema pode operar em conjunto com um modelo de rede, o que oferece flexibilidade para quem quer garantir autonomia e maximizar a economia no mercado livre de energia (SOUZA, 2022).

Para esta aplicação, é necessário a caracterização de carga do cliente e consumo diário do cliente, pois é preciso saber a potência necessária para a geração fotovoltaica a ser instalada, esta informação se dá com as leituras de consumo do cliente. Analisando este consumo diário, pode se dimensionar a potência do inversor solar, para a geração fotovoltaica, será necessário o dimensionamento de uma usina solar padrão em *software* específico para geração solar, com

esta instalação dimensionada, pode-se gerar uma curva característica de geração de uma geração fotovoltaica, no município do consumidor, o dimensionamento do inversor de CC-CA, será de maneira semelhante ao disposto no item 3.2.

Para a migração desta medição para o ACL em condição de autoprodutor de energia é necessária a adequação do padrão de medição existente, para o padrão descrito no GED-17321 da CPFL, datado em 28/10/2024, que diz: “O Autoprodutor [...] é o responsável por elaborar o projeto, bem como instalar, operar, manter e arcar com a responsabilidade técnica e financeira do sistema de medição da unidade.”, ou seja, todos os equipamentos necessários para o Sistema de Medição para Faturamento são de responsabilidade do cliente/autoprodutor, inclusive equipamentos que são de fornecimento da concessionária em uma instalação ACR, como Transformadores de Potência (TP) e Transformadores de Corrente (TC), bem como o medidor bidirecional que deve ter disposição para a comunicação com o CCEE, bem como uma caixa de medição específica, conforme o mesmo GED supracitado, na página 12, representado na Figura 7.

Figura 7: Caixa de Medição Padrão Autoprodutor de energia elétrica



Fonte: CPFL (2024)

Analisando as adequações citadas anteriormente, percebe-se uma grande alteração necessária nesta aplicação, além da instalação dos Transformadores de Instrumentação (TI), da caixa de medição e do medidor de energia específico, também é necessária a instalação de ponto

de rede para comunicação com a CCEE, comissionamento e parametrizações dos equipamentos em questão.

Tendo os custos de adequações e instalação da usina fotovoltaica, pode-se calcular o retorno de investimento desta opção de instalação, o cálculo se dá da análise dos custos de energia elétrica atualmente aplicados no mercado cativo de energia, o custo de implantação do sistema de faturamento em livre mercado como APE e também a geração de energia elétrica proveniente da usina fotovoltaica.

Conforme análise e obtenção dos custo de energia por MWh realizado no item 3.3, tem-se que o custo de energia em MWh para ambiente regulado de energia é de R\$ 365,27.

Para esta análise é necessário o cálculo de quanto é a geração de energia elétrica por dia e o cálculo do consumo energético diário, que deverá ser dado em formato de gráfico, e, por se tratar de um gráfico enquadrado apenas no quadrante positivo, pode-se assumir que esta representação é um polígono, sendo assim, a área deste polígono é a energia gerada ou demandada no período diário. A Equação 8 demonstra o cálculo da energia produzida e a Equação 9 descreve a formulação para a energia demandada pela instalação, referente a um dia:

$$Energia\ Total\ Gerada\ Diária = \sum_{h=1}^{23} \frac{(G_h \times G_{h+1})}{2} \quad (8)$$

$$Energia\ Total\ Demandada\ Diária = \sum_{h=1}^{23} \frac{(C_h \times C_{h+1})}{2} \quad (9)$$

O retorno de investimento desta opção de redução de custos pode ser calculado se baseando no cálculo do *payback* da Equação 5, ou seja, a redução de custos da energia gerada pela usina solar, o cálculo da diminuição do custo na energia contratada no mercado livre de energia pode ser dado da mesma maneira que exposto no subitem 3.3, estas duas economias, podem ser somadas, para compor a redução de gastos anual, sendo assim, pode-se calcular o retorno de investimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será apresentado o estudo de caso, abordando os seguintes tópicos: o dimensionamento da usina fotovoltaica, as alterações para a migração do cliente para o mercado livre de energia e os ajustes para a transição do cliente para um autoprodutor de energia elétrica.

4.1 ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA

O caso a ser estudado se refere à uma unidade de recebimento e beneficiamento de grãos (agroindústria), localizada em Eugênio de Castro, na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, área de concessão da Rio Grande Energia (RGE), esta instalação foi escolhida com base em suas características de consumo, demanda e disponibilidade para estudo. Na Figura 8, apresenta-se a fatura de energia elétrica da referida unidade consumidora:

Figura 8: Fatura de Energia Elétrica

Descrição da operação Nº	Unid. Med.	Quant. Faturada	Tarifa ANEEL	Tarifa com tributos R\$	Valor total da operação R\$
Consumo Ponta [KWh] - TUSD JUL/24	KWh	200,8283	1,80398000	2,03830835	409,35
Consumo Fora Ponta [KWh]-TUSD JUL/24	KWh	3.165,6203	0,09421000	0,11971746	378,98
Cons Ponta - TE JUL/24	KWh	200,8283	0,43385000	0,55106776	110,87
Cons FPonta TE JUL/24	KWh	3.165,6203	0,27825000	0,35105285	1.111,30
Demanda [kW] - TUSD JUL/24	kW	86,8134	25,68000000	32,63344139	2.833,02
Subtotal					5.286,60
Total de Devoluções					61,62
Total a Pagar					5.348,22

Grandezas contratadas	
Demanda kW	100

Consumo Ponta - [KWh]		Nº DIAS FAT	
JUL 24	200,00	31	
JUN 24	183,00	30	
MAI 24	350,00	31	
ABR 24	1115,00	30	
MAR 24	264,00	31	
FEV 24	103,00	29	
JAN 24	95,00	31	
DEZ 23	78,00	31	
NOV 23	194,00	30	
OUT 23	191,00	31	
SET 23	75,00	30	
AGO 23	107,00	31	
JUL 23	124,00	31	

Consumo Fora do Ponta - [KWh]		Nº DIAS FAT	
JUL 24	3165,00	31	
JUN 24	5538,00	30	
MAI 24	6206,00	31	
ABR 24	9287,00	30	
MAR 24	2735,00	31	
FEV 24	1467,00	29	
JAN 24	1801,00	31	
DEZ 23	1452,00	31	
NOV 23	1887,00	30	
OUT 23	1768,00	31	
SET 23	1317,00	30	
AGO 23	1704,00	31	
JUL 23	2110,00	31	

Demanda - [kW]		Nº DIAS FAT	
JUL 24	86,00	31	
JUN 24	100,00	30	
MAI 24	89,00	31	
ABR 24	119,00	30	
MAR 24	48,00	31	
FEV 24	24,00	29	
JAN 24	22,00	31	
DEZ 23	10,00	31	
NOV 23	24,00	30	
OUT 23	27,00	31	
SET 23	56,00	30	
AGO 23	23,00	31	
JUL 23	58,00	31	

Fonte: O autor (2024)

Conforme análise e obtenção dos dados da fatura anteriormente demonstrada, tem-se que a demanda contratada é de 100kW (de acordo com a Figura 08), a tarifa de energia em horário de ponta é R\$ 0,55106776 por kWh consumido e a média do consumo em horário de

ponta é 236,85kWh, tarifa TE Fora de ponta é R\$ 0,35105285 por kWh e a média de consumo em horário fora de ponta é de, em média, 3095,15kWh.

Realizou-se uma visita ao consumidor, para analisar o padrão de entrada de energia existente no local, para ser possível as análises de viabilidades técnicas e econômicas subsequentes.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Na fatura de energia, foi possível a extração da informação de consumo de energia, para o cálculo da energia necessária a ser gerada pelo sistema, é necessário calcular o fator de correção (FC), que é a aplicação da Equação 1, citada no item 3.2.

$$FC = \frac{0,55106776}{0,35105285} = 1,5698$$

Com este valor de fator de correção pode-se calcular a geração total necessária, se baseando nos consumos médios de ponta e fora ponta, esta geração diária, pode ser calculada com a Equação 2.

$$Geração\ Necessária = \frac{3095,15kWh. + (1,5698 \times 236,85kWh)}{30\ dias} = 115,565kWh/dia$$

Para calcular a potência CC do sistema, deve-se dispor da irradiância que é o nível de irradiância solar recebida por unidade de área, que, segundo o Atlas solar do estado do Rio Grande do Sul, a irradiância de Eugênio de Castro, varia durante o ano entre 4,5 e 5,0kW/m²/dia (Camargo Schubert Engenheiros Associados et al., 2018). Para o cálculo a ser realizado, será utilizado a média destes dois valores, que é de 4,75kW/m² por dia. Conforme a metodologia, será considerado 15% de perdas técnicas CC e considerado um *overload* de 25%, a potência CC será dada pela aplicação da Equação 3, conforme abaixo:

$$Potência_{cc} = \frac{115,565kWh/dia}{[(4,75kW/m^2\ por\ dia) \times (100\% - 15\% \ de\ perdas)]} = 28,623kWp$$

Na Equação anterior, foi apresentado o cálculo da potência do sistema fotovoltaico em corrente contínua (CC). Para determinar a potência do sistema em corrente alternada (CA), é necessário considerar o percentual de *overload* do sistema, geralmente fixado em 25%. Utilizando a Equação 4, realiza-se este dimensionamento, e os cálculos subsequentes permitem determinar tanto a potência do inversor quanto a potência do sistema fotovoltaico necessária para atender às demandas do cliente.

$$Potência_{CA} = \frac{28,623kWp}{(100\% + 25\%)} = 19,9720kW$$

4.2.1 Custos de Implantação de um Sistema Fotovoltaico

No subtítulo anterior, foi dimensionado o sistema fotovoltaico necessário para suprir as necessidades energéticas mensais do referido cliente, com base nestas informações, buscou-se um levantamento de valores de instalação do referido sistema no cliente, com empresas da região, considerou-se o menor orçamento recebido para o projeto, encaminhamento com concessionária de energia, aprovação, fornecimento do Kit Solar, instalação e funcionamento (*startup*) desta instalação, bem como cálculos do sistema de proteção e esquemas elétricos, já que estes não são objetos deste estudo de caso.

O orçamento solicitado, incluía uma proposta técnica e comercial, de uma empresa do município de Ijuí, conforme o dimensionamento anteriormente calculado, o qual é composto por, 52 módulos fotovoltaicos de 550Wp Marca WEG, um Inversor trifásico 380V modelo SIW400G marca WEG, além dos demais equipamentos que compõem a instalação desta geração distribuída. A instalação deste sistema teve o custo conforme demonstra a Figura 9.

Figura 9: Custo de Implantação de Geração fotovoltaica

ESCOPO DE FORNECIMENTO

Implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica a ser instalada na cidade de Eugênio de Castro / RS, conforme especificações abaixo citadas.

1. FORNECIMENTO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS:

Compreende o fornecimento de mão de obra na elaboração de projetos Elétricos, sendo o projeto da geração fotovoltaica, desenvolvido em AutoCad 2D. Considerado o encaminhamento e aprovação do projeto na Concessionária de Energia.

2. FORNECIMENTO DE EQUIPAMENTOS:**KIT - SISTEMA DE 28,60 kW_p TELHADO:**

52 MÓDULOS MONOCRISTALINOS p-TYPE - 550W_p - WEG;
 01 INVERSOR TRIFÁSICO 380 V MODELO SIW 400G T020 W0 - WEG;
 01 MONITORAMENTO GATEWAY WEG - ED100
 04 PROTETOR DE SURTO CA SPW02-275-20;
 05 CONECTOR MC4 6mm²;
 13 ESTRUTURA PARA TELHADO METÁLICO - 04 MÓDULOS EM RETRATO

3. INVESTIMENTO**3.1 EQUIPAMENTOS:**

Descrição	Total (R\$)
- SISTEMA SOLAR 28,60 kW _p - QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO - PROJETO	R\$ 62.750,00
TOTAL DO INVESTIMENTO:	R\$ 62.750,00

Fonte: O Autor (2024)

4.2.2 Retorno de investimento para Geração Distribuída Solar

Para o cálculo do *payback* da geração distribuída solar, foi modelado o sistema no *software* neste caso foi usado o PVWatts® Calculator, para calcular a geração de energia anual e posteriormente quanto a unidade consumidora irá deixar de gastar em energia elétrica.

Ao dimensionar o sistema anteriormente citado, no *software* mencionado, obteve-se que esta instalação fotovoltaica irá gerar o montante de 31.162 kWh anual, o que, de acordo com o valor do kWh explicitado na fatura de energia exposta no item 4.1 (considerado o valor fora ponta), traria à unidade consumidora um a redução de despesas com eletricidade na ordem de R\$10.939,51 anual, para uma economia líquida, foi considerado um valor de manutenção do sistema (limpeza dos painéis fotovoltaicos, reaperto das conexões de equipamentos e conferência do funcionamento), no valor de R\$1000,00 por ano, o que resulta em uma economia líquida de R\$ 9.939,51 anual.

Com esta redução de despesas anual, pode-se calcular o tempo em que a economia irá superar o custo da implementação do sistema, ou seja, o *payback*, que se dá segundo a Equação 5.

$$\text{Payback} = \frac{62750,00}{9939,51} = 6,31 \text{ anos}$$

Estes 6,31 anos podem ser traduzidos em 6 anos e 4 meses, aproximadamente, para que esta instalação traga uma economia maior do que o investimento inicial, fazendo uma previsão para 10 anos, o valor que deixará de ser gasto, descontando o valor do investimento, será de aproximadamente R\$ 36.645,10. Foram desconsiderados as perdas por sujeira nos painéis fotovoltaicos e problemas técnicos pois já foram considerados anteriormente os custos para estas manutenções, trazendo assim, uma menor possibilidade de problemas que acarretem na interrupção da geração deste sistema.

4.2.3 Análise da Instalação de Geração Distribuída Solar

A parte técnica da instalação de uma GD é relativamente complexa, exigindo a aprovação do projeto e a posterior conexão da geração à rede de distribuição da concessionária. Esse processo demanda tempo, que, conforme informado pela empresa consultada para a elaboração do orçamento, pode variar entre 2 e 6 meses. Esse prazo depende da disponibilidade de equipamentos, materiais e do tempo necessário para as análises do projeto junto à concessionária.

Além disso, a instalação pode enfrentar entraves devido ao artigo 73 da Resolução Normativa da Aneel n° 1059, de 7 de fevereiro de 2023. Esse artigo estabelece que, caso a conexão de microgeração ou minigeração distribuída cause inversão do fluxo de potência no transformador da distribuidora, esta deve realizar estudos para mitigar o problema. Esses estudos podem atrasar ainda mais a instalação ou até mesmo resultar na redução permanente da potência injetável, comprometendo o sistema de geração e a compensação de créditos de energia previstos neste estudo. (ANEEL, 2023)

A análise de sustentabilidade de uma Geração Distribuída solar considera os impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo de seu ciclo de vida. Durante a fabricação, especialmente das placas fotovoltaicas, há alto consumo energético e emissão de poluentes devido à purificação do silício e uso de produtos químicos. Porém, a geração de energia é limpa, com zero emissões de poluentes, o que compensa a pegada ambiental no caso de substituição de fontes fósseis e comparado à hidrelétricas que alagam grande área de terra para construção de barragens e atrapalham o fluxo natural do rio. Apesar disto, enfrenta desafios relacionados ao descarte ao fim da vida útil do sistema e reciclagem ou reuso dos módulos fotovoltaicos.

4.3 ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE

A adequação do sistema de faturamento e medição em ambiente de contratação regulada, para o ambiente de contratação livre, se dá com a instalação de certos componentes no padrão de medição do cliente, os quais, dependerão do padrão adotado no local, o qual está demonstrado na Figura 10.

Figura 10: Padrão de medição instalado



Fonte: O Autor (2024)

O padrão existente é conforme a norma técnica da RGE/CPFL, GED 2861, desenho número 29 – 1/2, o qual mostra os componentes internos da caixa de medição e as ligações internas que são realizadas pela concessionária no momento de energização da unidade. Este desenho da norma está demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Desenho da norma do padrão de medição instalado



O caso em estudo, tem os componentes necessários em um sistema de medição em ACR, para a adequação ao ACL, deve-se fazer alterações na disposição dos equipamentos internos da mesma, além de instalação de novos componentes, conforme a Figura 5, no item 3.3.

Analisando estas adequações a serem realizadas, percebe-se a possibilidade de instalação destes equipamentos dentro da caixa de medição apresentada na Figura 10 e 11, sendo assim, a adequação será apenas a instalação destes equipamentos na medição do cliente.

4.3.1 Custos de Adequação do Sistema de Medição para Faturamento para Mercado Livre

Sendo uma adequação fácil de ser executada, foi solicitado um orçamento destas alterações, para uma empresa instaladora elétrica da cidade de Ijuí-RS, buscando um valor a ser considerado para esta adequação do sistema de medição do referido cliente, necessários para o cálculo de retorno de investimento, o qual está disposto na Figura 12.

Figura 12: Custo para adequação do sistema para faturamento em ACL

ESCOPO DE FORNECIMENTO:	
1. INSTALAÇÕES ELÉTRICAS:	
1.1 Subestação abrigada em alvenaria	
- Reorganização interna dos equipamentos da caixa de medição EXISTENTE e instalação de equipamentos novos necessários conforme diagrama recebido.	
2. INVESTIMENTO	
2.1 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS:	
Descrição:	Valor
• Material elétrico:	R\$ 1.958,15
• Mão de obra Instaladora e de Engenharia (encaminhamento de projeto + ART):	R\$ 2.541,85
TOTAL:	R\$ 4.500,00

Fonte: O Autor (2024)

Além das informações sobre custos de adequação, no cálculo de retorno de investimento, é necessário a informação de custo de energia elétrica no ACL, o que é de 252,35 R\$/MWh, conforme Figura 6 do item 3.3.

4.3.2 Retorno de investimento para Ambiente de Contratação Livre

Conforme análise e obtenção dos dados da fatura, tem-se que a tarifa de energia em horário de ponta é R\$ 0,55106776 por kWh consumido e a média do consumo em horário de ponta é 236,85kWh, tarifa TE Fora de ponta é R\$ 0,35105285 por kWh e a média de consumo em horário fora de ponta é de, em média, 3095,15kWh, para calcular o quanto custa o MWh deste cliente no ambiente regulado, é necessário utilizar a Equação 6.

$$Custo\ ACR = \left(\frac{236,85kWh \times R\$0,55106776 + 3095,15kWh \times R\$0,35105285}{236,85kWh + 3095,15kWh} \right) \times 1000$$

$$Custo\ ACR = 365,27\ R\$/MWh$$

Ao analisar a conta de energia (Figura 8, item 4.1), o consumo anual do cliente é de 41.082 kWh (41,082 MWh). Para calcular o *payback* da migração para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), é necessário comparar o custo de energia do ACR com o custo de contratação no ACL, levando em conta também os custos de adequação, conforme demonstrado abaixo, com a aplicação da Equação 7:

$$\text{Diferença de Custos} = 365,27 \text{ R\$/MWh} - 252,35 \text{ R\$/MWh} = 112,92 \text{ R\$/MWh}$$

Fazendo uma projeção, de que este consumidor irá consumir novamente a mesma quantidade de energia anual, a diferença de custo de energia é de R\$4.638,98 neste mesmo período de tempo, analisando com o custo de implantação do ACL, o *payback* se dá em aproximadamente um ano após a instalação do sistema. Fazendo uma prospecção de 10 anos à frente, conforme descrito na metodologia, a economia seria de aproximadamente R\$31.321,00 descontando já, o valor do investimento realizado.

4.3.3 Análise da Adequação para Ambiente de Contratação Livre

A parte técnica da adequação para o ACL é consideravelmente simples, sendo necessário o contato com a concessionária de energia, a qual irá passar as diretrizes para a adequação, o que se dará com as instalações dos equipamentos internamente à caixa de medição existente e solicitação de ligação para com a concessionária, o que demanda pouco tempo, por serem materiais e equipamentos relativamente simples e fáceis de encontrar no comércio de materiais elétricos, os trâmites com o CCEE, em geral são realizados pela concessionária de energia local e, portanto, não foram considerados neste estudo.

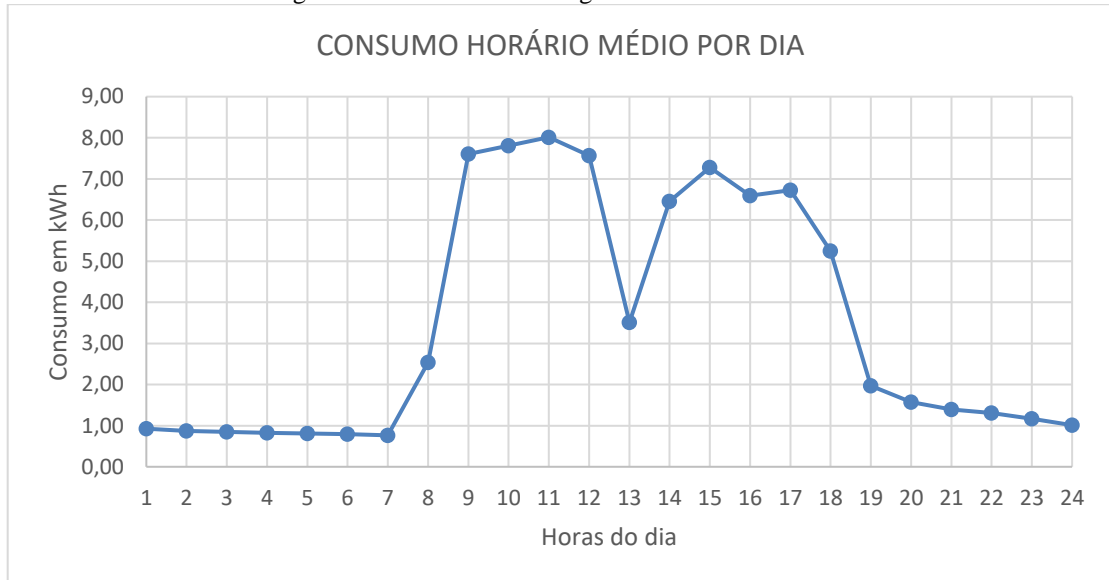
A análise ambiental de uma adequação para o Ambiente de Contratação Livre (ACL) destaca os benefícios associados à possibilidade de contratação de fontes incentivadas de energia limpa, como solar, eólica e biomassa. Ao adotar essas fontes, há uma redução nas emissões de gases de efeito estufa e menor impacto ambiental em comparação à outras formas de obtenção de energia elétrica. Economicamente, estas fontes incentivadas permitem reduzir custos, enquanto socialmente, o incentivo a energias renováveis promove o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e conseqüentemente maior lucro e investimento em energias limpas.

4.4 ADEQUAÇÃO DE MEDIÇÃO PARA O ACL COMO AUTOPRODUTOR

Para esta aplicação, é necessário a caracterização de carga do cliente e consumo diário anual do cliente, para dimensionar a usina fotovoltaica em Grid-zero, fazendo uma média de acordo com a época do ano, por ser um cliente com consumo sazonal. Esta informação não foi possível conseguir com a concessionária local do referido cliente, optou-se por utilizar dados que foram fornecidos pelo DEMEI, de outros consumidores com o mesmo estilo de carga e

ramo de atividade, sendo a curva média de consumo diária calculada e modelada conforme a carga e consumo do cliente deste estudo de caso, sendo, esta curva representada na Figura 13.

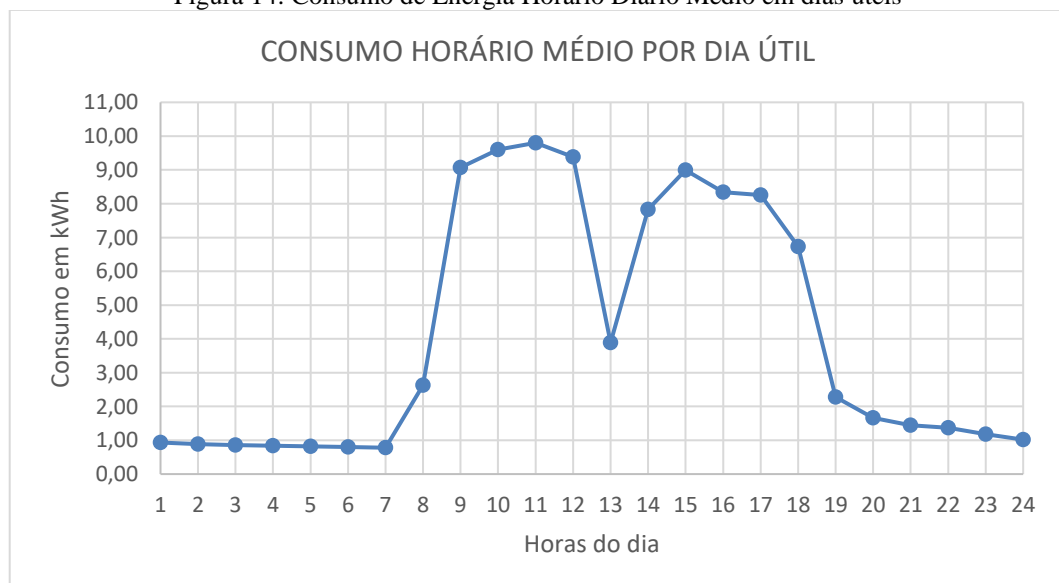
Figura 13: Consumo de Energia Horário Diário Médio



Fonte: O Autor (2024)

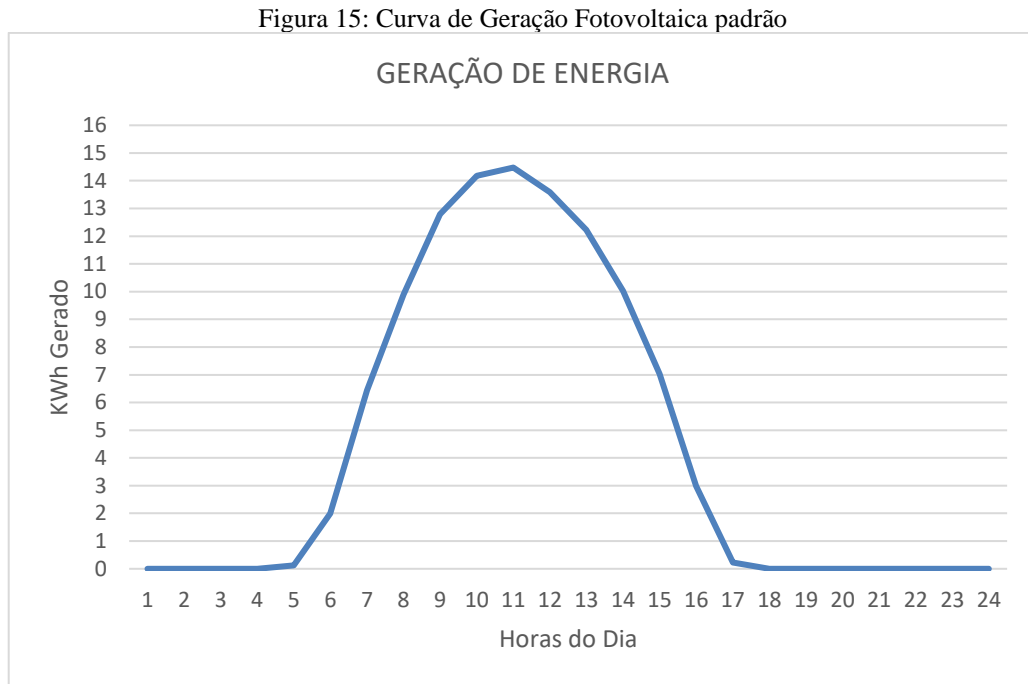
Analisando este consumo diário pode se dimensionar a potência do inversor solar, porém, para este caso onde é uma agroindústria, o maior consumo é durante a semana, ou seja, nos dias úteis e, para o dimensionamento deste sistema fotovoltaico, recomenda-se utilizar a curva de carga em dias comuns de trabalho, para que esta geração, supra toda a demanda energética nos momentos de maior consumo, a curva de consumo, em dias úteis é a Figura 14.

Figura 14: Consumo de Energia Horário Diário Médio em dias úteis



Fonte: O Autor (2024)

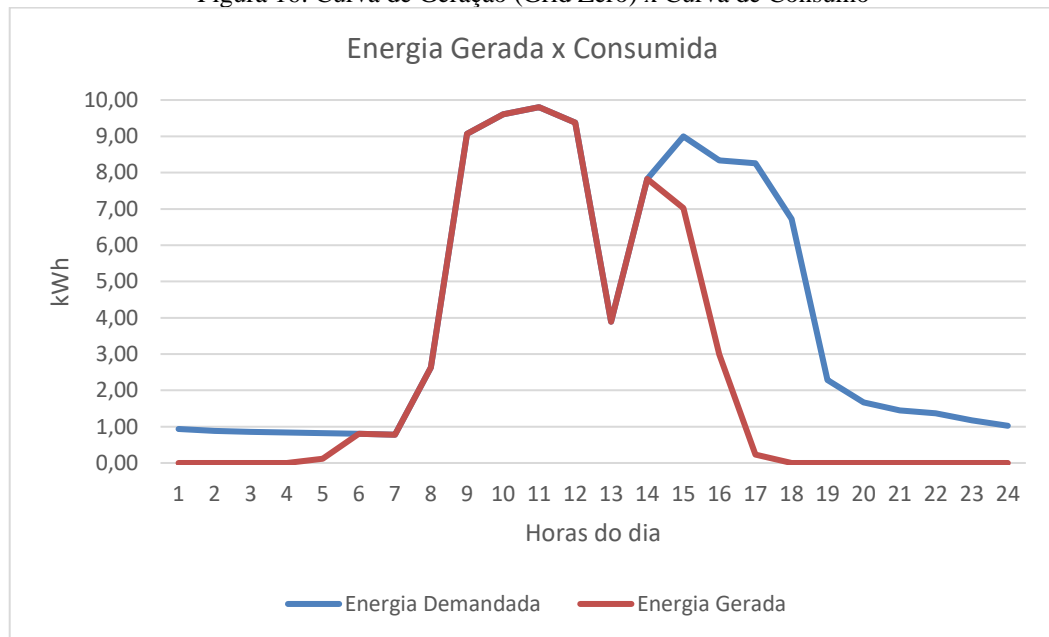
Para a geração fotovoltaica, foi necessário o dimensionamento de uma usina solar padrão no *software* on-line PVWatts® Calculator, com esta instalação dimensionada, pôde-se gerar uma curva característica de geração de uma geração fotovoltaica, no município de Eugênio de Castro, gerando a curva a partir do arquivo .csv disponibilizado neste site, têm-se esta curva característica exemplificada na Figura 15.



Fonte: O Autor (2024)

Ao sobrepor o gráfico de consumo e o gráfico de geração de energia, percebe-se uma grande geração durante o intervalo entre os dois turnos de trabalho, aproximadamente 12h às 14h, porém, neste horário é um horário sem consumo de energia por justamente ser o intervalo, novamente trazendo ao estudo, a necessidade de instalação da usina em formato *grid zero*. O gráfico apresentado na Figura 16, remete à esta sobreposição de curvas, já adaptando a curva de geração para o formato citado, também demonstrando a energia que é consumida mas não é gerada, esta, que é necessária a contratação de energia no mercado livre.

Figura 16: Curva de Geração (Grid Zero) x Curva de Consumo



Fonte: O Autor (2024)

Para o que se tenha estes níveis de geração de energia nestes determinados momentos é necessário a instalação da usina fotovoltaica com certa capacidade de geração para que esta, supra a demanda energética de maior parte do dia, conforme o gráfico apresentado anteriormente, para isto, é necessária a instalação de um sistema de 14,5kWp de geração, já demonstrado na Figura 15, o qual teve o sistema dimensionado e modelado pensando nesta potência de geração citada.

Retomando o cálculo de potência CA de uma instalação fotovoltaica, citado no item 3.2, especificamente a Equação 4, para solicitação de orçamento de usina fotovoltaica, é necessária esta potência que está calculada abaixo.

$$Potência_{CA} = \frac{14,5kWp}{125\%} = 11,60kW$$

Com o cálculo realizado acima, têm-se o dimensionamento e a potência do inversor e do sistema fotovoltaico necessário para atender a esta instalação em sistema *grid zero*.

4.4.1 Custos de Implantação do Sistema de Medição para Faturamento para Autoprodutor

No item 3.4, fala-se da adequação necessária no padrão de medição deste cliente, foi solicitado à uma empresa da cidade de Ijuí, um orçamento para esta adequação no padrão de medição, o qual, tem seu valor discriminado na Figura 17.

Figura 17: Custo de Adequação do Padrão de Medição para Autoprodutor

ESCOPO DE FORNECIMENTO:	
Adequação de medição de energia para Autoprodutor de Energia Elétrica, a ser instalada na cidade de Eugênio de Castro / RS, conforme especificações abaixo citadas.	
1. FORNECIMENTO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS:	
Compreende o fornecimento de mão de obra especializada na elaboração de projetos Elétricos, sendo o	
projeto desenvolvido em Auto Cad 2D, com detalhes da instalação em 2D e isométrico, encaminhamento e aprovação do projeto perante a concessionária.	
2. ALTERAÇÕES PARA FATURAMENTO DE ENERGIA EM AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE:	
2.1 Alterações na Medição de Energia:	
<ul style="list-style-type: none"> • Consta neste item os materiais e acessórios para instalação de uma nova caixa de medição específica para Autoprodutores de Energia com fornecimento de energia no ambiente de contratação livre • Também consta alterações nos condutores e barramentos de média tensão da cabine. • Trocas de TPs e TCs • Também compreende a instalação de fibra ótica partindo da sala de quadros até a medição de energia, para conexão de dados via internet da medição. 	
3. INVESTIMENTO	
Descrição	Valor (R\$)
Instalação Elétrica Alta e Baixa Tensão: Adequação Medição para APE	82.000,00
TPs E TCs Para medição	20.000,00
Medidor de Energia para Autoprodutores em Ambiente de Contratação Livre	10.000,00
TOTAL DO INVESTIMENTO	R\$ 112.000,00

Fonte: O Autor (2024)

Além das adequações no padrão de medição existente, para ser um autoprodutor é necessária a instalação de uma usina solar, a qual também foi solicitada para a mesma empresa uma proposta técnica e comercial, conforme o dimensionamento anteriormente calculado, o qual é composto por, 27 módulos fotovoltaicos de 550Wp Marca WEG, um Inversor trifásico 380V modelo SIW400G marca WEG. A instalação deste sistema, incluindo projetos quadros de proteção e regularização junto a concessionária teve o custo discriminado na Figura 18.

Figura 18: Custo de Implantação de Geração fotovoltaica para Autoprodutor

ESCOPO DE FORNECIMENTO	
Implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica a ser instalada na cidade de Eugênio de Castro / RS, conforme especificações abaixo citadas.	
1. FORNECIMENTO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS:	
Compreende o fornecimento de mão de obra na elaboração de projetos Elétricos, sendo o projeto da geração fotovoltaica, desenvolvido em AutoCad 2D. Considerado o encaminhamento e aprovação do projeto na Concessionária de Energia.	
2. FORNECIMENTO DE EQUIPAMENTOS:	
KIT - SISTEMA DE 14,85 kWp TELHADO:	
27 MÓDULOS MONOCRISTALINOS p-TYPE - 550Wp - WEG;	
01 INVERSOR TRIFÁSICO 380 V modelo SIW 400G T012 W0 - WEG;	
01 MONITORAMENTO GATEWAY WEG - ED100	
04 PROTETOR DE SURTO CA SPW02-275-20;	
03 CONECTOR MC4 6mm ² ;	
06 ESTRUTURA PARA TELHADO METÁLICO - 04 MÓDULOS EM RETRATO	
01 ESTRUTURA PARA TELHADO METÁLICO - 03 MÓDULOS EM RETRATO	
3. INVESTIMENTO	
3.1 EQUIPAMENTOS:	
Descrição	Total (R\$)
- SISTEMA SOLAR 14,85 kWp	R\$ 37.300,00
- QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO	
- PROJETO	
TOTAL DO INVESTIMENTO:	R\$ 37.300,00

Fonte: O Autor (2024)

Sendo assim, ao somar os dois custos dos investimentos, tem-se o valor de VB , necessário para a adequação para autoprodutor e instalação do sistema fotovoltaico para atender a demanda energética deste consumidor.

4.4.2 Retorno de investimento para Autoprodutor de Energia Elétrica

Para esta análise é necessário o cálculo de quanto é a geração de energia elétrica por dia, conforme demonstrado no gráfico da Figura 15 e o cálculo do consumo energético diário também explicito na mesma Figura. A aplicação da Equação 8 demonstra o valor da energia gerada e o uso da Equação 9 descreve a energia demandada pela instalação, referente à um dia.

$$Energia\ Total\ Gerada\ Diária = 64,15kWh$$

$$Energia\ Total\ Demandada\ Diária = 98,415kWh$$

Analisando a geração de energia diária, que se baseia no consumo médio diário do consumidor, em um ano, percebe-se que ela é menor do que a demanda de energia da unidade consumidora, ou seja, será necessária a compra de energia no mercado livre de energia, para o período onde não há geração.

Multiplicando estes valores citados anteriormente, por 365 dias, para fazer a perspectiva anual, tem-se que a energia gerada anual é de 23,41 MWh, enquanto a energia consumida é de 35,92MWh, fazendo o cálculo das diferenças, chega-se ao montante de 12,51MWh a ser contratado no mercado livre de energia.

O retorno de investimento desta opção, pode ser calculado se baseando nos paybacks anteriores, ou seja, a redução de custos da energia gerada pela usina solar pode ser dada da seguinte forma: o montante de energia anual gerada no autoprodutor é de 23,41MWh, o valor do kWh da fatura de energia no item 4.1, que é, em fora de ponta, de 0,35105285 R\$/kWh, traria à unidade consumidora um a redução de despesas com eletricidade o valor de R\$8.218,15 anual, para uma economia líquida, foi novamente considerado a manutenção do sistema um custo de R\$1000,00 por ano, o que resulta em um valor líquido de R\$ 7.218,15 anual.

O cálculo da diminuição do custo na energia contratada no mercado livre de energia pode ser dado da mesma maneira que exposto no subitem 4.3.2, é necessário comparar o custo de energia do ambiente regulado com o custo de contratação no ACL, desta energia remanescente da diferença entre a energia gerada e a energia demandada, neste mesmo item citado, é possível encontrar a diferença de custos entre o ACR e o ACL, que é de 112,92R\$/MWh, ou seja, o saldo monetário da compra desta energia remanescente, calculada anteriormente como sendo 12,51MWh, no ACL é de R\$1412,63.

Estas duas economias, podem ser somadas, para compor a redução de gastos anual, sendo assim, fazendo uma soma direta dos valores encontra-se R\$8630,78 por ano, assim, pode-se calcular o tempo de retorno de investimento nesta opção de instalação, de acordo com a Equação 5, descrita no item 3.2.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Economia Líquida Anual}} = \frac{149300,00}{8630,78} = 17,3 \text{ anos}$$

Estes 17,3 anos podem ser traduzidos em 17 anos e 3 meses e meio, aproximadamente.

4.4.3 Análise da Adequação para Autoprodutor de Energia

Analisando a adequação para autoprodutor de energia elétrica, pode-se ver um grande custo de adequação acrescido do custo de instalação do sistema de geração de energia, o custo total é de R\$149.300,00, o custo é elevado, principalmente pela caixa de medição nova a ser instalada, pelos instrumentos de medição de energia, TCs e TPs e o medidor de energia, além de todas as adequações necessárias na cabine de medição e o comissionamento desta ao CCEE, pois este cliente se torna um agente da Câmara, diferentemente de quando ele está como ACR gerador ou ACL, onde o agente é a concessionária de energia, neste caso o consumidor se torna um autoprodutor de energia conectado ao mercado livre de energia. O retorno de investimento é desvantajoso no quesito financeiro, sendo de aproximadamente dezessete anos e três meses.

A parte técnica da instalação de um autoprodutor de energia é complexa, sendo necessária a aprovação do projeto, comissionamento com o CCEE e toda a comunicação, determinação de IPs fixos para comunicação pela internet com a Câmara e posterior ligação desta instalação, à rede de distribuição da concessionária, a qual se torna apenas um intermediário e irá cobrar seus custos do cliente de maneira separada, é necessário um tempo para este projeto, aprovação e ligação, que, segundo a empresa contatada para a elaboração do orçamento, pode variar entre 4 meses e 6 meses, de acordo com a disponibilidade de equipamentos, materiais e tempo de análises do projeto perante a concessionária

A análise de sustentabilidade para um autoprodutor de energia elétrica, reforça benefícios ambientais, econômicos e estratégicos. A autoprodução com energia solar reduz as emissões de carbono e o impacto ambiental. No âmbito econômico, além de diminuir custos operacionais ao gerar parte da energia consumida, o autoprodutor pode negociar contratos no ACL para complementar a demanda, garantindo flexibilidade e previsibilidade financeira. Essa estratégia também fortalece a independência energética e impulsiona o uso de fontes renováveis, contribuindo para um sistema elétrico mais limpo e sustentável.

A opção de autoprodutor teve um custo alto e um retorno sobre investimento tardio, para que esta instalação possa ter um retorno de investimento mais rápido, pode-se não instalar o sistema Grid-Zero e vender o excedente de energia gerada na usina fotovoltaica nos leilões de energia do CCEE, ou ao Preço da Liquidação de Diferenças (PLD) para ajudar a ter um retorno, ou pagamento dos custos de implantação, em um tempo menor. Este tipo de estudo e instalação, caracterizaria este consumidor como um Produtor Independente de Energia (PIE), o qual, não foi retratado neste estudo de caso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo comparar e analisar as alternativas para redução de custos com energia elétrica em uma agroindústria, considerando geração distribuída, autoprodução e ambiente de contratação livre. Buscou-se quantificar os custos de adequação do sistema em cada alternativa, avaliar o tempo de retorno do investimento e identificar os impactos econômicos e operacionais.

A abordagem utilizada para este estudo de caso, aplicado à estas opções de redução e planejamento do gasto monetário com energia elétrica, envolveram cálculos e dimensionamentos de sistemas solares para atender parcial ou totalmente a demanda energética do consumidor, bem como pela pesquisa em leilões do CCEE para prospecção de consumo e análise de viabilidade no mercado livre. A caracterização das cargas típicas de agroindústrias foi essencial para dimensionar uma usina solar em modelo grid-zero. Além disso, foram analisadas as normativas vigentes da concessionária local para viabilizar a implementação, incluindo levantamento de custos e orçamentos detalhados.

Os resultados trazem, além do viés econômico, um resumo dos desafios que podem ocorrer com a parte técnica e suas vantagens, tempo de instalação, complexidade, a depender de cada opção, bem como uma análise relacionada à sustentabilidade destes sistemas, se referindo a pegada ambiental de produção dos equipamentos empregados e a redução por conta da geração limpa de energia.

O presente estudo de caso pode ser adaptado para outros cenários e outras aplicações. Dependendo do uso energético do consumidor, é possível obter resultados diferentes dos obtidos, bem como, outra opção de instalação pode vir a ser mais viável técnica ou economicamente.

A análise dos resultados evidencia que a melhor opção para este estudo de caso é a migração do consumidor para o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Essa escolha se destaca pelo retorno acelerado do investimento, aliado à simplicidade de instalação dos equipamentos necessários para a transição. Apesar do retorno financeiro do Mercado Livre, no período de 10 anos ser ligeiramente inferior ao da geração fotovoltaica, a agilidade e praticidade do modelo ACL compensam essa diferença, tornando-o uma solução atrativa. Bem como na parte técnica, onde a GD tem um grande impacto na rede elétrica, com o fluxo reverso de potência, o ACL e o APE não geram distúrbios.

No aspecto ambiental, o ACL também se sobressai, pois não há a necessidade de instalação de módulos fotovoltaicos de silício, cuja fabricação é associada a impactos ambientais significativos. Em vez disso, a energia adquirida no ACL é proveniente de fontes renováveis incentivadas, que precisam atender a critérios rigorosos de sustentabilidade para participar dos leilões energéticos. Assim, a escolha pelo ACL combina benefícios econômicos, operacionais e ambientais, alinhando-se aos princípios de geração limpa e sustentável, conforme a Figura 19.

Figura 19: Quadro Resumo do Estudo de Caso

Opções de Instalação				
Tipo	Custo	Payback	Vantagens	Desvantagens
GD	R\$ 62.750,00	6,31 anos	Energia limpa e sustentável	Fluxo reverso na rede da concessionária e possibilidade de limitação de energia injetável
ACL	R\$ 4.500,00	1 ano	Simplicidade de migração Custos baixos de investimento <i>Payback</i> acelerado Contratação de fontes Incentivadas	Menor economia do que a GD em um período de 10 anos
APE	R\$ 149.300,00	17,3 anos	Contratação de fontes incentivadas	Complexidade de migração Altos custos de investimento <i>payback</i> tardio

Fonte: O Autor (2024)

5.1 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida no presente trabalho, existem outros tópicos podem ser abordados, com o objetivo de comparar mais alternativas e melhorar o desenvolvimento. Na sequência, uma lista com tópicos considerados importantes para trabalhos futuros.

- Possibilidade de implementação de um Produtor Independente de Energia (PIE), que poderia vender o excedente de energia gerada no CCEE;
- Realizar estudos mais aprofundados em relação à previsão de economia de cada uma das opções;
- Propor a aplicação do mesmo estudo a outros tipos de geração distribuída, como por exemplo, eólica ou biomassa;
- Explorar o estudo em outros tipos de consumidores, como consumidores comerciais, residenciais, indústrias com operação 24 horas, entre outros;
- Desenvolvimento de ferramenta para cálculo de viabilidade e melhor opção.

REFERÊNCIAS

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia Solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid**. 2019. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf> Acesso em: 01 out. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Homologatória N° 3.206**: Brasília: Aneel, 2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233206ti.pdf>> Acesso em: 05 out. 2024.

_____. **Minigeração Distribuída**. Cadernos Temáticos. **Micro E**. Brasília, maio 2016.

AGUIAR NETO, Aderbal Portela de. **Estudo Comparativo da Viabilidade Econômica Entre os Sistemas On-Grid e Grid Zero Após a Aprovação do Novo Marco Legal (Lei 14.300)**. 2022. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/77848/1/2022_tcc_apaguiarneto.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia Elétrica. **Perguntas e Respostas Sobre Tarifas das Distribuidoras de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/web/guest/perguntas-frequentes/secretarias/energia-eletrica/acoes-e-programas/acoes#:~:text=A%20conta%20de%20luz%20de,como%20ICMS%2C%20PIS%20e%20COFINS>> Acesso em: 01 out. 2023.

CCEE. **Procedimentos de Comercialização - Módulo 1 - Agentes**. 2023. 28p. Revisão 5.0 - [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/mercado/procedimentos-de-comercializacao>> Acesso em: 01 nov. 2023

_____. **Procedimentos de Comercialização - Módulo 3 - Contratação de Energia e Potência**. 2023. 18p. Revisão 2.0 - [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/mercado/procedimentos-de-comercializacao>>. Acesso em: 01 nov. 2023

_____. **Regras de Comercialização - Contratos**. 2023. 167p. versão 1.0 - [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/mercado/regras-de-comercializacao>>. Acesso em: 01 nov. 2023

CARDOSO, Marcos Vinícius Bragança; ROCHA, Jefferson Franco. Estudo de Viabilidade na Migração Para o Mercado Livre de Energia. **Revista Uningá Review**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 37-46, jan. 2017. Trimestral. Disponível em: <<https://revista.uninga.br/uningareviews/article/download/1938/1534>>. Acesso em: 30 out. 2024.

CUNHA, João Gabriel Botelho. **Modelagem de Usina Autoprodutora de Energia Para Oferecimento do Lastro Energético de Uma Unidade Consumidora do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sobral/CE**. 2022. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Energias Renováveis, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/66383>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

DIAS, Marianna. **Da Centralização à Abertura: A Evolução Histórica do Setor Elétrico Brasileiro**. 2023. Disponível em: <<https://www.aquare.la/da-centralizacao-a-abertura-a-evolucao-historica-do-setor-eletrico-brasileiro/>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 40, p. 85-113, dez. 2013. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2431>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

FLESCHE, Cíntia H.; DALLEPIANE, Patrícia. G; CAMBAMBI, Cláudio A.C.; CANHA, Luciane Neves; GARCIA, Enoque D. Impacto da tarifa de Autoprodutor de Energia na Migração para o Mercado Livre. In: **Simpósio Brasileiro De Sistemas Elétricos**, 9., 2022, Santa Maria. Anais [...]. Santa Maria: UFSM, 2022. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/3120>. Acesso em: 5 nov. 2023.

FLESCHE, Cíntia Helena. **Análise das Perspectivas e Oportunidades da Autoprodução de Energia Elétrica Sob o Ponto de Vista do Consumidor Livre e do Participante do Sistema de Compensação de Créditos de Energia**. 2024. 112 f. Dissertação de Mestrado - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/33035>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

GOMES, Antônio Claret S.; ABARCA, Carlos David G.; FARIA, Elíada Antonieta S. T.; FERNANDES, Heloísa Helena de O.. **O setor elétrico**. 2002. Elaborada por BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13975/3/BNDES%2050%20anos%20-%20O%20setor%20el%C3%A9trico_P_BD.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2023.

KIKUMOTO, Bruno. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para o grupo A**. 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos-para-o-grupo-a/>>. Acesso em: 12 out. 2024.

LAU, Lucas. **Entenda as modalidades de tarifa de energia elétrica**. 2018. Disponível em: <<https://www.shareenergy.com.br/entenda-as-modalidades-de-tarifa-de-energia-eletrica/#:~:text=A%20tarifa%20de%20energia%20paga,sistema%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

LORENZO, Helena Carvalho de. **O Setor Elétrico Brasileiro: Passado e Futuro**. 2002. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/7d18af4f-403f-4d17-a615-bf9487e41004/content>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

MENKES, Monica. **Eficiência Energética, Políticas Públicas e Sustentabilidade**. 2004. 293 f. Tese de Doutorado - Engenharia Elétrica, Centro de Desenvolvimento Sustentável,

Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Disponível em: <https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/efici%EAncia%20energ%E9tica/Pesquisa/eficiencia_energetica_politicas_publicas_e_sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2023.

MELO, Felipe Cesar. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de um Projeto Fotovoltaico - Estudo de Caso: Estádio Aderbal Ramos da Silva**. 2020. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

NAKABAYASHI, Renny Kunizo. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, University of São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/en.php>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

QUEIROZ, Tales de Souza; LEDESMA, Jorge Javier Gimenez; ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo. **Redução de custos com energia elétrica pela migração ao mercado livre de energia**. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/187765693.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2023.

RECH, Willian Eduardo. **Análise comparativa de contratos de energia no ambiente de contratação regulado versus ambiente de contratação livre**. 2019. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24857>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

REGINALDO MEDEIROS. Abraceel (org.). **Cartilha Mercado Livre de Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: <<https://abraceel.com.br/biblioteca/2019/05/cartilha-mercado-livre-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Atlas de Energias Renováveis**. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/atlas-de-energias-renovaveis>>. Acesso em: 26 set. 2024.

SANTOS, Gustavo Antônio Galvão dos; BARBOSA, Eduardo Kaplan; SILVA, José Francisco Sanches da; ABREU, Ronaldo da Silva de (ed.). Por que as tarifas foram para os céus?: propostas para o setor elétrico brasileiro. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 29, p. 435-474, jun. 2008. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13446/2/RB%2029%20Por%20Que%20as%20Tarifas%20Foram%20para%20os%20Céus_Propostas%20para%20o%20Setor%20Elétrico%20Brasileiro_P_BD.pdf>. Acesso em: 01 out. 2023.

SEBRAE. **Energia tem impacto de até 20% nos custos do pequeno negócio**. 2023. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/energia-tem-impacto-de-ate-20-nos-custos-do-pequeno-negocio,c8d89532cc417810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

SOUZA, João Paulo de. **Grid-Zero - Como funciona: suas aplicações e homologação na distribuidora de energia elétrica**. suas aplicações e homologação na distribuidora de energia elétrica. 2022. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/grid-zero--->>

como-funciona---suas-aplicacoes-e-homologacao-na-distribuidora-de-energia-eletrica>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <<https://www.periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>>. Acesso em: 5 nov. 2023.

VOUDOUKIS, N. F. **Photovoltaic technology and innovative solar cells**. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 2, n. 1, jan. 2018. DOI: <<https://doi.org/10.24018/ejece.2018.2.1.13>>.