

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

JOÃO PEDRO ALBERNAZ SOARES

**DIMENSIONAMENTO TÉCNICO E ECONÔMICO DOS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS PARA *DATA CENTERS*: UM ESTUDO DE CASO**

Patos de Minas

2024

JOÃO PEDRO ALBERNAZ SOARES

**DIMENSIONAMENTO TÉCNICO E ECONÔMICO DOS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS PARA *DATA CENTERS*: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de Projeto Final de Curso II da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Coelho

Patos de Minas

2024

JOÃO PEDRO ALBERNAZ SOARES

**DIMENSIONAMENTO TÉCNICO E ECONÔMICO DOS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS PARA *DATA CENTERS*: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de Projeto Final de Curso II da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Patos de Minas, 26 de abril de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Júlio César Coelho - FEELT/UFU (Orientador)

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos - FEELT/UFU (Membro 1)

Prof^a. Dra. Karine Barbosa Carbonaro - FEELT/UFU (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar até aqui. Por me fazer acreditar novamente que é possível vencer os desafios da vida.

Agradeço a minha família, que nunca deixou de acreditar em mim, mesmo quando eu já não acreditava mais. Obrigado, minha querida mãe, Marli. Obrigado, Isabella, Sérgio e Joaquim. Sem vocês nada disso seria possível.

Também agradeço aos tantos amigos que fizeram parte desta jornada. Vocês me fizeram sentir em casa e se tornaram uma nova família para mim. Serei eternamente grato a vocês por isso.

Agradeço aos professores da Universidade Federal de Uberlândia, campus Patos de Minas, pelo apoio e paciência durante esses anos. Guardarei com carinho seus ensinamentos. Em especial agradeço meu orientador, Júlio César Coelho, pela confiança e parceria durante a graduação.

Por fim, agradeço aos anjos: Joaquim, meu pai, e Sílvio e Alvacir, meus tios, por me guiarem até a conclusão deste trabalho. Sei que vocês também torceram por mim.

RESUMO

O consumo de energia da Tecnologia da Informação (TI) moderna vem recebendo cada vez mais atenção das grandes empresas de tecnologia, pois representa uma parcela considerável do consumo de energia elétrica no mundo. Parte deste consumo de energia ocorre devido aos equipamentos de TI que necessitam de operação ininterrupta, para garantir o funcionamento de inúmeros serviços que dependem das redes de computadores. Nesse sentido, a busca por inovações no fornecimento de energia para estes equipamentos, tão presentes em *data centers*, é uma necessidade, para garantir a sustentabilidade e a segurança nas operações deles. O presente trabalho visou o dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos híbridos para *data centers tiers* I e II, partindo do estudo de caso do *data center* do Centro Administrativo da Prefeitura de Paracatu – Minas Gerais (MG). O dimensionamento foi realizado por meio do *software* HOMER Pro, uma poderosa ferramenta capaz de projetar sistemas híbridos de geração de energia e indicar as melhores configurações para o sistema, utilizando critérios técnicos e econômicos. Com esse *software* foi possível verificar que a configuração do *data center tier* II é mais vantajosa que a configuração do *data center tier* I, de acordo com o critério de menor custo presente líquido.

Palavras-chave: *data center*; *tier*; sistemas fotovoltaicos; HOMER Pro.

ABSTRACT

The energy consumption of modern Information Technology (IT) has been increasingly gaining the attention of large technology companies, as it represents a significant portion of electrical energy consumption in the world. Part of this energy consumption occurs due to IT equipments that requires uninterrupted operation to ensure the functioning of numerous services that depend on computer networks. In this sense, the search for innovations in the energy supply for those equipments, so present in data centers, is a necessity, to guarantee the sustainability and safety of their operations. The present work aimed the technical and economic dimensioning of hybrid photovoltaic systems for tiers I and II data centers, based on the case study of the data center in the Centro Administrativo of the Prefeitura de Paracatu – Minas Gerais (MG). The sizing was carried out using the HOMER Pro software, a powerful tool capable of designing hybrid power generation systems and indicating the best configurations for the system, using technical and economic criteria. With this software, it was possible to verify that the tier II data center configuration is more advantageous than the tier I data center configuration, according to the lowest net present cost criteria.

Keywords: data center; tier; photovoltaic systems; HOMER Pro.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista superior (satélite) das instalações da Algar Tech.....	13
Figura 2 – Sala de operações do ENIAC.....	18
Figura 3 – Típico Centro de processamento de dados (CPD) da década de 80.....	18
Figura 4 – Sala de servidores de um dos <i>data centers</i> da Google.....	19
Figura 5 – Exemplo de distribuição elétrica de um <i>data center tier I</i>	21
Figura 6 – Exemplo de distribuição elétrica de um <i>data center tier II</i>	22
Figura 7 – Modelo de sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	25
Figura 8 – Modelo de sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	25
Figura 9 – Modelo de sistema fotovoltaico híbrido, baseado no inversor híbrido Deye SUN5K.....	26
Figura 10 – Exemplo de distribuição elétrica de um <i>data center tier I</i>	27
Figura 11 – Exemplo de distribuição elétrica de um <i>data center tier II</i>	27
Figura 12 – Vista frontal do Centro Administrativo da Prefeitura de Paracatu-MG.....	28
Figura 13 – Um dos <i>racks</i> do <i>data center</i>	29
Figura 14 – Ar-condicionado instalado na sala do <i>data center</i>	29
Figura 15 – Tela <i>Design</i> do <i>software</i> HOMER Pro.....	34
Figura 16 – Tela <i>Economics</i> do <i>software</i> HOMER Pro.....	35
Figura 17 – Tela <i>Electric Load Setup</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	36
Figura 18 – Perfis de consumo de energia das cargas ao longo do dia, utilizados pelo <i>software</i> HOMER Pro.....	36
Figura 19 – Perfis de consumo de energia das cargas ao longo do ano, utilizados pelo <i>software</i> HOMER Pro.....	37
Figura 20 – Tela <i>Electric Load</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	38
Figura 21 – Tela <i>Yearly Load Data</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	39
Figura 22 – Tela <i>Generator Setup</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	40
Figura 23 – Tela <i>Generator</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	41
Figura 24 – Tela <i>PV Setup</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	42
Figura 25 – Tela <i>PV</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	42
Figura 26 – Tela <i>Storage Setup</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	43
Figura 27 – Tela <i>Find Storage Component</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	43
Figura 28 – Tela <i>Storage</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	44
Figura 29 – Tela <i>Converter</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	45

Figura 30 – Tela <i>Advanced Grid</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	46
Figura 31 – Tela <i>Solar GHI Resource</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	47
Figura 32 – Recorte da tela do <i>software</i> HOMER Pro com ênfase para o número de simulações a serem realizadas.....	47
Figura 33 – Recorte da tela do <i>software</i> HOMER Pro durante a etapa de otimização.....	48
Figura 34 – Tela <i>Results</i> , aba <i>Summary</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	49
Figura 35 – <i>Economic Metrics</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	50
Figura 36 – Janela <i>Simulation Results</i> , aba <i>Cost Summary</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	51
Figura 37 - Janela <i>Simulation Results</i> , aba <i>Cash Flow</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	51
Figura 38 - Janela <i>Simulation Results</i> , aba <i>Electrical</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	52
Figura 39 - Janela <i>Time Series Detail Analysis</i> , aba <i>DMap</i> , parâmetro <i>Grid Purchases</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	52
Figura 40 - Janela <i>Time Series Detail Analysis</i> , aba <i>DMap</i> , parâmetro <i>Grid Sales</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	53
Figura 41 – Janela <i>Create Proposal</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	53
Figura 42 – Tela <i>Results</i> , aba <i>Tables</i> , do <i>software</i> HOMER Pro.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de cargas do <i>data center</i>	30
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPEX	Despesas de Capital (Capital Expenditure)
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPD	Centros de Processamento de Dados
ENIAC	Computador e Integrador Numérico Eletrônico (Electronic Numerical Integrator and Computer)
GHG	Gases de Efeito Estufa (Greenhouse Gases)
IRR	Taxa Interna de Retorno (Internal Rate of Return)
LCOE	Custo de Energia Nivelado (Levelized Cost of Energy)
NPC	Custo Presente Líquido (Net Present Cost)
PDU	Unidade de Distribuição de Energia (Power Distribution Unit)
PPA	Acordos de Compra de Energia (Power Purchase Agreement)
QTA	Quadro de Transferência Automática
ROI	Retorno sobre o Investimento (Return of Investment)
TE	Tarifa de Energia
TI	Tecnologia da Informação
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UPS	Fonte de Energia Ininterrupta (Uninterruptable Power Supply)
VF	Valor Futuro
VP	Valor Presente

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Tema do Projeto	13
1.2 Justificativas	13
1.3 Objetivos	15
1.4 Problematização	15
1.5 Estrutura de capítulos	16
2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	17
2.1 <i>Data center</i>: principais conceitos	17
2.2 Energia solar fotovoltaica: principais conceitos	22
2.3 Sistemas fotovoltaicos para <i>data centers</i>	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Definições do <i>data center</i>	28
3.2 Definições da unidade consumidora	30
3.3 Apresentação do <i>software</i> HOMER Pro	31
3.3.1 Critérios econômicos adotados pelo <i>software</i>	32
3.3.2 Etapas do projeto no <i>software</i>	33
4 RESULTADO E DISCUSSÕES	49
5 CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E CONTRIBUIÇÕES	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos de Tecnologia da Informação (TI) consome grandes quantidades de energia, e este consumo tem impactos no meio ambiente. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA - *International Energy Agency*), os *data centers* e redes de transmissão de dados representam aproximadamente 1% do uso de eletricidade no mundo. Outro dado importante está relacionado com a emissão de gases de efeito estufa (GHG - *greenhouse gases*), como o dióxido de carbono: *data centers* e redes de transmissão de dados são responsáveis por aproximadamente 0,6% do total de emissão de GHG no mundo, devido a utilização direta e indireta de fontes de energia que emitem poluentes, como geradores baseados em combustíveis fósseis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Com o aumento da demanda por serviços digitais, o consumo de eletricidade e a emissão de GHG por parte dos *data centers* passa a ser uma questão relevante para a sociedade.

A maioria das empresas de tecnologia, como a Microsoft, já estão atentas para a sustentabilidade na operação de seus *data centers*. Por meio dos acordos de compra de energia (PPA - *power purchase agreement*), por exemplo, essas empresas causam impacto positivo no mercado de energia renovável. Com o PPA, uma empresa concorda em comprar energia renovável de um projeto que ainda não está finalizado, por um preço definido e por um período de tempo que varia de 10 a 20 anos. Este acordo garante renda estável para novos projetos, facilitando a expansão do mercado de energia renovável. Em 2021, a Microsoft foi a segunda maior compradora corporativa de energia renovável por meio dos PPA. A empresa possui como compromisso ter, até 2030, 100% do seu consumo de eletricidade, 100% do tempo, correspondido por compras de energia renovável (WELSCH, 2022).

Nesse contexto de desenvolvimento sustentável, a energia fotovoltaica como recurso energético merece destaque. Isso se deve, entre outros fatores, à disponibilidade da luz solar e a versatilidade dos sistemas fotovoltaicos, que podem ser aplicados em diversos setores. No setor de TI, por exemplo, o grupo Algar tem realizado investimentos em energia solar. Em 2015, a Algar Tech inaugurou seu primeiro *data center* parcialmente abastecido por energia solar fotovoltaica, no edifício da sede (ALGAR, 2024). Na Figura 1 é possível constatar a grande quantidade de módulos fotovoltaicos sobre as instalações da Algar Tech, representados pelas fileiras de retângulos escuros nos prédios claros.

Figura 1 - Vista superior (satélite) das instalações da Algar Tech.



Fonte: GOOGLE MAPS, 2024.

1.1 Tema do Projeto

Este trabalho visou o dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos híbridos para *data centers tiers* I e II, partindo do estudo de caso do *data center* da Prefeitura de Paracatu – Minas Gerais (MG), com o auxílio do *software* HOMER Pro. A configuração de *data center tier* I simulada teve como fontes de energia a rede da concessionária, uma bateria e um gerador a diesel, para situações extremas onde as outras fontes não puderem atender as cargas críticas. Já a configuração de *data center tier* II simulada teve redundância de fontes de energia e armazenamento; além da rede da concessionária, também foram utilizados painéis fotovoltaicos, duas baterias e um gerador a diesel.

1.2 Justificativas

O *software* HOMER Pro é considerado o padrão global para otimização de projetos de microrrede em todos os setores. Ele foi originalmente desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e, posteriormente, aprimorado e distribuído pela UL Solutions. Ele reúne três ferramentas em um único *software*: simulação, otimização e análise sensível (HOMER ENERGY, 2024). No capítulo 3, item 3.3 deste trabalho, foram aprofundados os conceitos do *software* HOMER Pro e suas principais funções. Para evidenciar as capacidades do *software* em questão serão destacados alguns trabalhos em que ele foi utilizado.

No artigo de Beopsoo Kim e Insu Kim, foi realizado um estudo de caso sobre um *data center* autônomo (sem conexão à rede elétrica convencional) baseado em energias renováveis. O sistema idealizado contou com energia eólica, solar e banco de baterias, para armazenamento de energia. Com o auxílio do *software* DIGSILENT Power Factory foi analisada a resposta transitória do sistema projetado em situações de falhas, examinando a amplitude das correntes de fuga nos barramentos. Com o auxílio do *software* HOMER foi revelado que o sistema projetado tende a operar de forma confiável e que ele possui proteção adequada para prevenir a propagação de falhas (KIM; KIM, 2022).

No trabalho do Pedro Bachiega de Castro foi realizado o dimensionamento técnico e financeiro de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e com baterias por meio do *software* HOMER Pro, tendo como objeto de estudo as instalações do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Campinas. O autor conclui que esse tipo de sistema é pouco viável economicamente, devido ao alto custo de investimento, mas que pode se tornar viável caso haja redução de custo da tecnologia utilizada (DE CASTRO, 2020).

O trabalho da Tamara Martins Alves analisou a simulação de atendimento de cargas residenciais isoladas (distantes da rede de distribuição) por sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia por baterias. Tais sistemas foram projetados a partir de kits fotovoltaicos ofertados em sites especializados. Também foi analisado o custo-benefício do sistema fotovoltaico com banco de baterias, utilizando o *software* HOMER, em comparação com uma possível extensão da rede. A autora conclui que o sistema fotovoltaico isolado com baterias é uma boa alternativa para a resolução do problema, visto que as unidades consumidoras em questão geralmente estão distantes do ponto de conexão da rede (ALVES, 2020).

Analisando as referências supracitadas, fica evidente a grande variedade de aplicações dos sistemas fotovoltaicos e, em especial, a aplicação destes sistemas para *data centers*. Também é possível verificar a capacidade do *software* HOMER em auxiliar no desenvolvimento de projetos com fontes renováveis de energia, permitindo o dimensionamento técnico e econômico destes projetos.

Neste trabalho foi utilizada a abordagem da autora Tamara Martins Alves, pois foi verificado que o uso de kits fotovoltaicos simplifica os cálculos do sistema projetado, eliminando variáveis como a quantidade de painéis solares.

1.3 Objetivos

Realizar o dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos híbridos para *data centers tiers* I e II, partindo do estudo de caso do *data center* da Prefeitura de Paracatu-MG, utilizando o *software* HOMER Pro.

Para atingir este objetivo geral foram definidos como objetivos específicos:

- Levantar os dados necessários para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos híbridos no *software* HOMER Pro;
- Simular os sistemas fotovoltaicos híbridos propostos utilizando o *software* HOMER Pro.

1.4 Problematização

Os sistemas informatizados são parte inseparável do dia a dia das pessoas hoje. Seja para a aquisição ou fornecimento de produtos, para a utilização ou prestação de serviços públicos ou privados, o tráfego de dados se faz necessário. Porém, esses sistemas são dependentes da energia elétrica, que é comercializada pela concessionária de energia. Devido a diferentes fatores, como interferência humana ou climática, a rede elétrica da concessionária de energia está sujeita a falhas, que podem interromper o funcionamento de sistemas informatizados.

Durante o período de realização de estágio do autor deste trabalho no Centro Administrativo da Prefeitura Municipal de Paracatu – MG, na Divisão de Informática, a Prefeitura convivia com alguns problemas gerados pela instabilidade no fornecimento de energia elétrica. As falhas na rede, apesar de ocorrem ocasionalmente e terem curta duração, comprometiam os serviços administrativos realizados no prédio e interrompiam o funcionamento de equipamentos de rede que mantinham arquivos da própria Prefeitura, de hospitais e escolas públicas, entre outros estabelecimentos. Portanto a falta de energia no Centro Administrativo também afetava, indiretamente, os serviços prestados em outros estabelecimentos públicos.

A segurança nas operações de um *data center* é mundialmente classificada em *tiers*, quem vão de I a IV. Quanto maior o *tier*, maior é a confiabilidade nas operações do *data center*. Porém, essa segurança maior vem acompanhada de um custo elevado, devido a necessidade de equipamentos redundantes e até sistemas redundantes, dependendo do *tier*.

Com base na situação apresentada e nos conhecimentos adquiridos pelo autor durante a graduação, foi sugerida a ampliação de fontes de energia para o *data center* em questão, com destaque para a energia solar, devido ao potencial de geração do município de Paracatu, local onde já foram inaugurados grandes empreendimentos com esse tipo de energia (PREFEITURA DE PARACATU, 2023). Para realizar o dimensionamento deste tipo de sistema e verificar sua viabilidade, uma alternativa conhecida na literatura é o *software* HOMER Pro. Com relação a confiabilidade do *data center*, é necessário comparar os custos envolvidos em cada *tier* e buscar a opção que tenha a melhor relação custo-benefício, para que a Prefeitura aplique o dinheiro público de forma responsável e inteligente. Dentre todos os *tiers*, o I e II são aqueles de menor custo. Dessa forma, surge como problema de pesquisa: é possível realizar o dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos híbridos para *data centers tiers* I e II, com base no estudo de caso do *data center* da Prefeitura de Paracatu-Minas Gerais, utilizando o *software* HOMER Pro?

1.5 Estrutura de capítulos

Para alcançar o seu objetivo central, este trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos, sendo esta introdução o primeiro deles. No capítulo 2 serão apresentados os conceitos mais relevantes sobre *data centers*, com ênfase para os sistemas elétricos e *tiers*. Também serão conceituados os sistemas fotovoltaicos e seus tipos. No capítulo 3 será detalhado o levantamento de dados realizado e as etapas do projeto. Também será detalhado o *software* de simulação HOMER Pro. No capítulo 4 os resultados do projeto serão apresentados e analisados técnica e economicamente, buscando a resolução do problema de pesquisa levantado neste trabalho. Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos de *data centers*, com ênfase na classificação em *tiers*. Também serão apresentados os principais tipos de sistemas fotovoltaicos, as mudanças recentes na legislação brasileira que afetam esses sistemas e como os sistemas fotovoltaicos podem ser aplicados no contexto dos *data centers*.

2.1 *Data center*: principais conceitos

Segundo o Prof. Dr. Paulo Marin, referência nacional e internacional sobre o tema, *data centers*, ou centros de dados (tradução literal), são ambientes de missão crítica, ou seja, precisam operar com a máxima disponibilidade possível. Eles abrigam equipamentos e sistemas responsáveis pelo tratamento e armazenamento de informações cruciais para a operação de diferentes tipos de negócios (FILHO, 2016).

A história do design de *data centers* teve início na década de 40, com o desenvolvimento da infraestrutura que acomodou o Computador e Integrador Numérico Eletrônico (ENIAC - *Electronic Numerical Integrator and Computer*), desenvolvido a pedido do exército dos Estados Unidos para pesquisas balísticas durante a Segunda Guerra Mundial (OAKLEY, 2021). O ENIAC foi um imenso computador, que ocupava uma sala de 30 por 50 pés de tamanho (9 por 15 metros) e pesava 30 toneladas. Era composto por 18 mil tubos de vácuo e seus circuitos incluíam 500 mil juntas soldadas com 70 mil resistores e 10 mil capacitores. Seu consumo de energia era da ordem de 150 kW (PENN ENGINEERING, 2017). A Figura 2 mostra a sala de operações do ENIAC, na Universidade de Pensilvânia.

Os primeiros *data centers* eram muito complexos, pois eram utilizados para funções militares e de inteligência, por isso eram desenvolvidos secretamente e necessitavam de discrição. A maioria deles possuía apenas uma porta de segurança e nenhuma janela. A ventilação não era adequada, causando superaquecimento de componentes, podendo levar a incêndios. Com o surgimento de novas tecnologias, como os transistores, circuitos integrados e microprocessadores, os computadores passaram por drástica redução de tamanho, aumento das capacidades computacionais, adição de novos recursos e maior confiabilidade na operação. Tudo isso contribuiu para a redução dos custos dos *data centers* e viabilização deles em escala comercial. Com o desenvolvimento da Internet, os *data centers* ganharam ainda mais importância, pois são uma infraestrutura crítica para a operação de servidores e outros equipamentos que sustentam a rede mundial de computadores (OAKLEY, 2021).

Figura 2 – Sala de operações do ENIAC.



Fonte: PENN ENGINEERING, 2017.

Os *data centers* são a evolução dos Centros de Processamento de Dados (CPD) da década de 80 e início dos anos 90, mas com importantes diferenças, como (ZUCCHI; AMÂNCIO, 2013):

- a quantidade de computadores, que em um *data center* pode ser de centenas ou milhares, enquanto em um CPD são poucos;
- a capacidade de armazenamento e processamento de informações, que é muito superior em um *data center*, devido aos avanços da Tecnologia da Informação;
- enquanto um CPD pode ser considerado um produto, por ser adquirido de um único fornecedor, que projeta, integra e implementa todo o ambiente, nos *data centers* é quase inevitável a presença de equipamentos de fornecedores diferentes.

A Figura 3 mostra os antigos CPDs. Já a Figura 4 mostra uma fileira de servidores do *data center* da Google no Condado de Douglas, Geórgia.

Figura 3 – Típico CPD da década de 80.



Fonte: FILHO, 2016.

Figura 4 – Sala de servidores de um dos *data centers* da Google.



Fonte: GOOGLE, 2024.

Marin também reforça que a densidade de equipamentos e a capacidade de armazenamento e processamento dos *data centers* é muito superior à dos CPDs, e acrescenta outras diferenças, como (FILHO, 2016):

- O porte dos equipamentos, que são muito maiores nos CPDs;
- A quantidade de pessoas que trabalhava nas salas de computadores, onde ficavam os equipamentos críticos de TI, era maior nos CPDs. Nos *data centers* modernos, as pessoas normalmente trabalham em salas de suporte, fora das salas de computadores.

Quando se fala “*data center*” é importante entender que esse termo compreende não apenas os espaços que possuem equipamentos críticos de TI, mas a infraestrutura do site como um todo. Dessa forma, também fazem parte de um *data center* (FILHO, 2016):

- sala de servidores;
- sistemas de climatização, como ar-condicionado;
- sistemas de distribuição elétrica e Fonte de Energia Ininterrupta (UPS - *Uninterruptable Power Supply*);
- sistemas de automação;
- sistemas de detecção e supressão de incêndios;
- sistemas de segurança e controle;
- espaços de suporte, entre outros.

Vale ressaltar que, ainda que essa infraestrutura de missão crítica de TI seja projetada para suportar um único gabinete, ela também é chamada de *data center*, desde que ofereça condições para operação com máxima disponibilidade.

Quando se fala em ambientes de missão crítica, além da disponibilidade, deve-se ter em mente os conceitos de resiliência e tolerância a falhas. A disponibilidade pode ser definida como

o tempo em que o sistema está operante em relação ao tempo que ele deveria estar operante, ou seja, o tempo de operação mais o tempo de reparação do sistema durante as falhas.

A resiliência é a capacidade do *data center* voltar ao seu estado original após sofrer com uma falha. Essa capacidade pode ser obtida implementando redundância de partes, peças e/ou sistemas inteiros, garantindo algum grau de tolerância a falhas.

Por sua vez, tolerância a falhas pode ser entendida como a capacidade do *data center* continuar operante, mesmo durante falhas. O grau dessa tolerância também depende das redundâncias implementadas.

Os conceitos de redundância, disponibilidade, tolerância a falhas e resiliência estão relacionados a classificação de *tiers* dos *data centers*. Essa classificação criada pelo Uptime Institute, uma organização norte-americana, é utilizada em diversos países. Nela foram definidos quatro níveis de disponibilidade de um *data center*, de acordo com sua infraestrutura de distribuição elétrica e climatização.

No *tier I* o *data center* não possui componentes redundantes. Há apenas um ramo de distribuição elétrica e de climatização para atender os equipamentos críticos de TI.

No *tier II* o *data center* possui componentes redundantes, como UPS e geradores mas permanece com apenas um ramo de distribuição elétrica e de climatização para atender os equipamentos críticos de TI.

No *tier III* o *data center* possui componentes e ramos de distribuição redundantes. Cada ramo de distribuição atende os equipamentos de TI individualmente. Outra característica dos *data centers tier III* é a operação e manutenção concomitante.

No *tier IV* o *data center* possui sistemas redundantes e vários ramos de distribuição que atendem simultaneamente os equipamentos críticos de TI. Cada equipamento possui fonte de alimentação redundante. Essas características permitem ao *data center tier IV* ser o único tolerante a falhas. Qualquer sistema, componente ou elemento da distribuição que falhar não causará a interrupção do *data center* (FILHO, 2016).

Este trabalho teve como foco os sistemas elétricos de *data centers tiers I e II*. Tais sistemas são responsáveis pela alimentação das cargas críticas e podem manter os principais equipamentos do *data center* em funcionamento mesmo durante quedas de energia.

Um exemplo de esquema de distribuição elétrica de um *data center tier I* pode ser visualizado na Figura 5.

De acordo com a Figura 5, a concessionária local fornece a energia que alimenta o quadro elétrico principal do *data center*. O quadro elétrico por sua vez alimenta os equipamentos críticos de TI, as cargas não críticas, como espaços de suporte, e as carga

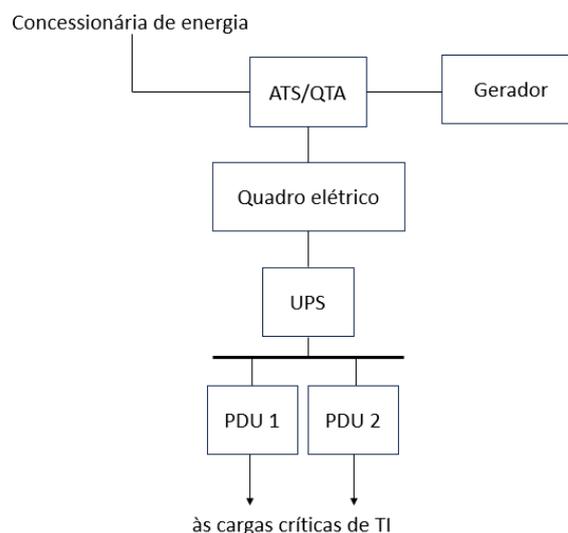
mecânicas (responsáveis pela climatização) (FILHO, 2016).

Depois do quadro elétrico principal existe o Quadro de Transferência Automática (QTA, ou ATS - *Automatic Transfer Switch*). O QTA realiza a conexão entre a carga do quadro elétrico e a rede da concessionária. Na ausência de energia elétrica ele é automaticamente comutado para o gerador a diesel e dá a partida no motor. Porém, o gerador leva um tempo para estabilizar o giro do motor, sendo necessário o acionamento de outro sistema para garantir o funcionamento ininterrupto dos equipamentos críticos. Esse sistema é o UPS (FILHO, 2016).

O UPS, também conhecido como no-break, é composto por equipamentos eletrônicos e baterias. O objetivo desse sistema é converter a energia elétrica na forma de corrente contínua, que provém das baterias ou bancos de baterias, em energia elétrica na forma de corrente alternada, para alimentar apenas as cargas críticas do *data center* (FILHO, 2016).

Outro dispositivo utilizado em sistemas elétricos de *data center* é a Unidade de Distribuição de energia (PDU - *Power Distribution Unit*). A PDU é um quadro de distribuição que atende apenas uma parte ou setor da instalação e serve para separar os circuitos que atendem as cargas críticas de TI, melhorando o gerenciamento dos ramos de distribuição e reduzindo a carga por ramo (FILHO, 2016).

Figura 5 – Exemplo de distribuição elétrica de um *data center tier I*.



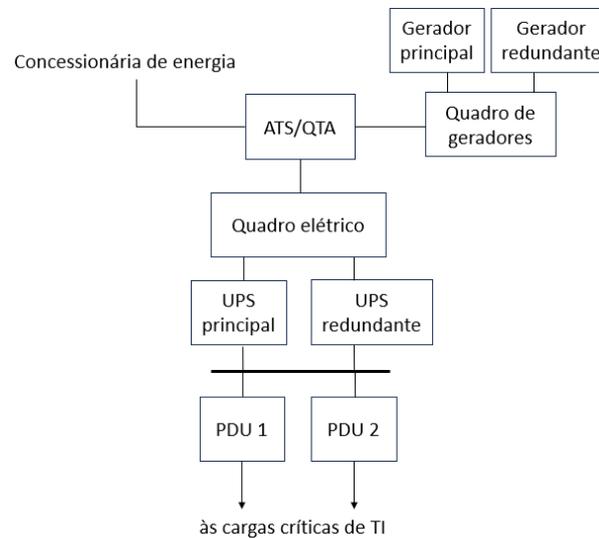
Fonte: FILHO, 2016 *apud* MARIN, 2016 (adaptado).

Um exemplo de esquema de distribuição elétrica de um *data center tier II*, que possui componentes redundantes, pode ser visualizado na Figura 6.

A principal diferença com relação ao esquema de distribuição elétrica do *data center tier I* é que em caso de falha do gerador principal um gerador redundante será acionado.

Também existe um módulo UPS redundante, caso o módulo principal falhe.

Figura 6 – Exemplo de distribuição elétrica de um *data center tier II*.



Fonte: FILHO, 2016 *apud* MARIN, 2016 (adaptado).

Maiores detalhes sobre a infraestrutura recomendada para *data centers* podem ser obtidos nas normas ANSI/TIA 942 - *Telecommunications Infrastructure Standard for Data centers* (ou Padrão de Infraestrutura de Telecomunicações para *data centers*) e na ABNT NBR 14.565 - *Cabeamento estruturado para edifícios comerciais e data centers*. Essas são algumas das normas mais importantes para o setor de *data centers*.

Diante da necessidade de operação ininterrupta dos equipamentos críticos de TI, surge a necessidade de desenvolver novas tecnologias, visando maior segurança energética para os sistemas. Como exemplo de nova tecnologia que tem potencial para emprego no setor de *data centers* tem-se os sistemas fotovoltaicos.

2.2 Energia solar fotovoltaica: principais conceitos

O Sol é a principal fonte de energia da Terra, dada a quantidade de energia solar que a superfície do planeta recebe anualmente, nas formas de luz e calor. Dessa energia surgem quase todas as outras utilizadas pela humanidade, como a da biomassa, a hidrelétrica, a eólica e a proveniente dos combustíveis fósseis (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Pinho e Galdino (2014) também compartilham da visão de que a maioria das fontes de energia utilizadas pela humanidade são, em última instância, derivadas da energia do Sol. É a energia do Sol que dá início ao ciclo da água, com a evaporação. A energia eólica também é

uma manifestação indireta da energia solar, pois os ventos se formam a partir da conversão da radiação do Sol em energia cinética, devido as diferenças entre a radiação solar incidente para cada latitude e a radiação emitida pelo solo. Combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, são originados a partir de resíduos de plantas e animais que se desenvolveram graças ao recurso solar. Até os biocombustíveis são produzidos graças a energia solar. A cana de açúcar, por exemplo, precisa da luz do Sol para realizar fotossíntese e se desenvolver, para então ser transformada em combustível nas usinas (PINHO; GALDINO, 2014).

Uma das formas de aproveitamento da energia solar é por meio da conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno é chamado de efeito fotovoltaico e foi descrito por Edmond Becquerel em 1839. O fenômeno consiste no surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura formada por material semicondutor, chamada de célula, após ela absorver luz (CRESESB, 2006).

O desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos ocorreu inicialmente por empresas do setor de telecomunicações, que buscavam fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo grande impulsionador do desenvolvimento desses sistemas foi a corrida espacial. A célula fotovoltaica era, e ainda é, a solução mais adequada para o fornecimento de energia dos equipamentos eletrônicos no espaço.

Mas as células fotovoltaicas utilizadas para missões espaciais possuíam custo de produção elevado, inviabilizando sua comercialização. Graças aos investimentos de países como Estados Unidos, Alemanha, Japão e China, foi possível desenvolver a tecnologia a ponto de ser economicamente viável a comercialização dessas células (PINHO; GALDINO, 2014).

Com relação aos dispositivos legais vigentes em território brasileiro, em 6 de janeiro de 2022 foi instituído novo marco legal para o setor de energia solar, a lei nº 14.300/2022. A Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, com as atualizações promovidas pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023 regulamentam a lei supracitada (ANEEL, 2023).

O marco legal da micro e minigeração distribuída trouxe algumas mudanças importantes para os projetistas de sistemas fotovoltaicos e consumidores. Por exemplo, a incidência de tarifas sobre o excedente de energia. De acordo com o Capítulo VI, artigo 26 da lei nº 14300 de 2022, as unidades beneficiárias da energia oriunda de micro e minigeradores existentes após a data de publicação da lei deverão pagar tais taxas. A lei foi publicada no dia 06 de janeiro de 2022.

As tarifas recaem sobre toda a energia elétrica compensada e são relativas à “remuneração dos ativos do serviço de distribuição, à quota de reintegração regulatória (depreciação) dos ativos de distribuição e ao custo de operação e manutenção do serviço de

distribuição” (BRASIL, 2022, s.n.). O percentual que será cobrado aumentará gradativamente a cada ano, chegando ao valor máximo de 90% a partir de 2028. Para entender a forma como esse percentual incide sobre o excedente de energia é necessário entender as componentes tarifárias de energia.

Para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão a tarifa aplicada é composta por duas tarifas: a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa de Energia (TE). A TUSD está atrelada à prestação dos serviços necessários para o consumo de energia elétrica, como disponibilização, manutenção e operação da infraestrutura do setor elétrico. Já a TE corresponde a energia propriamente dita, utilizada pelo consumidor, além de outros custos associados ao consumo (ANEEL, 2018). Tanto a TUSD quanto a TE possuem diversas funções de custos e componentes tarifários, mas para este trabalho foi dado foco a componente TUSD Transporte Fio B, devido a sua importância no cálculo do valor do excedente de energia após as mudanças que a lei nº 14300/2022 trouxe.

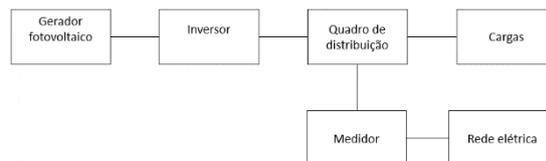
A componente tarifária TUSD Transporte Fio B incorpora custos típicos da atividade de distribuição. Isso inclui custos da distribuidora com: mão de obra, administração, atendimento de consumidores, manutenção dos ativos existentes, remuneração dos investimentos realizados, quota de reintegração de capital e outros (ANEEL, 2018). É sobre essa componente tarifária que a lei 14300/2022 se refere no Capítulo VI, artigo 26, de maneira implícita. Portanto os percentuais estipulados na lei se aplicam a essa componente tarifária. O valor definido pela concessionária para a componente TUSD Transporte Fio B pode ser encontrado no site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). No capítulo 3 deste trabalho foi utilizado o valor desta componente tarifária para a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e calculado o valor do excedente de energia de acordo com a legislação vigente.

Quanto a classificação, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em: sistemas *on-grid* (conectados à rede), sistemas *off-grid* (isolados da rede) e sistemas híbridos. As principais características desses sistemas serão abordadas a seguir.

Os sistemas fotovoltaicos *on-grid* são aqueles que possuem como principal característica a ausência de acumuladores, pois a energia gerada é consumida pelas cargas ou injetada na rede elétrica da concessionária, para ser utilizada por outras unidades consumidoras. Dessa forma, a geração de energia fotovoltaica é um complemento à energia entregue pela rede da concessionária (PINHO; GALDINO, 2014). Esses sistemas são empregados em locais já atendidos por energia elétrica e tem o potencial de reduzir ou eliminar o consumo da rede pública, podendo até gerar excedente de energia. Dessa forma, a unidade passa de consumidora

para produtora de energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Os sistemas *on-grid* normalmente são compostos por: módulos fotovoltaicos, para geração de energia, inversor *on-grid*, quadro de distribuição e medidor, que pode ser bidirecional ou unidirecional (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 7 ilustra esse tipo de sistema.

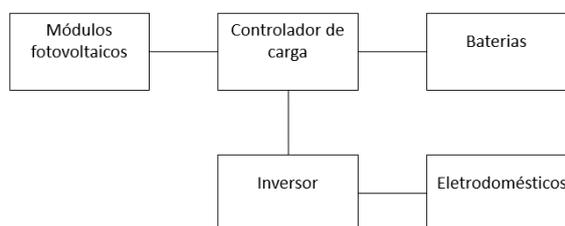
Figura 7 – Modelo de sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014 (adaptado).

Os sistemas fotovoltaicos *off-grid* são normalmente empregados em locais que não são atendidos pela rede elétrica e por isso necessitam de algum tipo de armazenamento de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2012). O armazenamento de energia pode ser feito: por baterias, para utilização em períodos em que não há geração fotovoltaica; por sistema de bombeamento de água, armazenando a energia na forma de energia potencial gravitacional; por volante de inércia (flying wheel); entre outros (PINHO; GALDINO, 2014). Os sistemas *off-grid* possuem como principais componentes: módulos fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor *off-grid* (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 8 ilustra esse tipo de sistema.

Figura 8 – Modelo de sistema fotovoltaico *off-grid*.



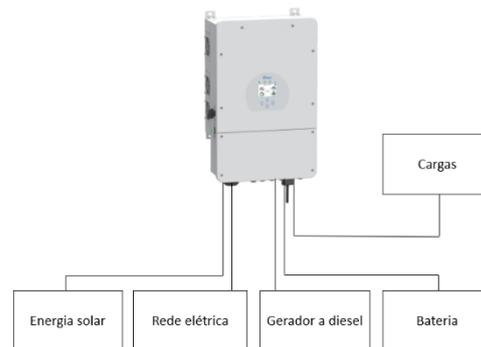
Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012 (adaptado).

Os sistemas fotovoltaicos híbridos são aqueles que apresentam diferentes fontes de geração de energia quando estão desconectados da rede da concessionária, como: geração de energia solar fotovoltaica, geração de energia eólica, geradores a diesel, entre outras. Eles também podem ter sistema de armazenamento de energia. Devido a essas características são de

grande complexidade, sendo necessário gerir cada fonte para a eficiência máxima do sistema. Por isso, o melhor projeto vai depender da análise e estudo de cada caso (CRESESB, 2006).

Para o gerenciamento das diferentes fontes de energia que compõem o sistema fotovoltaico híbrido é necessário um inversor específico, normalmente chamado de inversor híbrido. A Figura 9 ilustra esse tipo de sistema, dando destaque para o inversor (NEOSOLAR, 2024).

Figura 9 – Modelo de sistema fotovoltaico híbrido, baseado no inversor híbrido Deye SUN5K.



Fonte: NEOSOLAR, 2024 (adaptado).

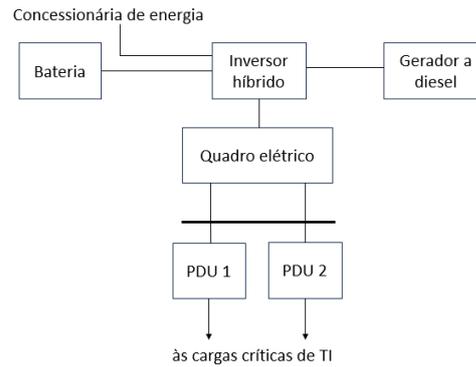
2.3 Sistemas fotovoltaicos para *data centers*

Para Zucchi e Amâncio (2013), embora existam sistemas com bateria de lítio e módulos fotovoltaicos para que possam desempenhar papel semelhante às UPS, o custo desses sistemas e a baixa eficiência tornam a adoção da tecnologia inviável, apesar o ganho em sustentabilidade.

Já para Marin, qualquer fonte de energia pode ser utilizada para a alimentação de um *data center*, sem que qualquer norma para infraestrutura de *data centers* seja violada. O autor também destaca a relação custo-benefício interessante de alguns sistemas fotovoltaicos para *data centers* (FILHO, 2016).

Uma possível configuração de um *data center tier I* pode ser observada na Figura 10. Nela há uma configuração similar a apresentada na Figura 5, mas que conta com um inversor híbrido pra gerenciar as diferentes fontes de energia da instalação.

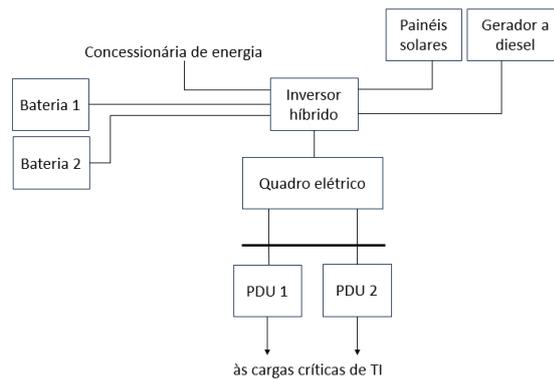
Figura 10 – Exemplo de distribuição elétrica de um *data center tier I*.



Fonte: o autor.

Para o *data center tier II* com sistema fotovoltaico uma possível configuração está representada na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de distribuição elétrica de um *data center tier II*.



Fonte: o autor.

A Figura 11 mostra uma configuração similar a apresentada na Figura 6, com a utilização de painéis solares como fonte de energia secundária e uma bateria redundante, caso a bateria principal falhe. O gerador a diesel continua presente, para situações emergenciais onde não há nenhuma outra fonte de energia disponível. O inversor híbrido, assim como na configuração apresentada na Figura 10, administra as fontes de energia da instalação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Definições do *data center*

O *data center* que será analisado está localizado no Centro Administrativo da Prefeitura de Paracatu-MG. O prédio possui 4 pavimentos, sendo eles: subsolo, térreo, primeiro e segundo andar. A Figura 12 mostra a vista frontal do prédio.

Figura 12 – Vista frontal do Centro Administrativo da Prefeitura de Paracatu-MG.

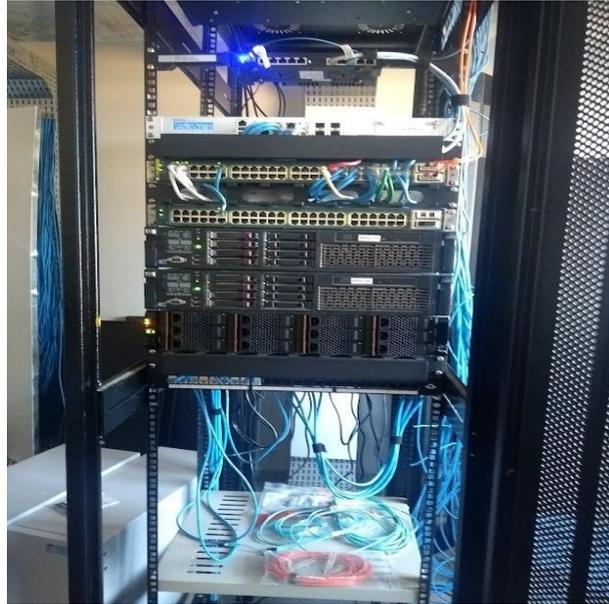


Fonte: GOOGLE MAPS, 2024.

Com relação ao clima, o predominante no município de Paracatu é o tropical. A temperatura média na cidade é de 23.2 °C. A máxima temperatura média é de 30.8 °C e ocorre no mês de outubro. Já a mínima temperatura média é de 15.4 °C e ocorre no mês de julho. A precipitação anual é de aproximadamente 1394 mm (CLIMATE DATA, 2024).

Os equipamentos de rede que compõem o *data center* estão em dois *racks*. A Figura 13 apresenta os equipamentos que compõem o *rack*. São eles: 2 *Server* HP Proliant DL380 G7, 2 *Switch* Cisco Catalyst 3560-E Series e 1 *Firewall* Sophos XG 310. O outro *rack* possui como equipamentos apenas 2 *Switch* D-Link DGS-1250-52XMP.

Figura 13 – Um dos *racks* do *data center*.



Fonte: o autor.

Além dos equipamentos citados, também faz parte do *data center* 1 Ar-condicionado Split Springer Midea, de 22.000 BTU/h, modelo 42MACA22S5, representado na Figura 14.

Figura 14 – Ar-condicionado instalado na sala do *data center*.



Fonte: o autor.

O levantamento de cargas do *data center* se deu por observação dos equipamentos, analisando as especificações contidas nas etiquetas deles e por pesquisa da documentação de cada equipamento nos sites dos fabricantes. Desta forma, foi possível elaborar a Tabela 1, que contém a potência, tensão, quantidade e consumo diário de energia de cada equipamento.

Tabela 1 – Levantamento de cargas do *data center*.

Equipamento	Tensão [V]	Potência Unitária [W]	Quantidade	Potência Total [W]	Horas utilizadas por dia [h/dia]	Consumo diário [Wh/dia]
<i>Server</i> HP Proliant DL380 G7	100-240	460	2	920	24	22080
<i>Switch</i> Cisco Catalyst 3560-E Series	115-240	265	2	530	24	12720
<i>Firewall</i> Sophos XG 310	100-240	49	1	49	24	1176
<i>Switch</i> D-Link DGS-1250-52XMP	100-240	57,2	2	114,4	24	2745,6
Lâmpada LED	100-240	12	6	72	24	1728
Ar-condicionado Split Springer Midea	220	1990	1	1990	24	47760
Total das cargas CA	-	-	-	3675,4	-	88209,6

Fonte: o autor.

Devido ao *data center* funcionar de forma ininterrupta, o número de horas utilizadas por dia foi considerado como sendo 24 horas.

O consumo diário total obtida das cargas, 88,2096 kWh/dia, pode parecer muito alto em um primeiro momento. Porém, está condizente com o esperado de um *data center* de pequeno porte. Um dos *data centers* da Meta, por exemplo, registrou consumo anual de 270000 MWh em 2020, o que seria uma média diária de consumo de 739,726 MWh/dia (KIM;KIM, 2022).

3.2 Definições da unidade consumidora

De acordo com a fatura de energia do Centro Administrativo do mês de fevereiro de 2024, a classe da unidade consumidora é “Poder público trifásico” e a subclasse é “Poder

público municipal”. O enquadramento tarifário da unidade consumidora é o “Convencional B3”. A bandeira vigente é a verde, cuja tarifa unitária (livre de impostos) é R\$0,74906/kWh (CEMIG, 2024). O consumo registrado para o período (08/01/24 a 05/02/2024), para todo o Centro Administrativo, foi de 17360 kWh. Vale destacar que o consumo mensal observado para os meses anteriores foi próximo desse valor.

3.3 Apresentação do *software* HOMER Pro

O HOMER é, em sua essência, um simulador, que pode simular centenas ou até milhares de sistemas em busca do sistema mais viável, de acordo com os dados inseridos. Ele simula a operação de uma microrrede durante um ano inteiro, em intervalos de tempo de um minuto a uma hora (HOMER ENERGY, 2024).

Durante a otimização o HOMER utiliza o algoritmo proprietário HOMER *Optimizer*, que examina em uma única execução todas as combinações possíveis de tipos de sistemas, retornando a classificação deles de acordo com a variável escolhida (HOMER ENERGY, 2024).

Com a análise sensitiva, é possível verificar o impacto de variáveis que estão além do seu controle, como o custo do combustível, a velocidade do vento, e entender o impacto dessas variações no sistema ideal (HOMER ENERGY, 2024).

O HOMER ainda pode ser customizado com até 9 módulos especiais. Eles permitem, por exemplo, adicionar: o recurso de biomassa; geração, armazenamento e consumo de hidrogênio; tarifas da rede, falhas no fornecimento e análise de extensão; entre outros (HOMER ENERGY, 2024).

O *software* é pago e possui diferentes modelos de licença, mas conta com avaliação gratuita de 21 dias, que não necessita dos dados do cartão do usuário. A licença utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi a *Student*, com duração de 4 meses, obtida mediante comprovação de matrícula em instituição de ensino e pagamento de \$59,91. Esse valor foi convertido para a moeda corrente, equivalendo a R\$308,89. Vale ressaltar que esse é o plano mais barato possível disponível no site. Outro ponto importante é que esse tipo de licença é limitada para uso de 1 estudante matriculado em instituição de ensino superior e deve ser utilizada para fins relacionados ao programa educacional da instituição, como este Projeto Final de Curso. O uso comercial é proibido para esse tipo de licença (HOMER ENERGY, 2024).

Com relação aos requisitos de sistema, o HOMER Pro pode ser utilizado na versão *Windows 7 Service Pack 1* ou posteriores, mas é recomendada a utilização do *software* no

sistema operacional *Windows 10*. Existem versões de 32 bits e 64 bits, mas a última é a mais recomendada. Por fim, para os usuários de computadores Mac é necessária a utilização de um emulador *Windows* (HOMER ENERGY, 2024).

3.3.1 Critérios econômicos adotados pelo *software*

O *software* HOMER Pro leva em consideração alguns critérios em suas análises econômicas. A seguir serão abordados alguns desses critérios.

O custo presente líquido (NPC - *Net Present Cost*), é um dos indicadores mais importantes para o HOMER. Ele representa o valor presente (VP) de todos os custos do projeto ao longo do seu tempo de vida menos o VP de todos os ganhos do projeto ao longo do seu tempo de vida. Alguns dos custos considerados pelo *software* são: capital inicial, operação e manutenção, reposição, combustível (caso seja utilizado gerador a diesel, por exemplo) e custos pela compra de energia da rede. Alguns dos ganhos considerados são: o valor restante de um componente após o fim do ciclo de vida do projeto (o *software* consegue calcular a depreciação do componente ao longo do tempo) e vendas de energia para a rede (UL SOLUTIONS, 2024).

Para entender o VP, é necessário entender o fator de desconto utilizado pelo *software*. Ele é o fator utilizado para calcular o VP de um fluxo de caixa em qualquer ano do ciclo de vida do projeto. A equação utilizada pelo HOMER para representar esse fator está destacada a seguir:

$$f_d = \frac{1}{(1+i)^N},$$

onde:

- f_d representa o fator de desconto;
- i é a taxa real de juros, em decimais;
- N representa o número de anos levado em consideração (UL SOLUTIONS, 2024).

Com essa definição do fator de desconto fica mais simples de entender o conceito do VP. Ele pode ser obtido multiplicando um valor futuro (VF) pelo fator de desconto correspondente àquele ano. Por exemplo, considerando um gasto anual de R\$35000,00 com combustível no terceiro ano de funcionamento de um gerador a diesel. A taxa real de juros no Brasil atualmente é de 6,95% ao ano. Essa taxa representa o valor da taxa de juros básica (Selic) menos a inflação (G1, 2024). Dessa forma, o fator de desconto para o período será:

$$f_d = \frac{1}{(1+0,0695)^3} = 0,9997.$$

O VP será:

$VP = R\$35000 * 0,9997 = R\$34988,25$.

O VP obtido no exemplo também pode ser entendido como custo presente.

O custo de energia nivelado (LCOE - *levelized cost of energy*) é definido pelo HOMER como sendo o custo médio por kWh da energia elétrica útil produzida pelo sistema (UL SOLUTIONS, 2024).

O operating cost, ou custo operacional, é o valor anual de todas as receitas e custos, com exceção dos custos de capital inicial (UL SOLUTIONS, 2024).

As despesas de capital (CAPEX - *Capital Expenditure*) são, para o *software*, o somatório dos custos iniciais do projeto com a aquisição de cada componente do sistema (UL SOLUTIONS, 2024).

Com o HOMER é possível comparar uma configuração específica do sistema, chamada de caso base, com a configuração ótima do sistema (por padrão, a configuração com menor NPC). Por meio dessa comparação são gerados os indicadores taxa interna de retorno (IRR - *internal rate of return*), retorno simples (*simple payback*) e retorno descontado (*discounted payback*).

A IRR é a taxa de juros que torna o NPC do caso base igual ao NPC do melhor caso (UL SOLUTIONS, 2024).

O retorno representa o número de anos necessários para que o fluxo de caixa cumulativo do sistema atual supere o fluxo de caixa cumulativo do sistema do caso base. Dessa forma, pode ser entendido como o tempo necessário para recuperar a diferença nos custos de investimento entre o sistema atual e o sistema do caso base. O retorno pode ser simples ou descontado. No retorno simples, a diferença nos custos de investimento considerada é a nominal. No retorno descontado, é considerada a diferença real (UL SOLUTIONS, 2024).

O retorno sobre o investimento (ROI - *return of investment*) representa a economia de custos anual em relação ao investimento inicial (UL SOLUTIONS, 2024).

3.3.2 Etapas do projeto no *software*

Na Figura 15 tem-se a primeira tela do programa. Nesta tela, chamada *Design*, é possível adicionar o nome do projeto, autor, descrição, taxa de juros (nominal), inflação, escassez anual de capacidade (*annual capacity shortage*), tempo de vida do projeto e localização.

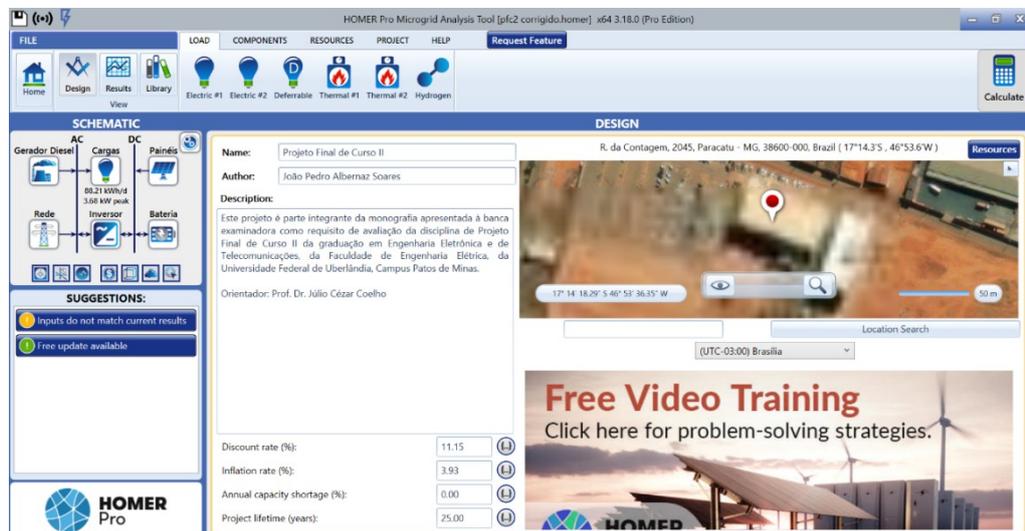
A taxa de juros nominal obtida para o período no Brasil foi de 11.15% e a inflação acumulada para o mesmo período no Brasil foi de 3.93% (IBGE, 2024).

A escassez de capacidade representa a carga que o gerador não conseguiu atender no período que, no caso da escassez anual, é de um ano (UL SOLUTIONS, 2024). Para o projeto será considerado que não haverá carga não atendida para o período, permanecendo o valor padrão de 0%.

O tempo de vida do projeto representa o período em que ocorrem gastos com o sistema projetado (UL SOLUTIONS, 2024). Será considerado o valor padrão, de 25 anos.

Na tela *Design* também é possível definir a localização do projeto. Ela também fornece diferentes visões da localização, como a visão aérea, representada na Figura 15. O marcador no mapa está disposto exatamente sobre o prédio do Centro Administrativo da Prefeitura.

Figura 15 – Tela *Design* do software HOMER Pro.



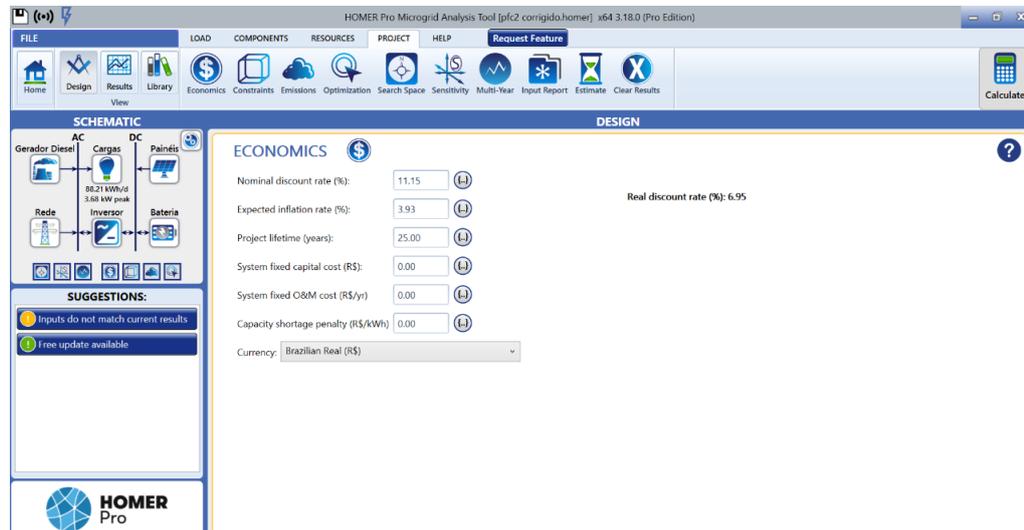
Fonte: o autor.

Outras opções presentes na tela *Design* são o *Take Tour* e o *Setup Assistant*. O *Take Tour* mostra algumas funções básicas do software, enquanto o *Setup Assistant* guia o usuário sobre cada etapa da criação de um projeto fotovoltaico com configurações básicas.

Assim que os componentes do sistema são adicionados eles serão apresentados no lugar dos campos *Take Tour* e *Setup Assistant*, mas eles podem ser acessados a qualquer momento na guia *Help*. O campo *Required Changes/Suggestions* mostra para o usuário configurações que estão faltando no projeto. As configurações necessárias para o funcionamento correto do sistema possuem um ícone vermelho com exclamação, as configurações menos urgentes possuem um ícone amarelo com exclamação e as configurações sugeridas estão indicadas pelo ícone verde com exclamação (UL SOLUTIONS, 2024).

Após essa etapa inicial, é interessante para o projetista ir na aba *Project* e selecionar *Economics*. Nesta opção é possível alterar a moeda. Para isso, basta ir em *Currency* e selecionar *Brazilian Real (R\$)*, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Tela *Economics* do software HOMER Pro.

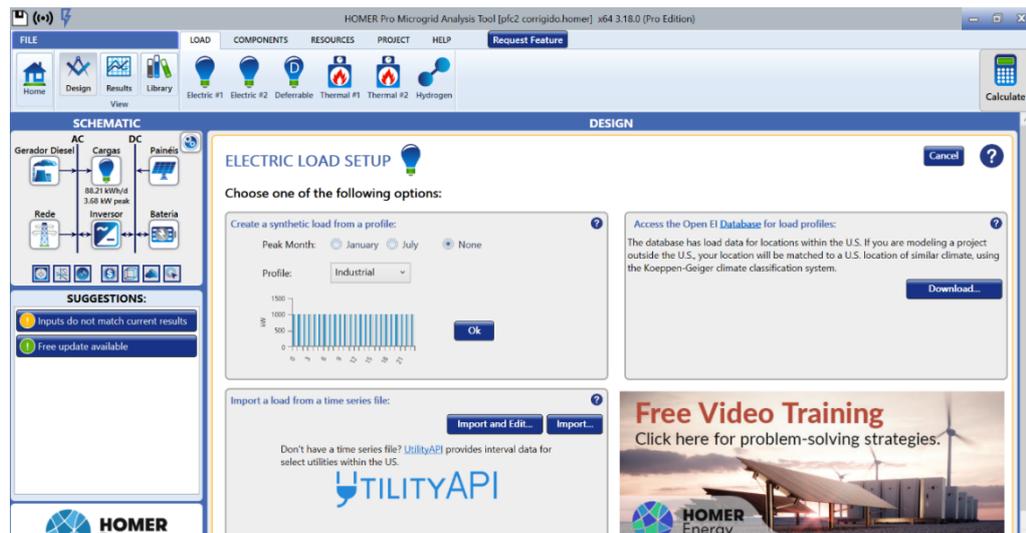


Fonte: o autor.

A próxima etapa do projeto é na aba *Load*. Nela é possível adicionar as cargas para o projeto. As cargas mais comuns para projetos são as do tipo *Electric*, pois elas representam a demanda por energia elétrica. Um tipo especial de carga é o *deferrable load*: é uma carga elétrica que requer energia em certos períodos. Um exemplo são bombas de água de reservatórios que não requerem energia a todo momento, apenas quando o nível do reservatório fica abaixo de um limite. Além disso, existem as cargas térmicas, que demandam energia térmica, e as cargas de hidrogênio, que demandam hidrogênio (UL SOLUTIONS, 2024).

Ao clicar no tipo de carga *Electric*, por exemplo, o software abrirá a tela indicada na Figura 17.

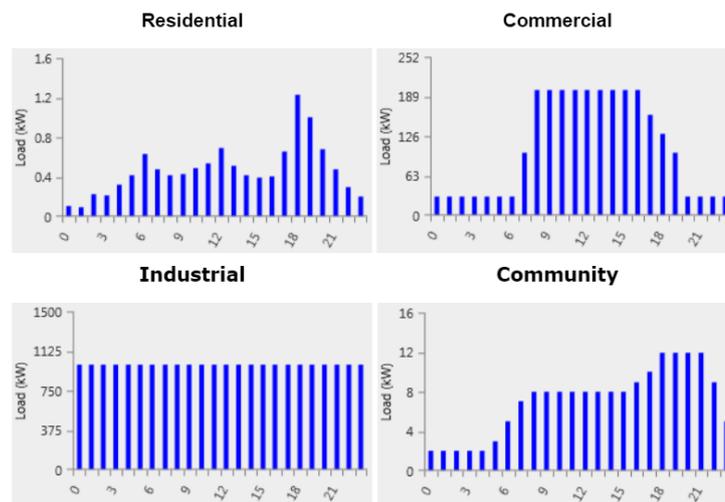
Figura 17 – Tela *Electric Load Setup*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Na tela *Electric Load Setup* é possível criar uma carga sintética realista, de acordo com perfis de carga pré-definidos e mês de pico, ou importar os dados de carga que o usuário coletou. Os perfis de carga pré-definidos do software são: *Residential*, *Commercial*, *Industrial*, *Community* e *Blank* (vazio). Eles estão representados na Figura 18.

Figura 18 – Perfis de consumo de energia das cargas ao longo do dia, utilizados pelo software HOMER Pro.



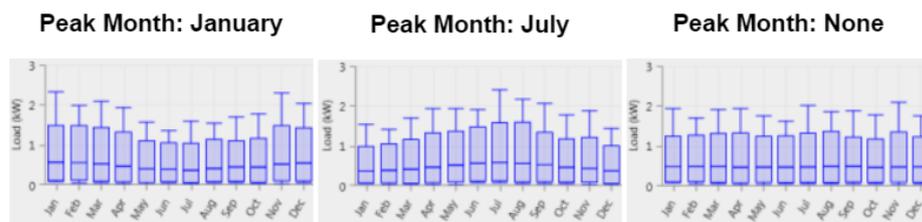
Fonte: UL SOLUTIONS, 2024.

No perfil *Residential* o consumo é maior por volta das 6, 12 e 18 horas, simulando uma rotina normal de consumo de energia em uma residência. As cargas em kW são as mais baixas dentre os perfis. No perfil *Commercial* o consumo é maior e quase constante em horário

comercial, que começa por volta das 8 horas e estende até às 20 horas aproximadamente. No perfil *Industrial* o consumo é constante, devido a necessidade de operação ininterrupta em linhas de produção. O consumo de energia é o mais elevado dentre os perfis, pois as cargas normalmente possuem alta potência (motores, por exemplo). Sobre o perfil *Community*, o *software* não possui uma definição clara, mas é possível verificar que ele possui características dos perfis *Residential* e *Commercial*. Por isso, o consumo de energia é quase constante durante horário comercial e é maior entre as 18 e 21 horas. Por fim, o perfil *Blank* é aquele que não traz nenhuma pré-configuração do *software*.

Com relação ao mês de pico, o programa traz como opções: *January* (janeiro), *July* (julho) e *None* (nenhum). Essas opções estão representadas na Figura 19.

Figura 19 – Perfis de consumo de energia das cargas ao longo do ano, utilizados pelo *software* HOMER Pro.



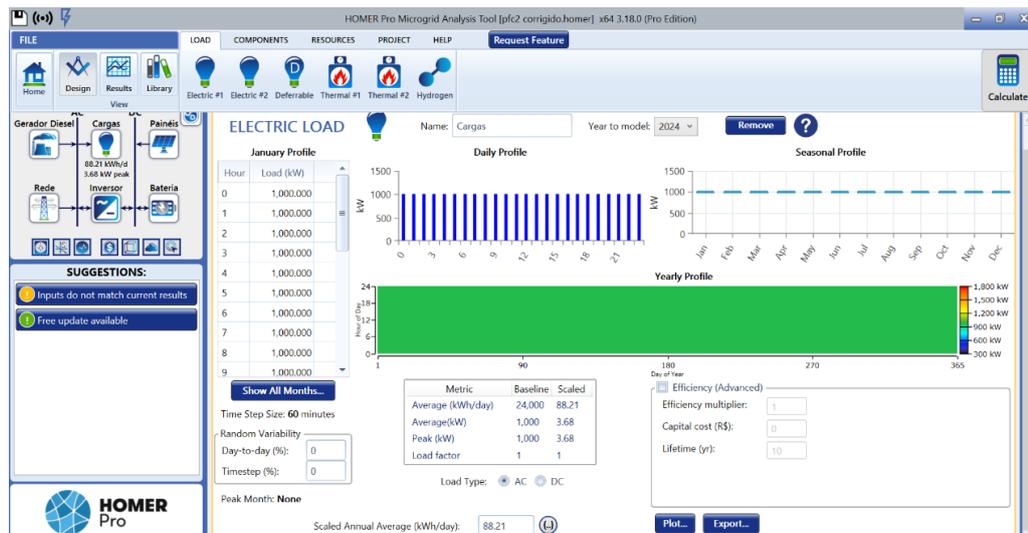
Fonte: UL SOLUTIONS, 2024.

Caso a opção *January* seja selecionada, o maior valor para a potência da carga ocorrerá no mês de janeiro. Nos meses subsequentes a carga irá diminuir, até chegar ao menor valor no mês de junho. Depois disso, a carga aumentará gradativamente, continuando o ciclo.

Para a opção *July* o comportamento é o oposto. O maior valor da carga ocorre em julho. Após esse pico, a carga reduz gradativamente, chegando ao seu menor valor por volta de janeiro. Depois a carga volta a aumentar, continuando o ciclo.

Para a opção *None* a carga terá um perfil anual uniforme, exceto por alguma variação aleatória, que pode ter seu percentual definido no *software*.

Por exemplo, selecionando *None* em *Peak Month* e *Industrial* em *Profile*, o *software* retornará a tela apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Tela *Electric Load*, do software HOMER Pro.

Fonte: o autor.

Em *January Profile* o software mostra a carga, a cada hora, em um dia do mês de janeiro. Essa é a carga que o próprio software gerou. Também é possível verificar a carga gerada para todos os outros meses em *Show All Months*. Em *Daily Profile* é possível constatar que a carga segue o perfil *Industrial*, definido anteriormente. Em *Seasonal Profile* é possível verificar que os valores de carga estão uniformemente distribuídos ao longo do ano. Em *Yearly Profile* é possível verificar a carga a cada dia do ano, representada por uma cor.

Em *Time Step Size* é mostrado o passo de tempo utilizado pelo software, que é de 60 minutos. Portanto, é considerado os valores de carga a cada 60 minutos.

Em *Random Variability*, é possível definir a variação aleatória desejada para a carga. *Day-to-day* representa o percentual de variação aleatória da carga a cada dia. *Timestep* representa a variação aleatória desejada a cada intervalo de 60 minutos.

Conforme mostra a Figura 21, o software gera dados apenas para 1 dia da semana e 1 dia do fim de semana de cada mês, hora a hora. Os demais dias são obtidos após a aplicação das variações aleatórias. Caso essas variações sejam zero, o software utilizará os mesmos dados de dias da semana para todos os dias da semana, e os mesmos dados de finais de semana para todos os finais de semana no período de um ano, indicando que as cargas são constantes.

Figura 21 – Tela *Yearly Load Data*, do software HOMER Pro.

Weekdays		Weekends							
Hour	January	February	March	April	May	June	July	August	September
0	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
1	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
2	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
3	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
4	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
5	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
6	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
7	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
8	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
9	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
10	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
11	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000

Fonte: o autor.

Na Figura 20 ainda existem parâmetros importantes para serem explicados. A tabela logo abaixo de *Yearly Profile*, por exemplo, será importante para o desenvolvimento desta monografia. Nessa tabela a coluna *Metric* (métricas) traz os parâmetros: *Average* (kWh/day), que representa o consumo diário médio; *Average* (kW), que é a média de potência da carga; *Peak* (kW), o pico de potência da carga; e *Load factor*, ou fator de carga, que é a carga média dividida pelo pico de potência da carga. Cada um desses parâmetros possui dois valores: *Baseline*, que são os valores pré-definidos do programa ou valores importados pelo usuário, e *Scaled*, que são valores escalonados que o usuário define, para que o programa adapte as configurações prévias para novos valores de carga. Essa é uma opção importante pois permite o usuário utilizar o modelo do *software* para a sua carga de forma bem simples. Por padrão, os valores *Baseline* e *Scaled* são iguais, mas é possível alterar os valores escalonados informando a *Scaled Annual Average*, ou média anual escalonada, em kWh/dia (UL SOLUTIONS, 2024).

Por fim, nessa tela também tem opções para definir o tipo da carga em AC ou DC, no campo *Load type*. A aba *Efficiency (Advanced)* envolve medidas para trazer maior custo-benefício para o sistema, como substituir uma lâmpada fluorescente por uma lâmpada de LED, por exemplo. Essa medida impactaria no consumo de energia, e o HOMER consegue calcular isso. Outras opções presentes na tela apresentada na Figura 20 são: *Plot*, que gera diferentes tipos de gráficos para a carga, e *Export*, que permite exportar os dados escalonados para um arquivo (UL SOLUTIONS, 2024).

Para o presente projeto será considerada uma única carga, chamada Cargas, que representa as cargas críticas (equipamentos de rede), as cargas de iluminação e o ar-condicionado. Essa carga será definida como *Industrial*, pois o seu uso é constante, e mês de pico *None*, pois não são cargas que possuem variação sazonal. A média anual escalonada para

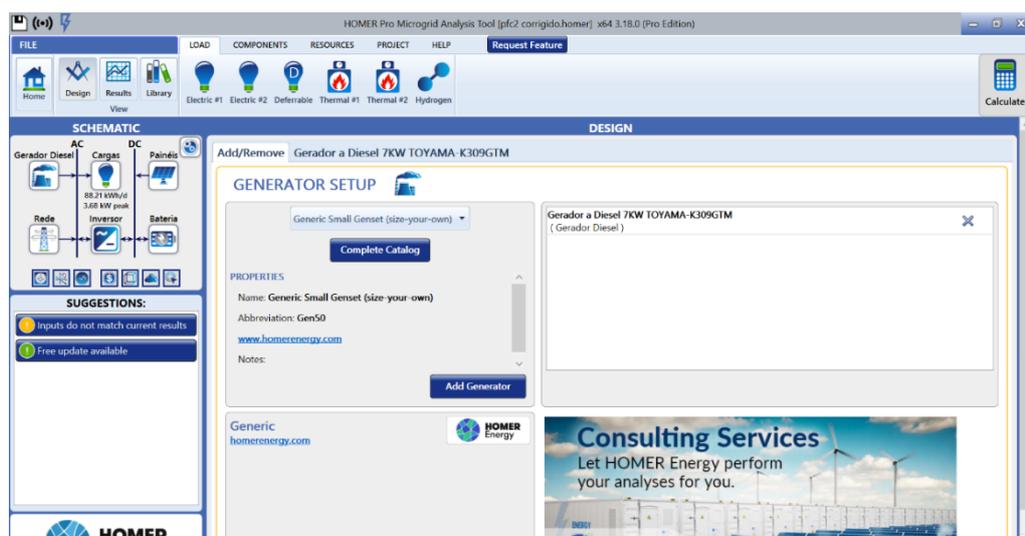
essa carga será, de acordo com a Tabela 1, 88,21 kWh/dia. A variação aleatória definida para as cargas será de 0% para cada dia e para cada intervalo de tempo de 60 minutos.

A aba *Components* apresenta os principais componentes de um projeto de sistema fotovoltaico híbrido. Devido a variedade de componentes e configurações possíveis será dado foco aos componentes necessários para o desenvolvimento do projeto proposto nesta monografia: *Generator* (gerador a combustível), *PV* (painéis fotovoltaicos), *Storage* (armazenamento de energia), *Converter* (inversor) e *Grid* (rede elétrica).

Para os painéis fotovoltaicos, inversor e armazenamento de energia será utilizada a abordagem da autora Tamara Martins Alves, que consistiu em utilizar como dados de entrada do *software* as especificações contidas em kits fotovoltaicos, normalmente comercializados em lojas especializadas (ALVES, 2020). Para isso, foi definido o kit fotovoltaico *On Grid* Híbrido - 6,44kWp 5000Wh Lítio 220V da NeoSolar, por ser o kit fotovoltaico híbrido disponível no site com a maior geração de energia por mês, que pode chegar a 772 kWh/mês (NEOSOLAR, 2024). Esse kit conta com 14 painéis fotovoltaicos de 460 W, bateria de lítio de 5000 Wh e inversor híbrido de 5 kW. Foram utilizadas as especificações e preço desses equipamentos.

A Figura 22, apresenta a configuração inicial para os geradores a combustível, que consiste em selecionar um gerador dentre as opções disponíveis em um catálogo, em *Complete Catalog*, ou permitir que o próprio *software* dimensione o gerador de acordo com o sistema proposto, marcando *Autosize Genset*. Esta última será a opção escolhida para o trabalho.

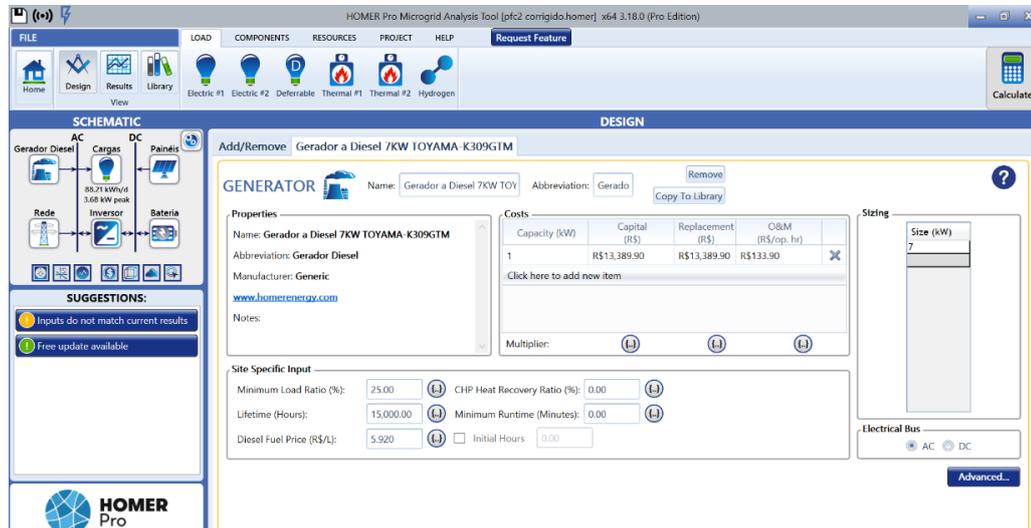
Figura 22 – Tela *Generator Setup*, do *software* HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Ao selecionar *Autosize Genset* e clicar em *Add Generator* será apresentada a tela da Figura 23.

Figura 23 – Tela *Generator*, do *software* HOMER Pro.

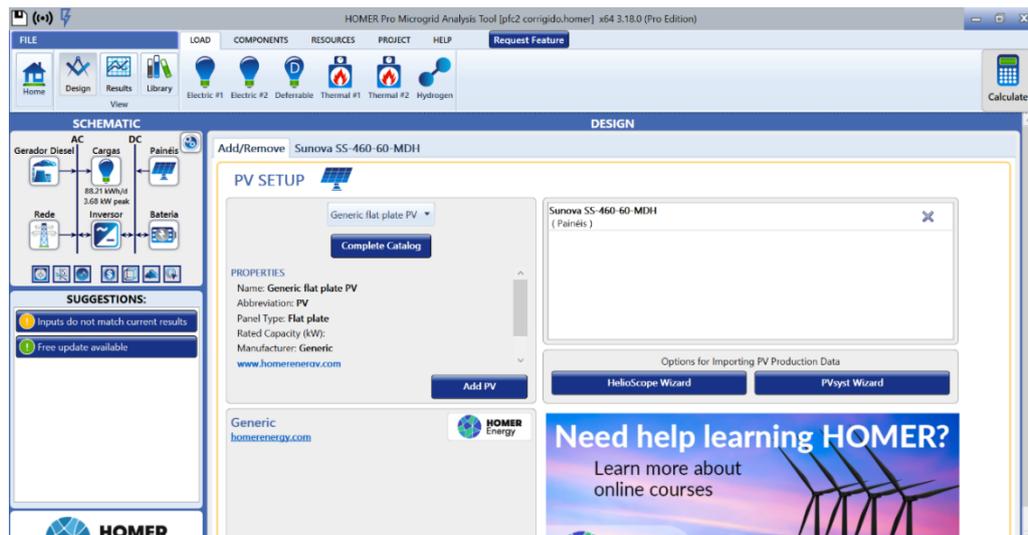


Fonte: o autor.

Apesar do *software* dimensionar o gerador, ainda será necessário informar alguns dados. Foi considerado o custo inicial do gerador como sendo R\$13389,90, custo de reposição de R\$13389,90 e custo de operação e manutenção (por hora operada) de R\$133,899, que representa 1% do custo do gerador. O percentual representa uma estimativa retirada do trabalho de Monteiro, porém de forma conservadora (MONTEIRO; NETTO; SOUZA, 2018). Essa estimativa foi necessária devido à dificuldade de calcular o valor relativo aos custos operacionais (DE CASTRO, 2020). Os demais valores são os mesmos do gerador de energia cabinado a diesel, da marca Toyama, modelo K309GTM (LOJA DO MECÂNICO, 2024). O combustível utilizado é o diesel, cujo preço médio hoje no Brasil é de R\$5,92 (PETROBRÁS, 2024).

Na opção PV, a configuração inicial é apresentada na Figura 24. É possível selecionar uma opção de painel solar dentre as disponíveis no catálogo do sistema ou importar os dados de produção de energia solar do usuário para o *software*. Para este trabalho, será considerada a opção *Generic flat plate PV*, ou painel fotovoltaico plano genérico, por ser a opção que mais se aproxima dos painéis fotovoltaicos do kit definido para o projeto. A Figura 24 mostra essa tela de configuração dos painéis.

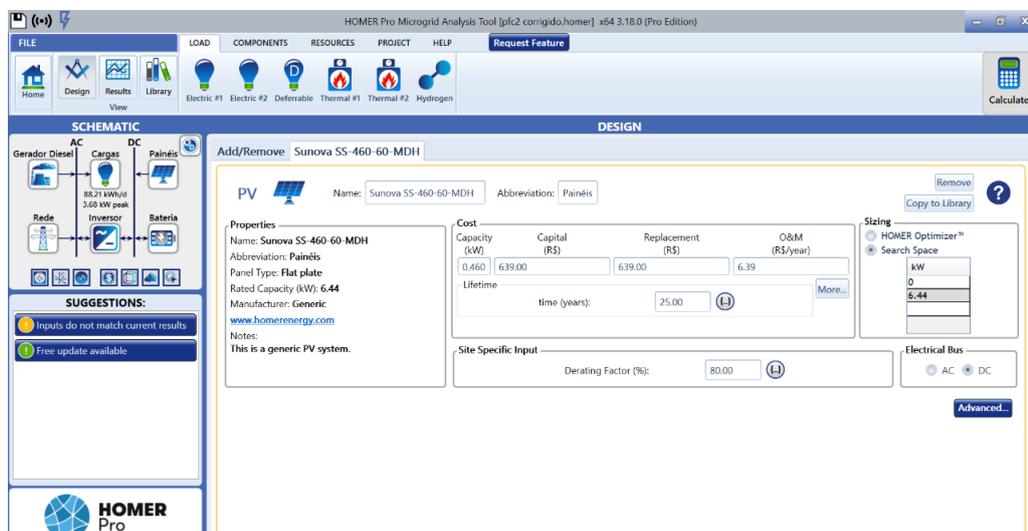
Figura 24 – Tela PV Setup, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Ao clicar em *Add Generator*, será apresentada a tela da Figura 25. Nela é possível inserir os dados dos painéis fotovoltaicos. Para este trabalho foi definido o painel solar de 460 W da Sunova, modelo SS-460-60-MDH, presente no kit fotovoltaico. O custo inicial do painel é de R\$639,00, com custo de reposição de R\$639,00 e custo de operação e manutenção de R\$6,39, que representa 1% do custo do painel (NEOSOLAR, 2024). Assim como ocorreu com o gerador a diesel, esse percentual representa uma estimativa conservadora retirada do trabalho de Monteiro (MONTEIRO; NETTO; SOUZA, 2018). Com a utilização dos 14 painéis fotovoltaicos que compõem o kit selecionado a carga total dos painéis foi de 6,44 kW. O usuário pode definir a carga total dos painéis selecionando *Search Space*, no campo *Sizing*.

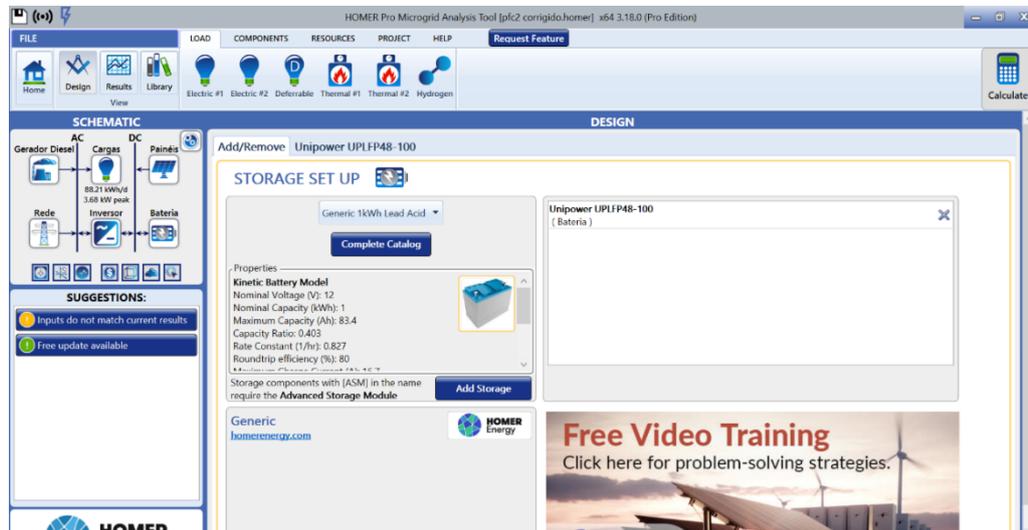
Figura 25 – Tela PV, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Ao clicar em *Storage*, na aba *Components*, o usuário verá a tela da Figura 26. Essa configuração inicial também consiste em selecionar uma bateria dentre as disponíveis no catálogo do *software*.

Figura 26 – Tela *Storage Setup*, do *software* HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Para este projeto, será selecionada a opção *Polarium SLB48-050-124-2*, uma bateria de íons de lítio de 5 kWh, pois é a bateria que mais se aproxima da bateria do kit fotovoltaico considerado neste trabalho. Para selecionar essa opção de bateria o usuário deve ir à opção *Complete Catalog*, onde serão apresentados diversos modelos, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Tela *Find Storage Component*, do *software* HOMER Pro.

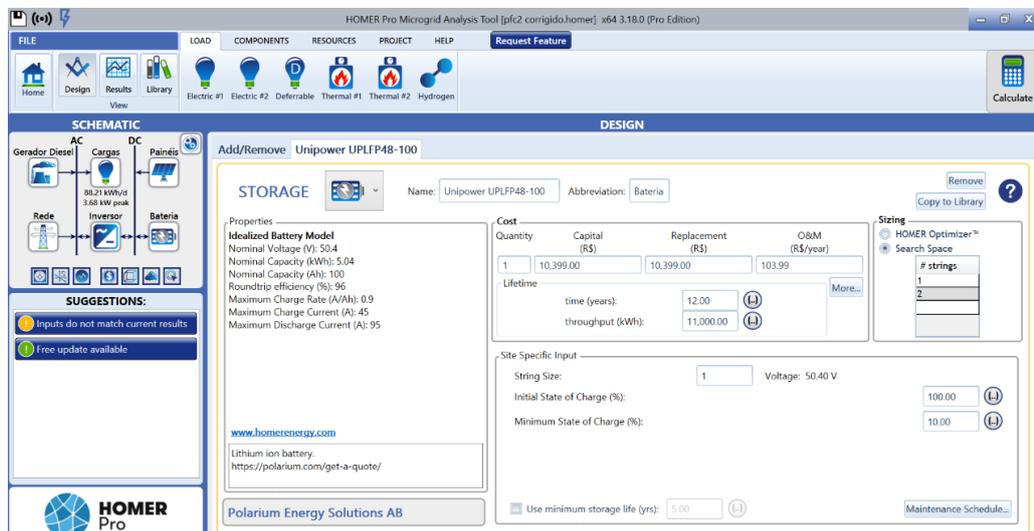
Name	Library	Manufacturer	Type	Chemistry	Model	Capacity (kWh)	Voltage (V)	Duration (hours)	Max discharge power (kW)
Hoppecke 16 OPzS 2000	Pro Default	Hoppecke	Battery	Lead Acid	Kinetic	4.76	2	5.9	0.812
SmatLi-672V-100AH-F/S	Pro Default	Huawei	Battery	Li-Ion	Idealized	4.8	48	1	4.8
SENEC.Home V3 hybrid 10 Storage C	Pro Default	SENEC GmbH	Battery	Li-Ion NMC	Idealized	4.843	51.5	1.3	3.874
SENEC.Home V3 hybrid 5 Storage C	Pro Default	SENEC GmbH	Battery	Li-Ion NMC	Idealized	4.843	51.5	2.5	1.937
Polarium SLB48-050-124-2	Pro Default	Polarium Energy So	Battery	Li-Ion	Idealized	5.04	50.4	1.1	4.788
Polarium SLB48-100-144-2	Pro Default	Polarium Energy So	Battery	Li-Ion	Idealized	5.04	50.4	1.1	4.788
EnerSys PowerSafe TZS 14	Pro Default	EnerSys	Battery	Lead Acid	Kinetic	5.046	2	2.1	2.44
Eternity Technologies 14 OPzS-ET 24	Pro Default	Eternity Technologi	Battery	Free Vented Lec	Idealized	5.048	2	1.3	3.85
Exide Technologies A602/3270 SOLA	Pro Default	Exide Technologies	Battery	Lead Acid	Idealized	5.06	2	1.2	4.132
LI-ONICS ES-DV	Pro Default	SUNLIGHT	Battery	Li-Ion	Idealized	5.12	51.2	1.2	2.84

Fonte: o autor.

Ao clicar em *Add Storage*, o usuário é apresentado a tela ilustrada na Figura 28. Para este projeto, foi considerada a bateria solar de Lítio de 5 kWh, da *Unipower*, modelo UPLFP48-100, com ciclo de vida de 6000 ciclos, o que equivale a 12 anos com profundidade de descarga

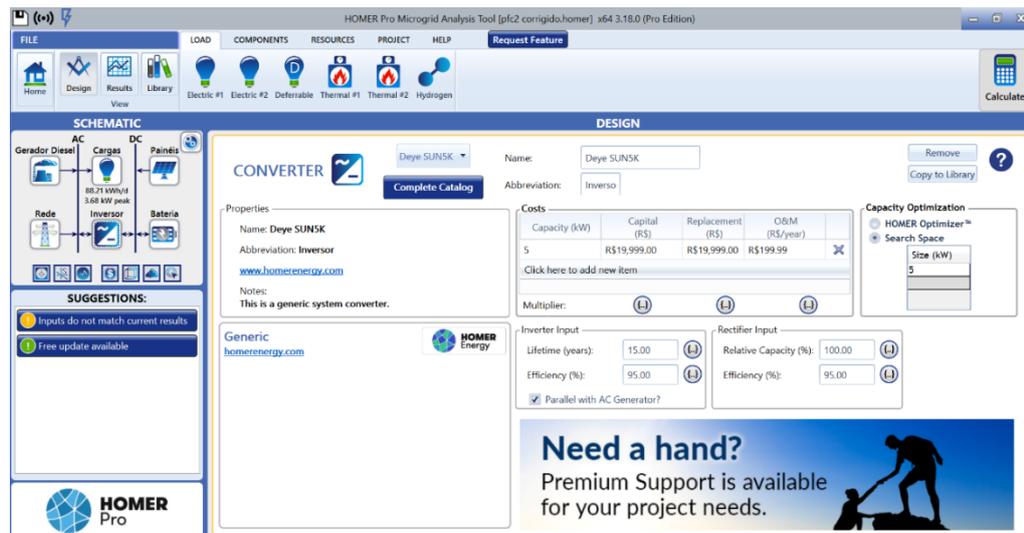
de 90%. Isso significa que a bateria pode ser utilizada, em um ciclo, até atingir 10% de sua capacidade. O custo inicial da bateria é de R\$10399,00, com custo de reposição de R\$10399,00 e custo de operação e manutenção de R\$103,99, que representa 1% do custo da bateria (NEOSOLAR, 2024). Tal percentual representa uma estimativa conservadora retirada do trabalho de Monteiro (MONTEIRO; NETTO; SOUZA, 2018). O *throughput* da bateria representa a quantidade de energia que circula pela bateria em um ano (UL SOLUTIONS, 2024). Será mantido o valor padrão do *software* para o modelo selecionado, que é de 11000 kWh. A opção que permite que o *software* realize o dimensionamento da bateria é a HOMER *Optimizer*, em *Sizing*.

Figura 28 – Tela *Storage*, do *software* HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Ao clicar em *Converter*, o usuário é apresentado a Figura 29. Nela também é possível selecionar uma opção de inversor dentre as disponíveis no catálogo do *software*. O inversor utilizado foi aquele presente no kit fotovoltaico, o inversor híbrido *On + Off Grid Deye*, modelo SUN5K, de 5 kW. O custo inicial do inversor é de R\$19999,00, com custo de reposição de R\$19999,00 e custo de operação e manutenção de R\$199,99, que representa 1% do custo do inversor (NEOSOLAR, 2024). O percentual representa uma estimativa conservadora retirada do trabalho de Monteiro (MONTEIRO; NETTO; SOUZA, 2018). A opção que permite que o *software* realize o dimensionamento da bateria é a HOMER *Optimizer*, em *Sizing*.

Figura 29 – Tela *Converter*, do *software* HOMER Pro.

Fonte: o autor.

Em *Grid*, o usuário é apresentado a tela da Figura 30. Nela é possível definir os parâmetros da rede, como o preço do kWh, o preço de revenda da energia produzida pelo sistema projetado, taxas para dias e horários específicos de uso da rede da concessionária, e muitos outros. Para este trabalho, será considerada a opção *Simple Rates*. De acordo com a fatura de energia do Centro Administrativo, a Prefeitura paga aproximadamente R\$0,9613/kWh, incluindo tributos.

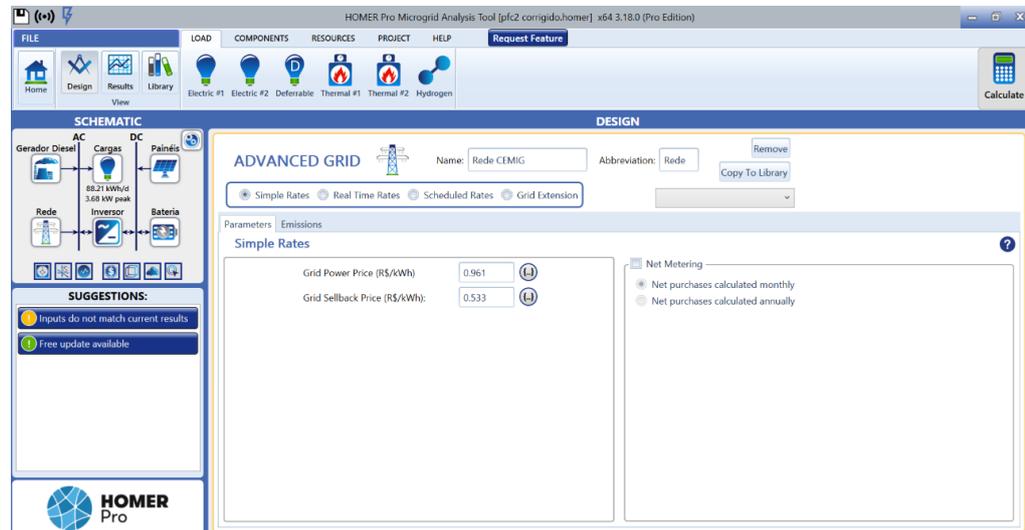
Para obter o valor do excedente de energia é necessário o valor da componente tarifária TUSD Fio B. Considerando os dados do projeto (concessionária CEMIG, unidade consumidora B3, modalidade Convencional), o valor da componente tarifária foi de R\$0,24038/kWh. Sobre esse valor que incide os percentuais descritos no Capítulo VI, artigo 26 da lei nº 14300 de 2022.

Conforme citado no capítulo 2 deste trabalho, a lei estipula um aumento gradativo da nova taxa sobre o excedente de energia. Porém, o *software* HOMER Pro não permite tal incremento anual de taxas sobre a energia elétrica produzida. Por isso foi considerado, para este trabalho, o valor máximo do percentual que a lei estipula, sendo este de 90%. Esse percentual é aplicado sobre a componente tarifária TUSD Transporte Fio B, representando um acréscimo de R\$0,216342/kWh na referida componente.

De posse desse valor, resta aplicá-lo sobre o valor do kWh cobrado pela CEMIG para a unidade consumidora, sem tributos. De acordo com a fatura de energia do Centro Administrativo, a Prefeitura paga aproximadamente R\$0,74906/kWh, excluídos tributos. Dessa forma, o valor de revenda de energia considerado para o projeto foi de R\$0,533/kWh.

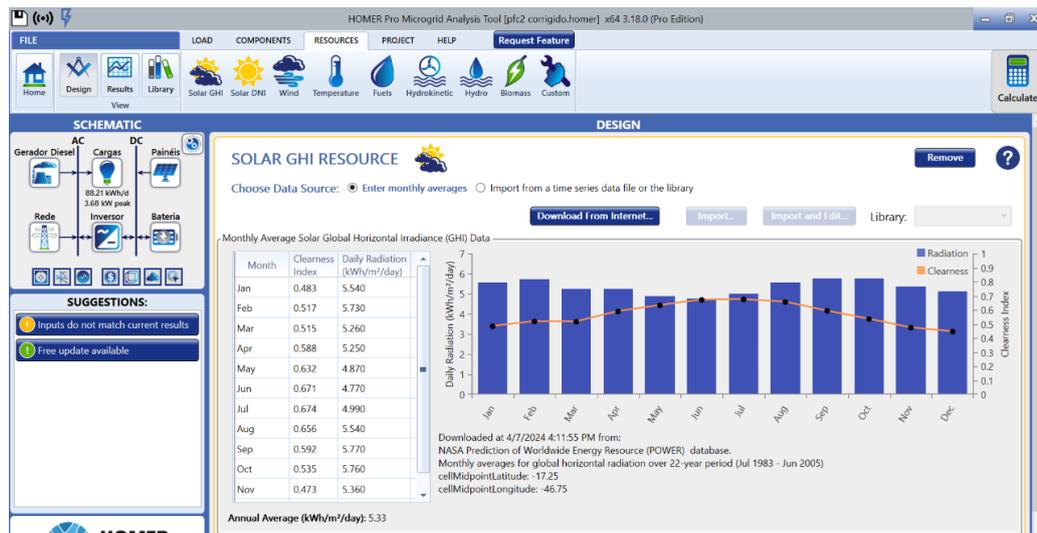
Com relação a bandeira tarifária foi considerada, para este trabalho, a bandeira verde, devido ao anúncio recente da ANEEL que marcou dois anos consecutivos da bandeira verde no país (ANEEL, 2024).

Figura 30 – Tela *Advanced Grid*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

As últimas configurações necessárias para o funcionamento do sistema estão na aba *Resources*, na opção *Solar GHI (Global Horizontal Irradiation)*. Ao clicar nessa opção, o usuário verá a tela representada na Figura 31. Nela é possível baixar da internet os dados de irradiação solar para a localidade, digitar manualmente ou importar dados coletados pelo usuário. Esses dados são necessários para que o *software* calcule a produção de energia dos painéis solares.

Figura 31 – Tela Solar GHI Resource, do *software* HOMER Pro.

Fonte: o autor.

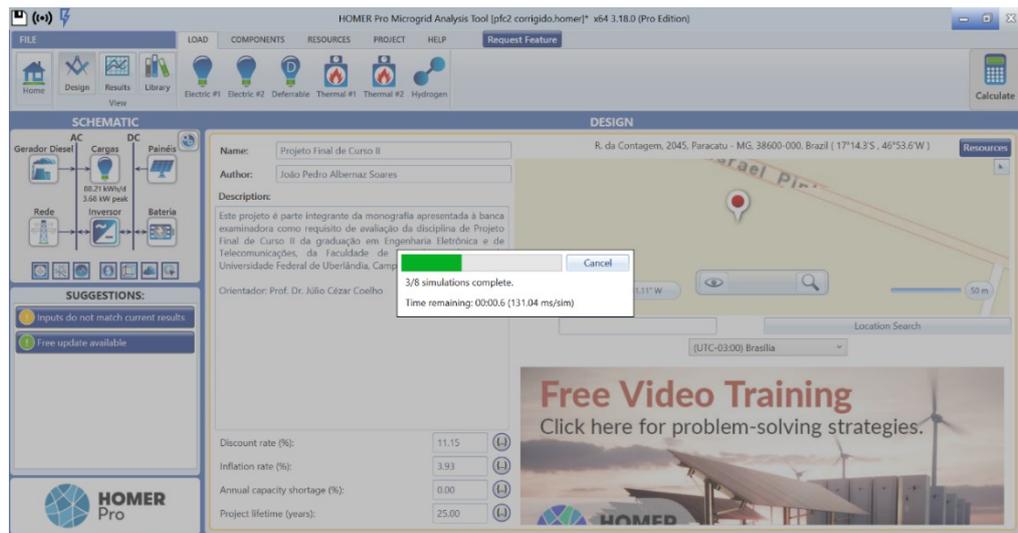
Ao finalizar as configurações do sistema basta clicar na opção *Calculate*, no canto superior direito da tela do *software*. Antes disso ainda é possível verificar o tempo estimado para a simulação, clicando na opção *Estimate* da aba *Project*. Conforme Figura 32 é possível verificar que, para a configuração do sistema projetado, o HOMER fará 8 simulações em menos de 1 segundo.

Figura 32 – Recorte da tela do *software* HOMER Pro com ênfase para o número de simulações a serem realizadas.

Fonte: o autor

Ao clicar em *Calculate*, o HOMER iniciará a simulação e otimização dos componentes e do projeto como um todo, de acordo com o critério de menor NPC. Esse processo está mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Recorte da tela do *software* HOMER Pro durante a etapa de otimização.



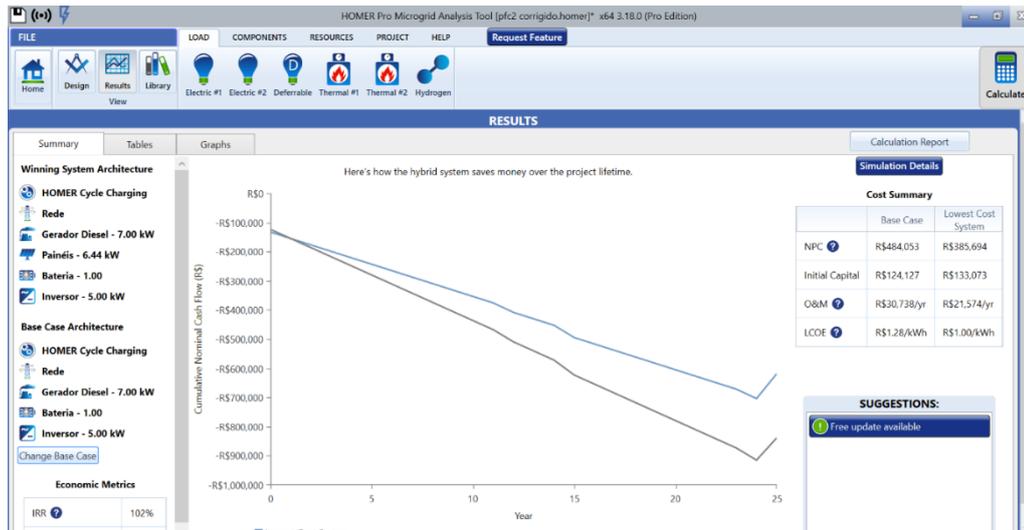
Fonte: o autor.

O *software* HOMER Pro é um programa voltado para a realidade dos Estados Unidos. Mas a quantidade de recursos que ele possui permite que ele seja utilizado em outras regiões de forma satisfatória, desde que sejam realizadas adaptações. As principais adaptações utilizadas para este trabalho foram: a bandeira tarifária, definida como verde para todos os anos de vida do projeto, o percentual acrescido à componente tarifária TUSD Transporte Fio B, que foi fixado em 90%, e o custo operacional de cada componente, definido como 1% do capital inicial.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Após o *software* finalizar a simulação, a tela *Results* foi aberta na aba *Summary*, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 – Tela *Results*, aba *Summary*, do *software* HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Pela Figura 34 foi possível observar que a arquitetura com o menor NPC para o sistema foi a configuração que utiliza a rede da concessionária, gerador a diesel, painéis fotovoltaicos, bateria e inversor, em comparação com a configuração que não conta com os painéis solares.

A configuração de menor NPC representa uma possível configuração de *data center tier* II para as cargas do *data center* da Prefeitura de Paracatu. A outra configuração, chamada de arquitetura caso base (*Base Case Architecture*) representa uma possível configuração de *data center tier* I.

O gráfico apresentado mostra como o sistema otimizado economiza dinheiro ao longo do tempo de vida do projeto. A linha cinza representa o caso base. O comportamento dela foi de queda até o final da vida do projeto por se tratar apenas de gastos com o uso da rede da concessionária. Já a linha azul mostra o sistema ótimo, que possui ganhos devido a geração de energia. O ponto onde as linhas se cruzam foi onde começou a ocorrer o retorno financeiro do projeto.

O NPC para o caso base foi de R\$484053,00. Já o NPC para o melhor caso foi de R\$385694,00.

Em *Initial Capital* foram apresentados os custos iniciais do projeto. Para o caso base, o investimento inicial foi de R\$124127,00. O investimento inicial para o melhor caso foi de R\$133073,00.

Em O&M, os custos com operação e manutenção anuais foram apresentados. Para o caso base, esses custos foram de R\$30738,00/ano. Para o melhor caso foram de R\$21574/ano.

Em LCOE, o custo nivelado de energia, foi possível verificar que o valor para o melhor caso foi de R\$1,28/kWh. Para o melhor caso, o LCOE foi de R\$1,00/kWh.

Em *Economic Metrics* foi possível verificar outros dados econômicos relevantes. Conforme mostra a Figura 35, a IRR para o projeto foi de 102%. Isso significa que, para o caso base obter NPC igual ao melhor caso, a taxa de juros real deveria ser de 102% ao ano. O ROI, ou retorno do investimento, indica que a economia anual, em relação ao investimento inicial, foi de 98%. O retorno simples indica que levará aproximadamente 358 dias para que o fluxo de caixa nominal cumulativo do melhor sistema supere o fluxo de caixa nominal cumulativo do caso base. Esse será o tempo necessário para que o investimento no caso ótimo seja melhor que o investimento no caso base.

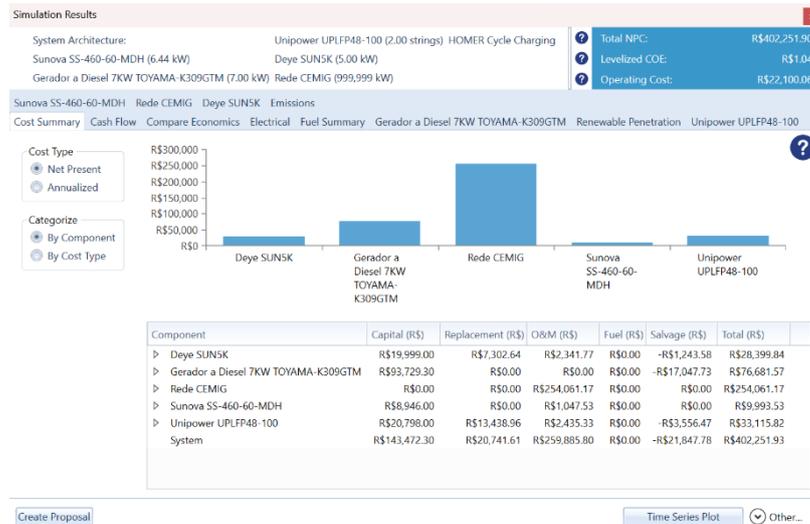
Figura 35 – *Economic Metrics*, do software HOMER Pro.

Economic Metrics	
IRR ?	102%
ROI ?	98%
Simple Payback ?	0.98 yr

Fonte: o autor.

Após clicar em *Simulation Details* foi aberta uma janela com maiores detalhes sobre a simulação, considerando a melhor configuração. A primeira aba dessa janela, chamada *Cost Summary*, foi representada na Figura 36. Nesta aba foi possível verificar o NPC de cada componente, na forma de um gráfico. Foi possível verificar que houveram reposições de inversor e bateria em algum momento do tempo de vida do projeto. Devido a essa reposição sobrou vida útil para o inversor e a bateria ao final do projeto. Outro componente que chegou ao final da vida útil do projeto ainda operante foi o gerador a diesel. A vida útil excedente dos componentes após o fim do projeto foi representada em reais na coluna *Salvage* (UL SOLUTIONS, 2024).

Figura 36 – Janela *Simulation Results*, aba *Cost Summary*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Na aba *Cash Flow*, representada na Figura 37, foi possível verificar todos os gastos e lucros do sistema ao longo do tempo de vida do projeto. É interessante notar no gráfico as reposições de componentes, que ocorrem no décimo segundo, décimo quinto e vigésimo quarto anos do projeto.

Figura 37 - Janela *Simulation Results*, aba *Cash Flow*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

A aba *Electrical* mostra, conforme Figura 38, informações interessantes sobre o projeto, como a quantidade de energia da rede que é adquirida e vendida. Do total de energia produzida pelo sistema projetado, 68,6% vem da compra de energia da rede. As vendas de energia para a rede chegam a 750 kWh/ano, o que representa 2,28% do consumo de energia. Também foi

possível verificar, no gráfico *Monthly Electric Production*, que a energia produzida mensalmente foi inferior a energia adquirida da rede.

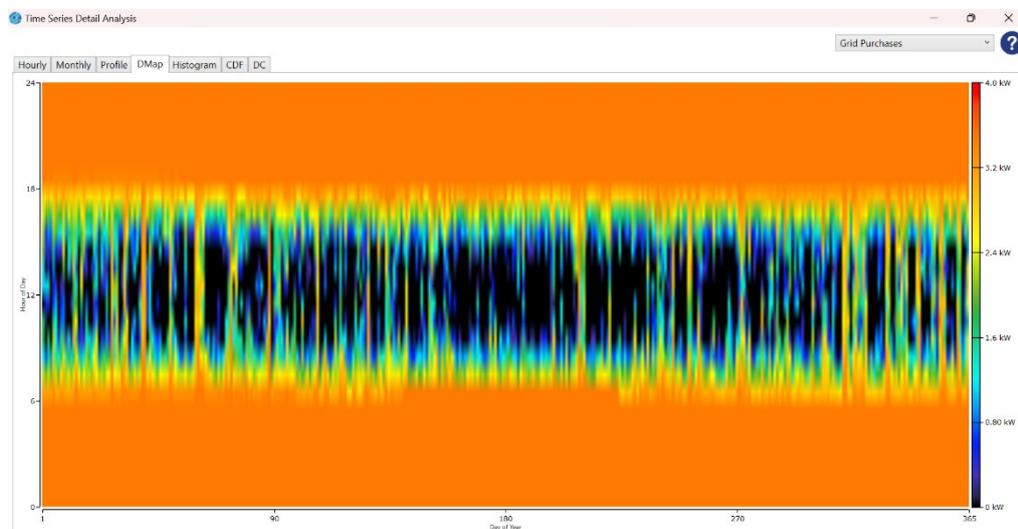
Figura 38 - Janela *Simulation Results*, aba *Electrical*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Outros resultados interessantes podem ser observados em *Time Series Plot*, no canto inferior direito da tela. Nessa opção foi possível gerar diferentes gráficos para múltiplas variáveis do projeto. Por exemplo, a Figura 39 mostra as compras de energia da rede ao longo do ano. Foi possível verificar que, no geral, as compras ocorrem apenas nos períodos sem Sol.

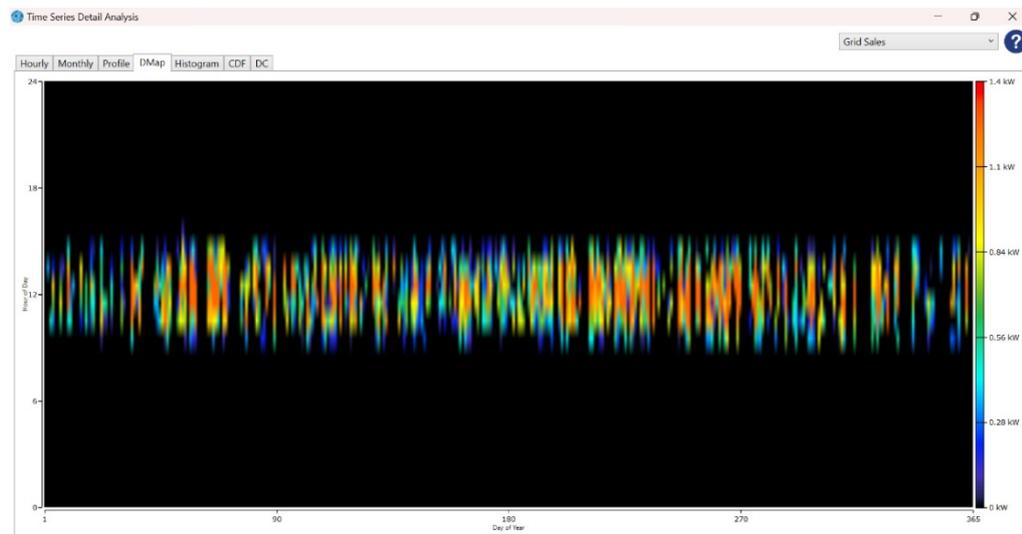
Figura 39 - Janela *Time Series Detail Analysis*, aba *DMap*, parâmetro *Grid Purchases*, do software HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Foi possível gerar um gráfico semelhante para as vendas de energia para a rede, conforme mostra Figura 40. Nela foi possível verificar que há excedente de energia sendo vendido durante todo o ano, mas com alguns dias sem vendas.

Figura 40 - Janela *Time Series Detail Analysis*, aba DMap, parâmetro *Grid Sales*, do *software* HOMER Pro.



Fonte: o autor.

Outra opção pertinente que a janela *Simulation Results* forneceu foi a *Create Proposal*, no canto inferior esquerdo. Conforme mostra a Figura 41, o *software* permite gerar uma proposta na forma de relatório, mediante o preenchimento de alguns dados. Essa tela não foi preenchida, pois não faz parte do escopo deste trabalho a elaboração de uma proposta de projeto, se limitando apenas as análises dos dados da simulação.

Figura 41 – Janela *Create Proposal*, do *software* HOMER Pro.

Fonte: o autor.

Por fim, na tela *Results*, na aba *Tables*, foi possível verificar, conforme mostra a Figura 42, o ranking de melhores configurações do sistema, de acordo com o critério de menor NPC.

A primeira linha representa a melhor configuração, enquanto a última linha representa a pior. A linha marcada em azul representa a configuração de *data center tier II*, enquanto a linha marcada em cinza representa a configuração de *data center tier I*.

Figura 42 – Tela Results, aba Tables, do software HOMER Pro.

Architecture										Cost				System		Project Economics	
Painéis (kW)	Gerador Diesel (kW)	Bateria (#)	Rede (kW)	Inversor (kW)	Dispatch	NPC (R\$)	LCOE (R\$/kWh)	Operating cost (R\$/yr)	CAPEX (R\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	IRR (%)	Simple Payback (yr)				
6.44	7.00	1	999.999	5.00	LF	R\$385.694	R\$1.00	R\$21.574	R\$133.073	30.2	0	102	0.98				
6.44	7.00	1	999.999	5.00	CC	R\$385.694	R\$1.00	R\$21.574	R\$133.073	30.2	0	102	0.98				
6.44	7.00	2	999.999	5.00	LF	R\$402.252	R\$1.04	R\$22.100	R\$143.472	30.2	0	47	2.1				
6.44	7.00	2	999.999	5.00	CC	R\$402.252	R\$1.04	R\$22.100	R\$143.472	30.2	0	47	2.1				
7.00	7.00	1	999.999	5.00	LF	R\$484.053	R\$1.28	R\$30.738	R\$124.127	0	0						
7.00	7.00	1	999.999	5.00	CC	R\$484.053	R\$1.28	R\$30.738	R\$124.127	0	0						
7.00	7.00	2	999.999	5.00	LF	R\$500.611	R\$1.33	R\$31.264	R\$134.526	0	0						
7.00	7.00	2	999.999	5.00	CC	R\$500.611	R\$1.33	R\$31.264	R\$134.526	0	0						

Fonte: o autor.

Os resultados das simulações mostraram que a configuração de *data center tier II* pode não apenas aumentar a confiabilidade das operações do *data center*, com a implementação de redundância de componentes, mas também ser mais vantajosa economicamente em comparação com a configuração de *data center tier I*. Isso só foi possível graças ao uso da energia solar.

Apesar da energia solar aumentar o custo inicial do projeto consideravelmente, ela foi utilizada em conjunto com a energia da rede da concessionária para manter os equipamentos do *data center* operantes. O excedente de energia gerado foi vendido para a concessionária de energia e transformado em créditos, que foram utilizados em momentos de baixa ou nenhuma produção de energia.

Devido a fatura de energia do Centro Administrativo da Prefeitura de Paracatu não fazer distinção entre a energia consumida pelo *data center* e a energia consumida pelos demais equipamentos do prédio, os créditos correspondentes aos 750 kWh/ano vendidos para a concessionária serão totalmente consumidos, dado o consumo mensal de energia aproximado de 17360 kWh do Centro Administrativo.

5 CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E CONTRIBUIÇÕES

Com o auxílio de ferramenta computacional, o presente trabalho investigou os sistemas fotovoltaicos para *data centers* de pequeno porte. Foi possível verificar que este tema está pouco presente na literatura, apesar de não ser novo, e dos altos investimentos das empresas de tecnologia nesses sistemas.

O *software* HOMER Pro se mostrou uma poderosa ferramenta, capaz de buscar diferentes soluções viáveis economicamente para suprir a demanda de energia do *data center* objeto do estudo. No entanto, o dimensionamento técnico e econômico do programa pode deixar a desejar caso os dados fornecidos estejam imprecisos ou incompletos.

Outro problema está relacionado as tarifas. As bandeiras tarifárias que afetam o valor do kWh não podem ser implementadas no *software*, a princípio, pois são decisões da ANEEL baseadas em diferentes fatores. As tarifas relacionadas a venda de excedente de energia também seguem regras complexas hoje, como aumento progressivo de taxas a cada ano. Não foi verificado no *software* a possibilidade de inserir tarifas na venda de energia. Ainda assim, esses problemas foram contornados neste trabalho.

Por fim, as maiores dificuldades relacionadas ao *software* foram: a documentação, que não é muito esclarecedora em alguns momentos, e a quantidade de dados de entrada do *software*, que requer um estudo muito aprofundado das variáveis do projeto.

As maiores contribuições deste trabalho foram: o levantamento de dados de um *data center* de pequeno porte, a constatação de que a configuração de *tier* II para o *data center* estudado é viável com o uso de energia solar e o estudo do *software* HOMER Pro, que servirão de base para outros projetos nesta área. A inovação no setor público também é um ponto que merece destaque, pois foi constatada a necessidade da Prefeitura de investir em sistemas elétricos mais seguros e rentáveis.

Para trabalhos futuros deve ser realizado o levantamento completo dos dados para o *software*, como a área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos, o sombreamento nos painéis devido a construções, a queda de produção de energia devido a poeira, entre outros dados. Também devem ser consideradas todas as estruturas que compõem o projeto, como cabeamento, estruturas de suporte e fixação, entre outras. Dessa forma, seria possível elaborar uma proposta de projeto. A comparação das configurações estudadas neste trabalho para o *data center* da Prefeitura de Paracatu com possíveis configurações de *tiers* III e IV para o mesmo *data center* também pode ser objeto de futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

ALGAR TELECOM. **Relatório de Sustentabilidade 2015**. Disponível em:

<<https://www.globalri.com.br/algar/2015/telecom/pt/>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

ALVES, T. M. **Análise de atendimento de cargas isoladas por sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia**. Trabalho de Conclusão de curso. Disponível em:

<<repositorio.ufsm.br>>, 16 out. 2020. Acesso em: 13 mar. 2024.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Anúncio da ANEEL marca dois anos consecutivos de Bandeira verde**. Publicado em: 28 mar. de 2024. Disponível em:

<<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/anuncio-da-aneel-marca-dois-anos-consecutivos-de-bandeira-verde>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: saiba mais sobre micro e minigeração distribuída**. Publicado em: 10 fev. de 2022. Atualizado em: 29 ago. de 2023. Disponível em: <

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 22 out. de 2023.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Variáveis de faturamento das componentes tarifárias**. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/audiencias-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p__state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideDocumento=31756&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=/html/pp/visualizar.jsp>. Acesso em: 9 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 14300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF: 2022. Disponível em:

<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm>. Acesso em: 9 abr. 2024.

CASTRO, P. B. DE. **Análise econômica de sistema fotovoltaico híbrido com baterias**. Trabalho de Conclusão de curso. Disponível em: <repositorio.sis.puc-campinas.edu.br>, 3 dez. 2020. Acesso em: 13 mar. 2024.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. 2024. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

CLIMATE DATA. **Clima Paracatu: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Paracatu**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/paracatu-25078/>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

CRESESB. **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito–CRESESB, 2006.

FILHO, M. F. **Conceitos e infraestrutura de datacenters**. Palhoça: UnisulVirtual, 2016.

G1. **Brasil continua com o 2º maior juro real do mundo após novo corte da Selic; veja ranking**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2024/01/31/brasil-continua-com-o-2o-maior-juro-real-do-mundo-apos-novo-corte-da-selic-veja-ranking.ghtml>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

GOOGLE. **Data centers – Google Data centers**. 2024. Disponível em: <<https://www.google.com/about/datacenters/gallery/>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

GOOGLE MAPS. **Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com/maps>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

HOMER ENERGY. **HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids**. 2024. Disponível em: <<https://homerenergy.com/products/pro/index.html>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

IBGE. **Inflação | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2023 – Analysis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>>. Acesso em: 5 abr. 2024.

KIM, B.; KIM, I. **A case study of stand-alone hybrid power systems for a data center using HOMER and DIGSILENT**. Energy reports, v. 9, p. 1136–1143, 1 mar. 2024.

LOJA DO MECANICO. **Gerador de Energia Cabinado a Diesel 4T 498cc 7KW Mono Bivolt + Pannel de Transferência Automático Monofásico - TOYAMA-K309GTM - R\$13389,9 | Loja do Mecânico**. Disponível em:

<<https://www.lojadomecanico.com.br/produto/215565/33/326/gerador-de-energia-cabinado-a-diesel-4t-498cc-7kw-mono-bivolt--painel-de-transferencia-automatico-monofasico-220v-toyama-k309gtm>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

MONTEIRO, A; NETTO, U; SOUZA, M. **Utilização do software HOMER para análise da viabilidade econômica de um sistema híbrido de geração na Ilha do Mel**. Revista Brasileira de Energia, [S. l.], p. 1-13, 1 dez. 2018. Disponível em:

<<https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/445/390>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

NEOSOLAR. **Placa Solar - Energia Solar Fotovoltaica - Kit Solar | Neosolar**. 2024.

Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

OAKLEY, N. **The Evolution of Data centers**. Disponível em:

<<https://storymaps.arcgis.com/stories/a21d93abf29d4b6990370cfcba143cd9>>. Acesso em: 5 abr. 2024.

PENN ENGINEERING. **ENIAC at Penn Engineering**. 2017. Disponível em:

<<https://www.seas.upenn.edu/about/history-heritage/eniac/>>. Acesso em: 5 abr. 2024.]

PETROBRÁS. **Seleção de Estados - Diesel - Preços dos Combustíveis - Petrobras**. 2024.

Disponível em: <<https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-diesel>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

PINHO, J. T; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Grupo de trabalho de energia solar–GTES, 2014.

PREFEITURA DE PARACATU. **DESTAQUE: PARACATU ESTÁ ENTRE OS QUATRO MAIORES MUNICÍPIOS GERADORES DE ENERGIA SOLAR DE MINAS...** 2023. Disponível em:

<<https://www.paracatu.mg.gov.br/portal/noticias/0/3/2958/destaque-paracatu-esta-entre-os-quatro-maiores-municipios-geradores-de-energia-solar-de-minas-gerais/>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

PREFEITURA DE PARACATU. **Portal.** 2024. Disponível em:

<<https://www.paracatu.mg.gov.br/>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

UL SOLUTIONS. **HOMER Pro 3.16 User Manual.** Disponível em: <<https://support.ul-renewables.com/homer-manual-pro/index.html>>. Acesso em: 5 abr. 2024.

VILLALVA, M. G; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 2012.

WELSCH, C. **As the world goes digital, datacenters that make the cloud work look to renewable energy sources.** 2022. Disponível em:

<<https://news.microsoft.com/europe/features/as-the-world-goes-digital-datacenters-that-make-the-cloud-work-look-to-renewable-energy-sources/>>.

ZUCCHI, W. L.; AMÂNCIO, A. B. **Construindo um *Data center*.** Revista USP, [S. l.], n. 97, p. 43-58, 2013. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i97p43-58. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/61684>. Acesso em: 22 out. 2023.