

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE PAINÉIS
SOLARES PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A
PARTIR DE ELETROLISADOR NO LH2M/DEMA/UFSCAR**

LUCAS FERNANDO ROMANO

SÃO CARLOS-SP
2024

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE PAINÉIS SOLARES PARA A
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ELETROLISADOR NO
LH2M/DEMA/UFSCAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Zepon

São Carlos-SP
2024



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Lucas Fernando Romano

RA: 772085

TÍTULO: Dimensionamento de um sistema de painéis solares para a produção de hidrogênio a partir de eletrolisador no LH2M/DEMa/UFSCar

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Guilherme Zepon

DATA/HORÁRIO: 21/06/2024, 15h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Zepon	10	10
Prof. Dr. Walter José Botta Filho	10	10
Média	10	10

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Zepon

Documento assinado digitalmente
gov.br GUILHERME ZEPON
Data: 10/09/2024 08:07:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Walter José Botta Filho

Documento assinado digitalmente
gov.br WALTER JOSE BOTTA FILHO
Data: 09/09/2024 22:06:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antonio Fernando e Luciana Cristina por não medirem esforços para me fornecer uma educação de qualidade e por serem pessoas exemplares em minha vida.

AGRADECIMENTO

A Deus, por me guiar e dar sabedoria para fazer todas as escolhas em minha vida.

Aos meus pais, Antonio Fernando e Luciana Cristina, pelos ensinamentos, apoio e carinho.

A minha namorada, por todo apoio e dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Zepon, pelo auxílio, incentivo e pela paciência durante a execução deste trabalho.

Ao Flávio, do Laboratório de Hidrogênio em Metais (LH₂M), pela disponibilidade em ajudar neste trabalho.

Ao Hugo, da Futuro Energia Solar, e ao Paulo, da PMC Energia Solar, que me auxiliaram no dimensionamento do sistema fotovoltaico.

A Universidade Federal de São Carlos e ao Departamento de Engenharia de Materiais.

Ao meu amigo do Ensino Médio, Luis Felipe, que morou comigo em São Carlos durante os 5 anos de graduação.

Aos meus amigos da graduação, Gabriel Leal, Gabriel Pedrino, George Fabeni, Luís Guilherme, Marina de Paula, Tiago Lobo e Vinicius Paschoaneli, que sempre estiveram presentes nos estudos e apresentações de seminários.

Aos meus familiares, que me acompanharam desde minha entrada na faculdade, que me ajudaram e me incentivaram a chegar até aqui.

RESUMO

O Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia (CPqMAE) é uma Unidade Multidisciplinar do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da UFSCar. Dentre os laboratórios presentes nesse centro, existe o Laboratório de Hidrogênio em Metais (LH₂M), que é responsável pelo desenvolvimento de tecnologias para a produção e armazenamento de hidrogênio. Diante do desenvolvimento tecnológico mundial, que traz como consequência o aumento do consumo de energia elétrica e fontes não renováveis como petróleo, carvão e gás natural, existe a busca por soluções energéticas renováveis como a energia solar. Neste trabalho foi realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid ligado a um eletrolisador, visando a produção de hidrogênio, e também verificada sua viabilidade econômica através do VPL positivo, para que o projeto seja implementado no LH₂M da UFSCar. Para o dimensionamento foram utilizados 54 módulos fotovoltaicos de 660 W modelo Vertex e um eletrolisador PEM LBEX-P20K de 12 kW.

Palavras-chave: Hidrogênio. Dimensionamento. Eletrolisador.

ABSTRACT

The Center for Advanced Materials and Energy Research (CPqMAE) is a Multidisciplinary Unit of the Center for Exact Sciences and Technology (CCET) at UFSCar. Among the laboratories within this center is the Hydrogen in Metals Laboratory (LH₂M), which is responsible for the development of technologies for hydrogen production and storage. With the ongoing global technological development, resulting in increased consumption of electricity and non-renewable sources such as oil, coal, and natural gas, there is a quest for renewable energy solutions such as solar power. In this study, the sizing of an off-grid photovoltaic system connected to an electrolyzer was conducted, aiming at hydrogen production, and its economic viability was also assessed through positive NPV, for the implementation of the project at LH₂M of UFSCar. For the sizing, 54 photovoltaic modules of 660 W Vertex model and a 12 kW PEM electrolyzer LBEX-P20K were used.

Keywords: Hydrogen. Sizing. Electrolyzer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Painel solar construído a partir de células monocristalinas [16].	4
Figura 2 - Módulo de silício policristalino [10].	5
Figura 3 - Inversor [20].	6
Figura 4 - Controlador de carga [21].	6
Figura 5 - Bateria [23].	7
Figura 6 - Eletrolisador alcalino [Adaptada de 2].	9
Figura 7 - Membrana Trocadora de Prótons (PEM) [Adaptada de 2].	10
Figura 8 - Membrana Trocadora de Ânions (AEM) [Adaptada de 2].	11
Figura 9 - Célula de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC) [Adaptada de 2].	12
Figura 10 - Sistema fotovoltaico off-grid [Adaptada de 13].	13
Figura 11 - Sistema fotovoltaico on-grid [10].	14
Figura 12 - Layout da cobertura [37].	21
Figura 13 - Eletrolisador LBEX-P20K [38].	22
Figura 14 - Esquema elétrico do sistema [40].	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações de células fotovoltaicas no cotidiano [Adaptada de 12].	15
Tabela 2 - Ficha técnica do eletrolisador LBEX-P20K [39].	22
Tabela 3 - Dados para o cálculo do faturamento anual e do investimento inicial.	26
Tabela 4 - Dados da análise de investimento para o sistema off-grid.	27
Tabela 5 - Cálculo da TIR e do VPL.	27

LISTA DE ABREVIATURAS

Wh/m ²	Watt hora por metro quadrado
kWh/m ² /dia	Kilowatt hora por metro quadrado por dia
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
W	Watt
kg	Quilograma
Fat.	Faturamento
Invest.	Investimento
MW	Megawatt
mm	Milímetro
VCA	Volts em corrente alternada
Hz	Hertz
L	Litro
L/h	Litro por hora
NI/dia	Normal Litro por dia
barg	Bar gauge
atm	Atmosfera
l	Líquido
g	Gasoso

LISTA DE SIGLAS

CPqMAE - Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia
CCET - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
UFSCar - Universidade Federal de São Carlos
GEE - Gases de Efeito Estufa
CC - Corrente Contínua
CA - Corrente Alternada
LH₂M - Laboratório de Hidrogênio em Metais
AC - Alternating Current
DC - Direct Current
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
PEM - Membrana Trocadora de Prótons
AEM - Membrana Trocadora de Ânions
SOEC - Célula de Eletrólise de Óxido Sólido
LTE – Low Temperature Electrolysis
HTE – High Temperature Electrolysis
TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz
TMA - Taxa Mínima de Atratividade
SELIC - Sistema Especial de Liquidação e Custódia
VPL - Valor Presente Líquido
TIR - Taxa Interna de Retorno
CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

KOH	Hidróxido de Potássio
H ₂	Hidrogênio
O ₂	Oxigênio
H ⁺	Íon Hidrogênio
O ²⁻	Superóxido
OH ⁻	Hidroxila
US\$	Dólar americano
R\$	Real
<	Menor
°C	Grau Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Radiação solar.....	3
2.2. Células fotovoltaicas.....	3
2.3. Inversores.....	5
2.4. Controladores de carga	6
2.5. Baterias	7
2.6. Eletrolisadores.....	7
2.6.1. Alcalino.....	8
2.6.2. Membrana Trocadora de Prótons (PEM)	9
2.6.3. Membrana Trocadora de Ânions (AEM).....	10
2.6.4. Célula de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC).....	11
2.7. Sistemas fotovoltaicos off-grid	12
2.8. Sistemas fotovoltaicos on-grid	13
2.9. Aplicação dos sistemas fotovoltaicos.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1. Mapeamento da cobertura.....	15
3.2. Seleção do eletrolisador	16
3.3. Dimensionamento do sistema.....	16
3.4. Orçamento do sistema fotovoltaico e do eletrolisador.....	17
3.5. Análise de viabilidade econômica	17
3.5.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	19
3.5.2. Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR)	19
4. RESULTADOS.....	20
4.1. Layout da cobertura.....	20
4.2. Eletrolisador e orçamento	21
4.3. Esquema elétrico do sistema.....	23
4.4. Orçamento do sistema.....	26
4.5. Análise de viabilidade econômica	26
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	27
6. CONCLUSÕES	29
7. REFERÊNCIAS.....	30
ANEXO A – Orçamento do eletrolisador	34
ANEXO B – Orçamento do sistema off-grid.....	35

1. INTRODUÇÃO

O Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia (CPqMAE) é uma Unidade Multidisciplinar do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da UFSCar. As pesquisas realizadas no CPqMAE envolvem a síntese, o processamento e a aplicação de materiais avançados na área correspondente a cada pesquisador que faz parte dos grupos instalados no Centro [1]. Dentre os laboratórios presentes nesse centro de pesquisas, existe o Laboratório de Hidrogênio em Metais (LH₂M), que é responsável pelo desenvolvimento de tecnologias para a produção e armazenamento de hidrogênio, um combustível renovável.

O desenvolvimento tecnológico mundial traz como consequência o aumento no consumo de energia elétrica e de fontes limitadas ou não renováveis como petróleo, carvão e gás natural. Tendo em vista a finitude desses recursos e o aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE), existe a busca por soluções para a geração de energia por meios renováveis e que reduzem as emissões desses gases [2,3-5]. A energia solar fotovoltaica é uma solução energética que possui vantagens importantes, visto que a geração ocorre de maneira estática, silenciosa, não poluente e de forma renovável [6]. Contudo, em razão da baixa densidade energética contida na luz solar, comparada a outras fontes de energia, painéis solares fotovoltaicos, responsáveis pela captação desse tipo de energia, necessitam possuir um baixo custo para tornar competitivos os preços de produção de energia elétrica [4,5].

O dimensionamento de um sistema de energia solar pode ser definido como o estudo e a análise das especificidades do local em que o sistema fotovoltaico será implementado, bem como a identificação e a escolha de quais equipamentos deverão ser utilizados na produção de energia. Esse dimensionamento é muito importante para a instalação de qualquer sistema fotovoltaico, já que por meio dele se identifica qual é o consumo de energia elétrica do local e as especificações dos aparelhos que vão integrar o sistema de energia solar. Desse modo, é possível garantir o melhor aproveitamento do espaço disponível e, conseqüentemente, uma máxima eficiência na produção [6,7].

O eletrolisador é um dos equipamentos que pode ser integrado ao sistema fotovoltaico, permitindo a produção de hidrogênio por meio de um processo químico, conhecido como eletrólise, que quebra as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por meio da eletricidade. Quando o hidrogênio é produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar, ele é conhecido como hidrogênio de baixa emissão de carbono. Uma vez produzido em escala e custo competitivo, esse hidrogênio também pode ser convertido em outros portadores de energia, como amônia, metanol, metano e hidrocarbonetos líquidos. Como combustível, o hidrogênio de baixa emissão de carbono pode ser utilizado em células de combustível e também queimado em motores e turbinas. Essas células podem ser usadas em usinas de energia de grande escala, microrrede ou para uma ampla aplicação de transporte em veículos elétricos, caminhões, veículos leves, empilhadeiras, ônibus e navios [2].

O equipamento responsável pela produção de hidrogênio pode ser ligado aos módulos fotovoltaicos que são responsáveis por converter a energia solar em corrente elétrica [6,8]. Entretanto, para que a energia solar possa ser aproveitada pelo eletrolisador é necessário a utilização de um inversor, que se trata de um dispositivo cuja função é transformar a corrente contínua (CC), que é fornecida pelos painéis fotovoltaicos, em corrente alternada (CA), que é utilizada para o funcionamento do inversor e da maioria dos aparelhos domésticos.

Este trabalho tem como objetivo realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid a ser instalado nas dependências do CPqMAE. O sistema fotovoltaico será projetado para ser ligado a um eletrolisador, visando a produção de hidrogênio de forma renovável, e independente do fornecimento público de energia elétrica, para o LH₂M. Esse sistema se diferenciará do off-grid comum, visto que não há necessidade da utilização de grande quantidade de baterias para a armazenagem de energia elétrica. Será preciso somente a utilização de um único kit de baterias para garantir que o eletrolisador funcione em uma potência constante de 12 kW. Essa potência foi sugerida para o dimensionamento desse sistema com base no eletrolisador EL5N da H2B2 que, segundo Corusse [9], apresentou o melhor desempenho para ser instalado no LH₂M. Apesar do eletrolisador da H2B2 ser o mais eficiente, foi necessário

encontrar outro equipamento de mesma ordem de potência para a instalação, já que o primeiro saiu de linha e não é mais produzido pela empresa fornecedora.

Neste projeto, foi feita a seleção do eletrolisador e o dimensionamento de todo o sistema, obtendo também o seu orçamento. Por fim, foi feita uma análise de viabilidade econômica para que o projeto possa ser implementado no Laboratório de Hidrogênio em Metais (LH₂M) da Universidade Federal de São Carlos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Radiação solar

Um dos conceitos indispensáveis para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos é a radiação solar, visto que esta expressa a energia total incidente na superfície terrestre [10-14]. Essa medida é apresentada em Wh/m² e varia com a latitude do local no qual os painéis fotovoltaicos são instalados. A disponibilidade de radiação solar também é influenciada pelas condições climáticas, estações do ano, horário do dia e estado do céu [6]. Normalmente, utiliza-se o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos igual a latitude para se realizar a instalação dos painéis, de modo que a parte frontal dos módulos seja direcionada para o Norte [15].

Com o objetivo de suprir parte da demanda de informações solarimétricas, o Atlas Brasileiro de Energia Solar fornece dados com estimativas do total diário de irradiação solar. Nos mapas, são utilizados os dados de irradiação solar global horizontal, fornecidos em kWh/m²/dia, para a obtenção de dados de dimensionamento do sistema solar fotovoltaico [10].

2.2. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar a energia proveniente da luz solar em energia elétrica [14,16]. No processo de construção das placas solares, várias células são conectadas sequencialmente (em série), sendo denominadas de módulos fotovoltaicos, e a união desses módulos forma

o painel solar. O principal objetivo desse tipo de conexão é aumentar a tensão e manter o valor da corrente [17].

As primeiras células fotovoltaicas surgiram a partir do silício cristalino, podendo ser classificado em monocristalino ou policristalino. No Brasil, a maioria dos projetos de geração de energia distribuída emprega módulos fotovoltaicos formados por células do tipo policristalino. Devido a seu menor custo, os módulos policristalinos estão liderando o mercado de vendas [11].

As células de silício monocristalino (Figura 1) se destacam por possuir eficiência superior em comparação às fabricadas em larga escala, possuindo células rígidas nas cores preto ou azul escuro. A eficiência dessas células varia entre 15% e 18%, porém, apresentam o alto custo de produção como desvantagem [10,11,16].



Figura 1 - Painel solar construído a partir de células monocristalinas [16].

As células de silício policristalino (Figura 2) representam cerca de 70% da participação no mercado tecnológico, sendo produzidas com o mesmo material presente nas células de silício monocristalino. Sua eficiência varia entre 13% e 15%, apresentando células rígidas na cor azul. Essas células possuem menor custo de fabricação em relação ao silício monocristalino, visto que sua solidificação ocorre com a formação de vários cristais pequenos, diferentemente da forma de solidificação das células de silício monocristalino, que resulta na formação de um único cristal grande [10,11,16]. A forma de solidificação e a

menor eficiência justificam o menor preço associado às células de silício policristalino.



Figura 2 - Módulo de silício policristalino [10].

2.3. Inversores

O módulo fotovoltaico tem como saída uma corrente na forma contínua (CC). Sendo assim, para que seja possível efetuar a conexão de painéis fotovoltaicos em equipamentos como eletrolisadores, que funcionam em corrente alternada (CA), é necessário a utilização de inversores [18].

O inversor solar (Figura 3) estabelece a conexão entre o gerador fotovoltaico e a rede elétrica. Sua principal função é converter o sinal elétrico CC em um sinal elétrico CA, ajustando-o para a frequência e o nível de tensão da rede ao qual ele está ligado [14,16,19]. O uso desse equipamento garante a segurança do sistema e o mantém de acordo com as normas definidas pela ANEEL, caso o sistema seja conectado à rede [14].



Figura 3 - Inversor [20].

2.4. Controladores de carga

Os controladores de carga (Figura 4) são responsáveis por proteger as baterias controlando o seu processo de carga e descarga, com a finalidade de garantir uma maior vida útil para as baterias, desligando-as quando é atingida a profundidade de descarga máxima da bateria e evitando seu completo descarregamento [19]. Esse controle acontece por meio da solicitação de energia das baterias pelos controladores de carga para não comprometer sua vida útil em razão de longos períodos de inatividade, mesmo que a energia seja suficiente para atender ao consumo [14].



Figura 4 - Controlador de carga [21].

2.5. Baterias

As baterias (Figura 5) são dispositivos capazes de armazenar energia elétrica por meio de oxirredução, um processo eletroquímico que ocorre em seu interior [22]. O armazenamento de energia é fundamental para o aproveitamento de energia solar nos sistemas isolados (off-grid), já que o consumo de energia não coincide com a geração, sendo necessário armazená-la para que o sistema não perca autonomia durante períodos sem radiação solar [14].



Figura 5 - Bateria [23].

2.6. Eletrolisadores

Os eletrolisadores são os equipamentos responsáveis pela produção de hidrogênio utilizando eletricidade e água como insumos. Essa produção acontece por meio de um processo químico conhecido como eletrólise, que quebra as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por meio da eletricidade [12,24-29].

No caso de eletrolisadores em meio ácido, na presença de substâncias adequadas, chamadas de eletrólitos, a corrente elétrica faz com que os íons de hidrogênio carregados positivamente migrem para o cátodo carregado negativamente, onde acontece uma redução para formar átomos de hidrogênio. Em seguida, esses átomos formados combinam-se para formar moléculas gasosas de hidrogênio. Por outro lado, o oxigênio é formado no ânodo carregado positivamente.

Já nos eletrolisadores em meio básico, ocorre a decomposição de água em hidrogênio e OH^- por meio de redução no cátodo. Neste caso, os íons

hidroxila migram para o ânodo e se recombina para formar O_2 e H_2O . O oxigênio formado é liberado na forma de gás.

Um outro componente fundamental para a unidade de eletrólise é a membrana de separação que permite somente a passagem de íons ou elétrons, bloqueando os átomos de oxigênio e hidrogênio [25,30].

A diferença entre os eletrolisadores está no eletrólito utilizado e na temperatura de operação, que por sua vez, será responsável por orientar a seleção de diferentes materiais e componentes. O eletrólito é o meio responsável pelo transporte de cargas químicas geradas, que podem ser ânions ou cátions, de um eletrodo a outro [2].

Atualmente existem quatro tipos de eletrolisadores disponíveis comercialmente: Alcalino, Membrana Trocadora de Prótons (PEM), Membrana de Troca de Ânions (AEM) e Óxido Sólido (SOEC).

2.6.1. Alcalino

O eletrolisador Alcalino (Figura 6) é constituído de um par de eletrodos imersos em uma solução alcalina, geralmente de hidróxido de potássio (KOH), e separados por um diafragma poroso [5,24,25]. Esse sistema é responsável pela decomposição da água em hidrogênio e OH^- [31]. Isso acontece com a migração dos íons hidroxila para o ânodo através do diafragma de separação sob a influência do campo elétrico entre o cátodo e o ânodo, descarregando O_2 e H_2O [4,32,33]. Nesse processo, o oxigênio se recombina na superfície do eletrodo e escapa como o hidrogênio na forma de um gás.

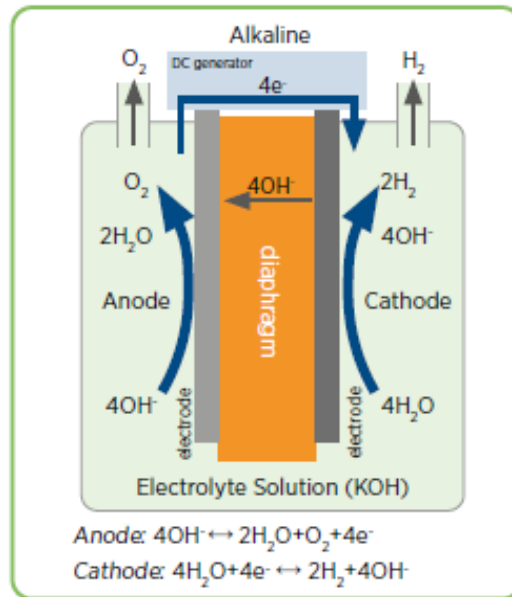


Figura 6 - Eletrolisador alcalino [Adaptada de 2].

2.6.2. Membrana Trocadora de Prótons (PEM)

O eletrolisador do tipo PEM (Figura 7) utiliza como eletrólito uma membrana polimérica de natureza ácida que permite a troca de prótons (H⁺) [5]. Normalmente, a membrana utilizada é a do polímero de ácido perfluorossulfônico Nafion®. No ânodo, a água é decomposta em gás oxigênio, prótons (H⁺) e elétrons por meio de reação de oxidação. Os prótons são transportados através da membrana condutora de prótons para o lado do cátodo, enquanto os elétrons se movem através do circuito externo, alcançando o mesmo eletrodo [15,16]. Os prótons e elétrons reagem eletroquimicamente e produzem gás hidrogênio por meio de reação de redução [26].

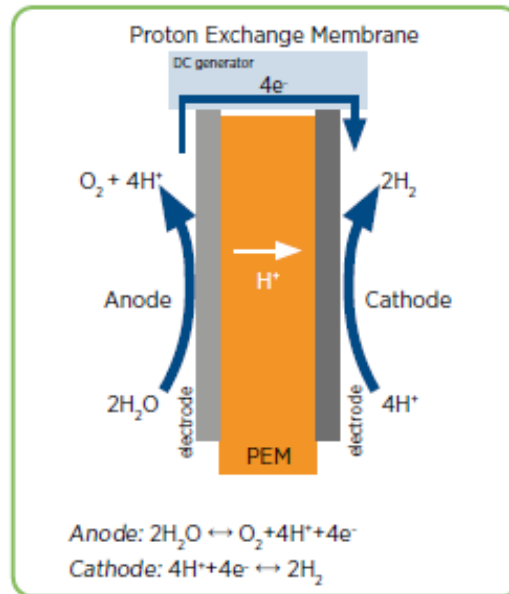


Figura 7 - Membrana Trocadora de Prótons (PEM) [Adaptada de 2].

2.6.3. Membrana Trocadora de Ânions (AEM)

No eletrolisador do tipo AEM, a água circula pelo lado do cátodo, onde é reduzida para a formação dos íons hidrogênio e hidroxila pela adição de elétrons. Os íons hidroxila se difundem através da AEM para a seção anódica pela atração positiva do ânodo, enquanto há o transporte de elétrons em direção ao cátodo através do circuito externo. Na câmara anódica, ocorre a recombinação dos íons hidroxila como água e oxigênio, perdendo elétrons. O oxigênio é produzido na forma de gás e liberado da superfície do ânodo [30].

A tecnologia de eletrólise com Membrana Trocadora de Ânions (AEM) (Figura 8) incorpora materiais catalíticos de baixo custo, similarmente à eletrólise alcalina, e uma estrutura de eletrólito de polímero sólido, assemelhando-se à tecnologia de eletrólise com Membrana Trocadora de Prótons (PEM) [33,34]. A principal diferença entre a eletrólise AEM e a eletrólise PEM é que a membrana de separação transporta ânions OH⁻ em vez de prótons H⁺ [5,32]. Além disso, a eletrólise AEM permite superar as desvantagens da eletrólise alcalina convencional, como a necessidade de soluções alcalinas altamente concentradas [35].

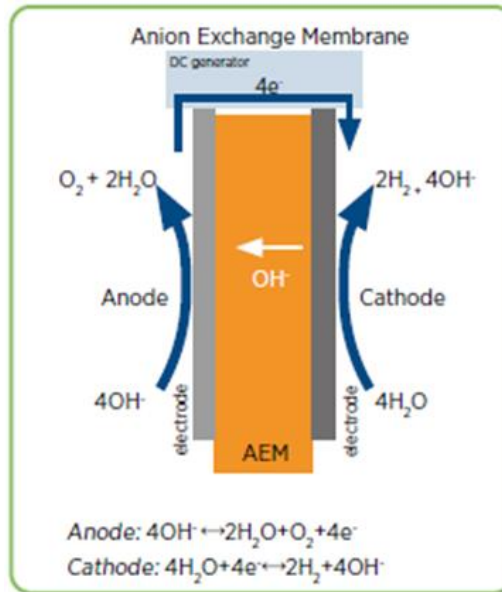


Figura 8 - Membrana Trocadora de Ânions (AEM) [Adaptada de 2].

2.6.4. Célula de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC)

Enquanto os eletrolisadores Alcalino e de Membrana Trocadora de Prótons (PEM) são conhecidos como Eletrolisadores de Baixa Temperatura (LTE), o de Óxido Sólido é um Eletrolisador de Alta Temperatura (HTE) [5]. Uma Célula de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC) (Figura 9) também é um dispositivo eletroquímico que produz hidrogênio e oxigênio a partir da água através da aplicação de uma corrente elétrica. Essa célula é formada por um eletrodo de oxigênio (ânodo) e um eletrodo de hidrogênio (cátodo) separados por um eletrólito condutor iônico. Nessa célula, o vapor de água é alimentado ao cátodo onde é reduzido a hidrogênio, ocorrendo a formação de superóxido (O^{2-}) no processo. Esses íons O^{2-} passam através do eletrólito até o ânodo, onde se recombina em moléculas de oxigênio, liberando elétrons [28,29].

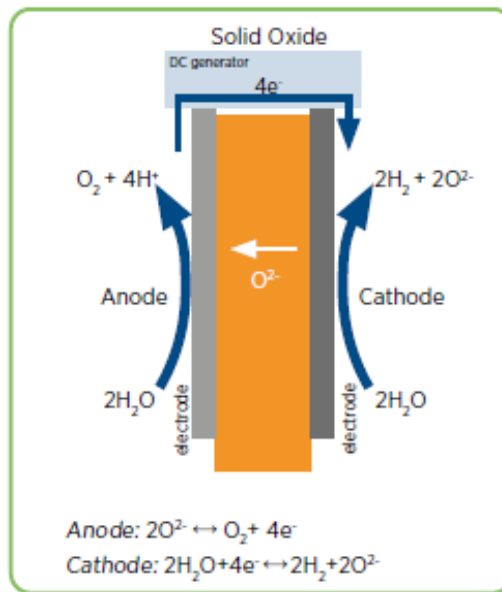


Figura 9 - Célula de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC) [Adaptada de 2].

2.7. Sistemas fotovoltaicos off-grid

Os sistemas fotovoltaicos off-grid ou isolados são desenvolvidos para situações em que a energia convencional não está disponível, por motivos ambientais ou falta de interesse comercial das concessionárias de energia elétrica. Esses sistemas, onde a energia gerada é consumida diretamente e a remanescente é armazenada, são compostos por painéis fotovoltaicos, um inversor, dispositivos de proteção, um controlador de carga e um conjunto de baterias [14,22]. A Figura 10 ilustra um sistema off-grid [11].



Figura 10 - Sistema fotovoltaico off-grid [Adaptada de 13].

Esse sistema é utilizado em várias aplicações como iluminações públicas, sistemas de telecomunicações, sinalização em ambientes rodoviários, sistemas de refrigeração, bombeamento de água, entre outras. Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a sua capacidade de autossuficiência energética, uma vez que falhas na rede elétrica não têm influência nesse sistema. Entretanto, a desvantagem está no custo elevado e na capacidade limitada de armazenamento das baterias.

2.8. Sistemas fotovoltaicos on-grid

Os sistemas fotovoltaicos on-grid são sistemas de geração de energia que ficam conectados diretamente à rede elétrica pública por meio de painéis solares. Esses sistemas possuem uma série de vantagens no meio urbano, visto que não necessitam de armazenadores de energia como baterias, e de controladores de carga. Os sistemas on-grid trabalham com a modalidade de compensação, ou seja, quando a energia injetada na rede supera a energia consumida, esta é devolvida para a rede gerando um “crédito de energia”, cujo valor será descontado quando a demanda for superior à geração [10,11,22]. Além disso,

esses sistemas não apresentam custos muitos elevados, não sendo necessária a realização de manutenções frequentes.

Além da utilização de módulos fotovoltaicos, esses sistemas necessitam de um inversor interativo, um equipamento responsável por converter a corrente/tensão elétrica contínua em alternada, detectando possíveis paradas de energia elétrica na rede. Essas interrupções acontecem para evitar acidentes de trabalho em operários de companhias elétricas [10,11]. A Figura 11 representa um esquema de sistema fotovoltaico on-grid.

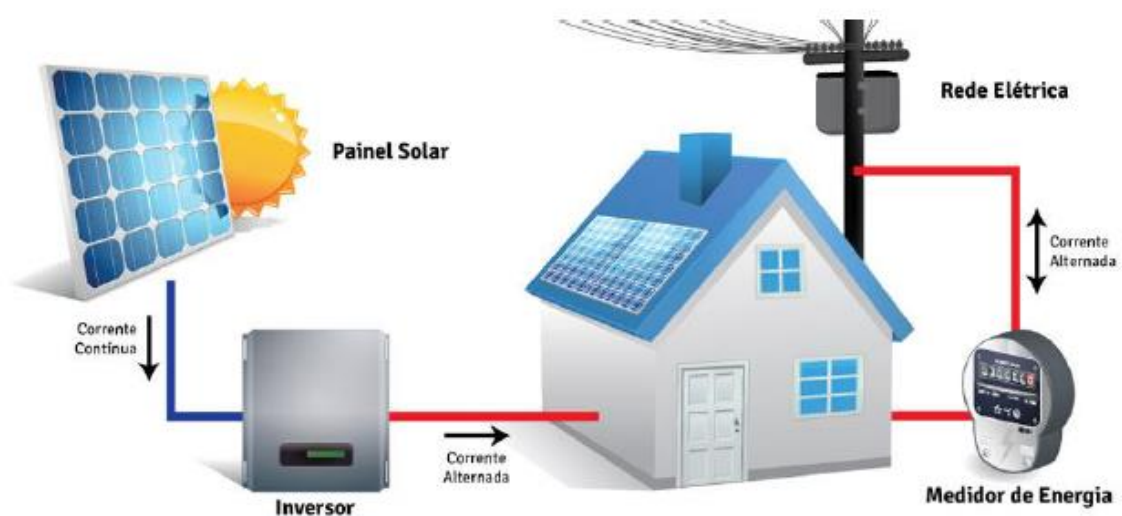


Figura 11 - Sistema fotovoltaico on-grid [10].

2.9. Aplicação dos sistemas fotovoltaicos

O principal problema das células fotovoltaicas e de outros componentes associados aos sistemas fotovoltaicos, como inversores, baterias e controladores de carga é o preço substancialmente elevado em comparação às tecnologias convencionais de geração de energia elétrica. Contudo, com o crescimento das aplicações, impulsionado por avanços tecnológicos e com a abundância de luz solar em todo o mundo, tem-se observado um aumento na produção de células fotovoltaicas [11]. Atualmente, existem muitas aplicações para essas células no cotidiano (vide Tabela 1) e a tendência é diversificar cada vez mais o uso dos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 1 - Aplicações de células fotovoltaicas no cotidiano [Adaptada de 12].

Tamanho	Exemplo de Aplicações
Até 10 W	Calculadoras de bolso; Rádios; Sensores wireless remotos; Pequenos carregadores; Cercas elétricas.
10 W a 100 W	Pequenos sistemas de iluminação; Sinais de trânsito luminosos; Parquímetros; Luzes de navegação; Estações meteorológicas; Caixas de comunicação de auto-estrada.
100 W a 1 kW	Sistemas de bombeamento e irrigação; Propulsão de pequenos barcos de recreio; Produção de eletricidade para pequenos edifícios; Sistemas híbridos pequenos.
1 kW a 10 kW	Sistemas ligados à rede elétrica ou híbridos de média dimensão; Grandes sistemas não ligados à rede, para edifícios isolados.
10 kW a 100 kW	Grandes sistemas ligados à rede; Implantações em edifícios ou no solo
100 kW a 1 MW ou mais	Sistemas muito grandes ligados à rede; Centrais fotovoltaicas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Mapeamento da cobertura

Inicialmente, foi necessário entrar em contato com uma empresa de energia fotovoltaica, neste caso, a PMC Energia Solar, localizada em São

Carlos-SP, para agendar o mapeamento do telhado do prédio do CPqMAE. Essa etapa inicial do projeto foi importante para determinar a capacidade de geração fotovoltaica, ou seja, a quantidade máxima de módulos fotovoltaicos que podem ser instalados na área disponível do prédio.

O mapeamento foi realizado com o auxílio de um drone equipado com uma câmera, responsável por capturar as imagens da cobertura do CPqMAE. As imagens capturadas pelo drone foram armazenadas em um cartão de memória e depois processadas através da plataforma Mappa pelo Engenheiro Elétrico André G. Ceribelli, que foi responsável pela montagem do layout da cobertura e pela determinação da quantidade limite de módulos fotovoltaicos.

3.2. Seleção do eletrolisador

Para realizar o dimensionamento do sistema, foi necessário escolher um eletrolisador que atendesse à capacidade de produção de hidrogênio do LH₂M e ao espaço disponível para sua instalação. De acordo com Corusse [9], a partir do método TOPSIS de Seleção de Materiais, o eletrolisador que apresentou o melhor desempenho para ser instalado no LH₂M foi o EL5N, um equipamento de 25 kW vendido pela empresa H2B2. Com base nessa informação, foi realizada uma pesquisa de mercado visando obter um levantamento de possíveis candidatos para a utilização no sistema fotovoltaico. O principal objetivo dessa pesquisa era obter a ficha técnica e o orçamento de um eletrolisador com potência da ordem de 25 kW.

3.3. Dimensionamento do sistema

Para realizar o dimensionamento, considerou-se a instalação de um eletrolisador de 12 kW no CPqMAE (21°58'43''S 47°52'45''O) que ficaria ligado ao sistema fotovoltaico pelo período de 12 horas (6:00 às 18:00). Esse período refere-se ao intervalo do nascer ao pôr do sol, onde há disponibilidade de radiação solar que possa ser capturada pelos módulos fotovoltaicos para a conversão da energia solar em energia elétrica.

Sabendo a potência do eletrolisador e o período que esse equipamento ficaria ligado, com o auxílio da PMC Energia Solar e através de dimensionamento pelo *site* da Victron Energy, determinou-se quais equipamentos seriam necessários na montagem do sistema e suas respectivas quantidades. No caso de um sistema fotovoltaico off-grid comum haveria a necessidade da instalação de várias baterias para o armazenamento da energia elétrica produzida. Entretanto, como esse projeto não visa armazenar esta energia, será colocado um único kit de baterias de lítio no sistema somente para que o eletrolisador funcione em uma potência constante de 12 kW. Essas baterias evitarão a variação da potência, em razão da radiação solar durante o dia não ser constante por motivos de sombreamentos e períodos nublados.

De posse dessas informações, foi feito um esquema elétrico desse sistema, com o auxílio da empresa, utilizando o software Autocad.

3.4. Orçamento do sistema fotovoltaico e do eletrolisador

Depois de determinar os equipamentos necessários para a montagem do projeto, a PMC Energia Solar forneceu o orçamento do sistema fotovoltaico, desconsiderando o custo do eletrolisador, já que este foi obtido após o dimensionamento do sistema. Foi necessário entrar em contato com várias empresas que realizam a venda de eletrolisadores, para se conseguir o orçamento e a ficha técnica de seus equipamentos.

3.5. Análise de viabilidade econômica

Após realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico e obter os orçamentos do sistema e do eletrolisador disponível para a instalação, foi realizada uma análise de viabilidade econômica com o auxílio do *software* Microsoft Excel e da ferramenta financeira de Valor Presente Líquido (VPL), para descobrir se o projeto seria viável ou não para a implementação no LH₂M. Todos os custos dos orçamentos que estavam em dólares americanos foram

convertidos em reais, considerando uma cotação de R\$ 5,00, para se obter um VPL de acordo com a moeda local.

Essa análise foi apenas hipotética, já que o principal objetivo não era vender essa energia de volta para a rede pública, mas sim aproveitar toda a energia solar convertida em energia elétrica para a produção de hidrogênio. Nesta análise, o cálculo do faturamento anual é dado pela Equação 1. Esse cálculo considerou o custo da energia por kWh em março de 2024 (R\$ 0,89), fornecida pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), a potência do eletrolisador e também o período em horas e em dias que esse equipamento ficará ligado.

$$Fat. Anual (R\$) = 12 \times \frac{Custo da energia}{kWh} \times kW \times Horas \times Dias \quad (1)$$

O investimento inicial do projeto é obtido somando-se os custos do sistema fotovoltaico, do eletrolisador, da embalagem de madeira, da taxa de envio do equipamento e da taxa de importação (Equação 2).

$$Invest. Inicial (R\$) = Sistema + Eletrolisador + Embalagem + Envio + Importação \quad (2)$$

Para o cálculo do gasto anual (Equação 3) com o sistema fotovoltaico, estimou-se que haveria um custo de 1% do investimento inicial do projeto referente a limpeza e manutenção anual do sistema.

$$Gasto Anual (R\$) = 0,01 \times Investimento inicial \quad (3)$$

Sabendo o faturamento anual e o gasto anual do sistema, é possível obter o lucro ou o prejuízo desse projeto (Equação 4), a depender dos valores anteriores.

$$\text{Lucro / Prejuízo (R\$)} = \text{Fat. Anual} - \text{Gasto Anual} \quad (4)$$

3.5.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade é um conceito muito importante aplicado na análise de investimentos e representa a taxa de retorno mínima que uma empresa ou investidor exige para considerar um investimento ou projeto viável.

Essa taxa pode ser estimada, tomando como referência a taxa de juros SELIC (Sistema Especial de Liquidação e Custódia) [22]. O valor tomado neste projeto será o valor da taxa SELIC em março de 2024, de 11,25%.

3.5.2. Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR)

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma ferramenta financeira utilizada para avaliar a rentabilidade de um investimento ou projeto e tem como finalidade medir o valor presente dos fluxos de caixa gerados ao longo de sua vida útil [11,22]. Essa ferramenta se tem como base o conceito de que o valor do dinheiro se altera com o tempo por causa de fatores como a inflação e as taxas de juros. O cálculo do VPL é realizado subtraindo-se o custo inicial do investimento do valor presente dos fluxos de caixa futuros [11]. A fórmula para o cálculo do VPL é dada pela Equação 5.

$$VPL = -VI + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+r)^t} \quad (5)$$

Onde “VI” indica o valor inicial investido, “t” é o tempo do investimento em anos, “n” é a quantidade de anos do fluxo de caixa, “FCt” é o fluxo de caixa relativo ao valor investido no sistema e “r” é a taxa interna de retorno.

Para este trabalho, foi considerado um fluxo de caixa de 15 anos e uma taxa de crescimento anual do investimento de 23,30% [36]. Esses parâmetros serão necessários posteriormente no cálculo do VPL.

Se VPL for menor que zero, significa que o projeto é inviável do ponto de vista financeiro. Já um VPL maior que zero indica que o projeto é economicamente viável, pois os fluxos de caixa futuros têm um valor presente total maior do que o investimento inicial [10,11].

Para seguir com a análise, é necessário realizar o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) cuja definição é a taxa de retorno do investimento. A TIR pode ser considerada uma taxa hipotética que torna o VPL igual a zero, ou seja, é o valor que satisfaz a Equação 6.

$$\sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (6)$$

Onde “TIR” é a Taxa Interna de Retorno, “FC_t” é o fluxo de caixa e “t” é o tempo do investimento em anos.

4. RESULTADOS

4.1. Layout da cobertura

Após realização do mapeamento, foi criado um layout da cobertura (Figura 12), ilustrando como seria a disposição dos módulos fotovoltaicos. As regiões com coloração azul escura posicionadas sobre o telhado do prédio do CPqMAE representam a área que poderia ser recoberta pelos módulos fotovoltaicos. Considerando que cada módulo possui 2,6 m², a área disponível para a instalação dos painéis é de 777,4 m² (área ocupada por 299 módulos de 550 W).

Sabendo que a irradiação solar diária média no local é de 4,97 kWh/m²/dia, se fosse utilizado todo o espaço disponível, a capacidade de produção no LH₂M seria de 3863,7 kWh/dia.



Figura 12 - Layout da cobertura [37].

4.2. Eletrolisador e orçamento

A pesquisa de mercado mostrou que a maioria das empresas produzem eletrolisadores acima de 1 MW, destinados a grandes instalações de produção de hidrogênio. Entretanto, foi encontrado um equipamento adequado para ser ligado ao sistema fotovoltaico, que atende a capacidade de produção do LH₂M. Esse equipamento é o eletrolisador LBEX-P20K (Figura 13) da Fuel Cell Store, localizada no Texas, Estados Unidos. Trata-se de um eletrolisador do tipo

Membrana Trocadora de Prótons (PEM) com consumo máximo de energia de 20 kW.



Figura 13 - Eletrolisador LBEX-P20K [38].

A empresa coreana de eletrolisadores Light Bridge foi a responsável por enviar o manual do usuário contendo a ficha técnica do equipamento (Tabela 2).

Tabela 2 - Ficha técnica do eletrolisador LBEX-P20K [39].

Lista	Conteúdo	
Nome do Modelo	LBEX-P20K	
Tamanho	1500 mm X 500 mm X 1800 mm	
Tensão de Entrada	380VCA, trifásico, 50 - 60 Hz	
Consumo de Energia	<20kW	
Produção de gás /h	Gás hidrogênio 4000L/h Gás oxigênio 2000L/h, respectivamente	
Pressão Ajustável	Max 5 barg	
Temperatura de Operação	10 - 80°C	
Pureza do gás	Gás hidrogênio 99,97 - 99,99% Gás oxigênio 98%	

De acordo com o orçamento fornecido pela Light Bridge (Anexo A), o custo do eletrolisador mais o seu envio internacional em embalagem de madeira (necessário para produtos acima de 20kg) é de US\$107.725,00 (R\$ 538.625,00). Adicionalmente, foi considerada uma taxa de importação de 20% sobre o eletrolisador e a embalagem, visto que o LBEX-P20K se trata de um produto de outro país.

4.3. Esquema elétrico do sistema

Utilizando a latitude do CPqMAE (21°58'43"S 47°52'45"O), a potência do eletrolisador LBEX-P20K (12 kW) e o período de funcionamento do equipamento (12 horas) como dados de entrada para o dimensionamento através do *site* da Victron Energy, foi possível obter os seguintes equipamentos e acessórios que irão compor o sistema fotovoltaico:

- 3 Inversores Victron Off Grid Multiplus-II 5000VA 48V/230V Senoidal Pura+Carregador
- 2 Controladores Victron Carga Blue-Solar MPPT RS 450/200-TR
- 1 Interface Victron MK3-USB (VE.BUS para USB)
- 1 GX Collor Controle Victron (Monitoramento remoto)
- 3 Cabos Victron VE. Direct 1,8 m
- 1 Armário/Gabinete Mod. 2100 x 1500 x 800 mm (2T / 1P2,65 GA)
- 5 QD HCT 2401-16 COMP M16 240 mm² terminal
- 100 QD Cabo flexível Lametil preto (1x120 mm²)
- 3 Chaves de bateria Victron Battery Switch ON/OFF 275A
- 1 BYD/ Kit de bateria C15-8S 13,8 KWh c/ gabinete B-Box 13,8 BMA/BMS
- 2 Microventiladores para sistema de exaustão 314 x 314 – 220 V RAL7035
- 2 Microventiladores para sistema de ventilação 314 x 314 220V RAL7035
- 110 Estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos (telha metálica)
- 800 Cabos solar 6 mm preto e vermelho

- 54 Módulos fotovoltaicos 660 W Trina Solar modelo Vertex com eficiência de 21,6% (cobrindo uma área de 167,4 m²).

O esquema elétrico do sistema (Figura 14) ilustra como será a disposição e conexão desses equipamentos.

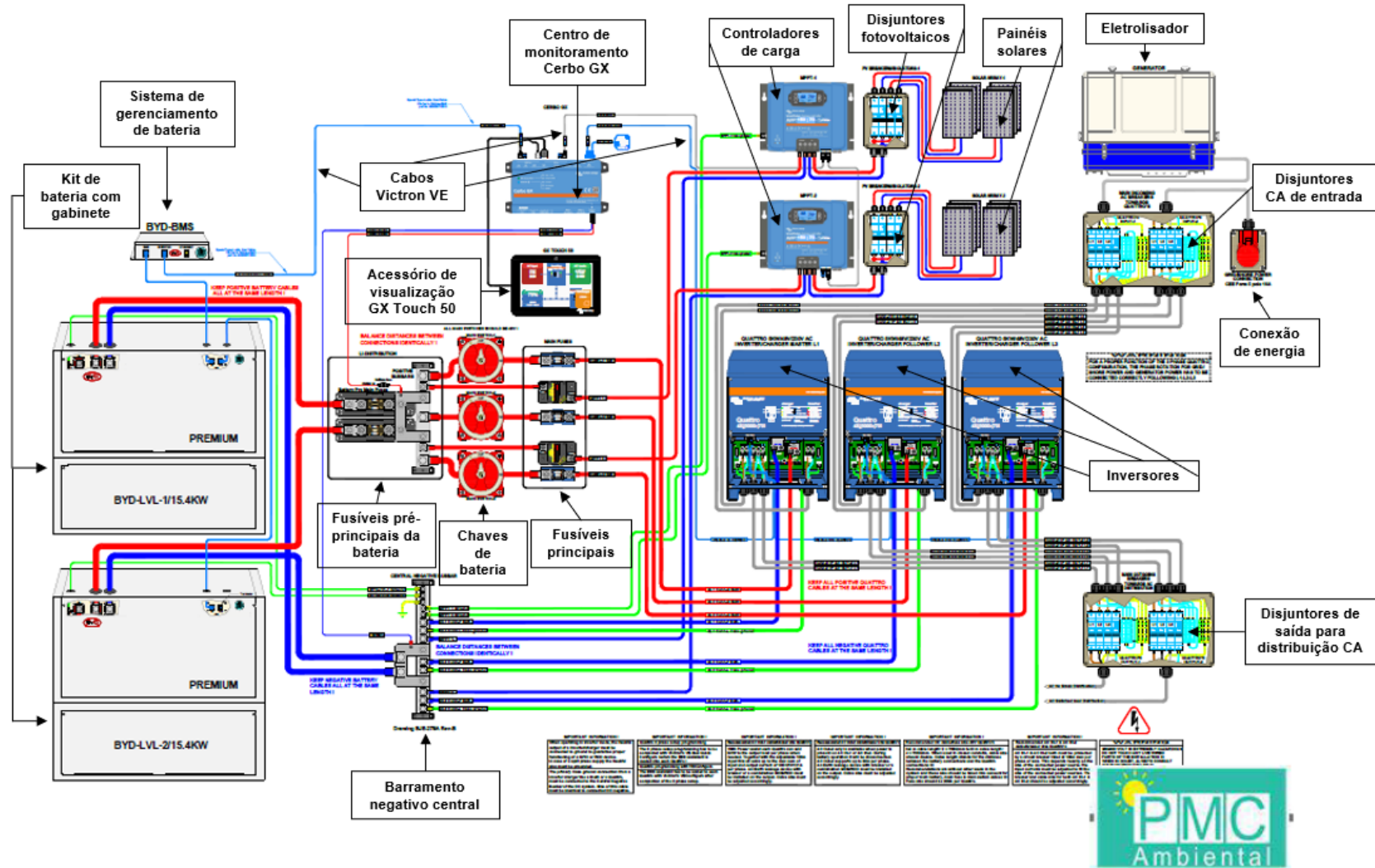


Figura 14 - Esquema elétrico do sistema [40].

4.4. Orçamento do sistema

A PMC Energia Solar forneceu o orçamento para a instalação do sistema off-grid (ANEXO B) no LH₂M, cujo valor total dos equipamentos é de R\$ 318.044,43. Para a montagem desse sistema também será necessária mão de obra especializada que terá um custo adicional de R\$ 63.608,88 ao projeto. Logo, o valor total do orçamento do sistema fotovoltaico é de R\$ 381.653,31.

4.5. Análise de viabilidade econômica

A Tabela 3 mostra os dados relacionados ao eletrolisador LBEX-P20K que foram utilizados para o cálculo do faturamento anual e do investimento inicial do sistema fotovoltaico.

Tabela 3 - Dados para o cálculo do faturamento anual e do investimento inicial.

LBEX-P20K	
R\$/kWh	R\$ 0,89
kW	12
Horas	12
Dias	30
Equipamento	R\$ 488.800,00
Embalagem de madeira	R\$ 1.080,00
Envio e manuseio	R\$ 48.745,00
Importação	R\$ 97.976,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao juntar os dados da Tabela 3 com o orçamento do sistema off-grid (ANEXO B), foram calculados o investimento inicial, além dos faturamentos (economia na energia elétrica) e gastos mensais e anuais do projeto. A partir desses valores, foi gerada a Tabela 4 que mostra a TMA utilizada no cálculo do VPL e o lucro anual que seria gerado com esse sistema fotovoltaico.

Tabela 4 - Dados da análise de investimento para o sistema off-grid.

ANÁLISE DE INVESTIMENTO SISTEMA OFF-GRID			
Invest. Inicial	R\$ 1.018.254,31		
Fat. Mensal	R\$ 3.844,80	Fat. Anual	R\$ 46.137,60
Gastos mensais	R\$ 848,55	Gastos Anuais	R\$ 10.182,54
		Lucro/Prejuízo	R\$ 35.955,06
TMA	11,25%		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, foi realizado o cálculo da TIR e do VPL (Tabela 5). A TIR obtida para esse projeto foi de 12% e o VPL apresentou o valor positivo de R\$ 78.827,96.

Tabela 5 - Cálculo da TIR e do VPL.

TAXA DE CRESC. ANUAL		0	-R\$ 1.018.254,31
23,30%		1	R\$ 35.955,06
VPL		2	R\$ 44.332,59
R\$ 78.827,96		3	R\$ 54.662,08
TIR		4	R\$ 67.398,34
12%		5	R\$ 83.102,16
		6	R\$ 102.464,96
		7	R\$ 126.339,29
		8	R\$ 155.776,35
		9	R\$ 192.072,24
		10	R\$ 236.825,07
		11	R\$ 292.005,31
		12	R\$ 360.042,55
		13	R\$ 443.932,46
		14	R\$ 547.368,72
		15	R\$ 674.905,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O mapeamento da cobertura somente foi necessário para saber qual seria a quantidade máxima de módulos fotovoltaicos que poderiam ser instalados no CPqMAE. De acordo com o layout da cobertura, descobriu-se que esse local suporta 299 módulos de 550 W. Contudo, de acordo com o dimensionamento

realizado no *site* da Victron Energy, serão necessários apenas 54 módulos fotovoltaicos de 660 W na montagem desse projeto.

Sabendo que esses módulos possuem 3,1 m², a área coberta por painéis fotovoltaicos, responsável por captar a energia solar, será de 167,4 m². Utilizando o dado de irradiação solar diária média do local de instalação (4,97 kWh/m²/dia), caso o projeto seja implementado, a energia gerada pelo sistema será de 832 kWh/dia.

Após realizar a pesquisa de mercado, o único equipamento encontrado que se adequava ao projeto era o eletrolisador LBEX-P20K que apresenta um custo de R\$ 488.800,00, como pode ser visto na Tabela 3. Apesar de o sistema fotovoltaico ser dimensionado para um eletrolisador de 12 kW, o equipamento encontrado pode funcionar normalmente nessa potência, já que o LBEX-P20K possui um consumo de energia de até 20 kW.

Considerando que esse eletrolisador produz 4000 L/h de gás hidrogênio e 2000 L/h de gás oxigênio, e que o seu funcionamento ocorrerá das 6:00 às 18:00 (12 horas), a capacidade de produção de hidrogênio e oxigênio no LH₂M será de 48000 NI/dia (1,095 atm) e 24000 NI/dia (1 atm), respectivamente. A quantidade de água diária utilizada para produzir esses gases pode ser calculada a partir da estequiometria da reação de eletrólise da água: $2H_2O_{(l)} \rightarrow 2H_{2(g)} + O_{2(g)}$. Utilizando a CNTP e considerando que 1 kg de água é equivalente a 1 L, é obtido o volume aproximado de 38,57 L necessário para a produção.

Os gases produzidos poderão ser armazenados em tanques, e no caso do hidrogênio, este poderá ser armazenado na forma de hidretos metálicos. Posteriormente, os tanques de hidrogênio poderão ser vendidos para empresas que realizam o comércio deste gás, onde este poderá ser convertido em outros portadores de energia, ser utilizado em células de combustível, ou ainda ser queimado em motores e turbinas. Por outro lado, os tanques de oxigênio poderão ser utilizados para aplicações médicas, industriais, laboratoriais, de aviação e até recreativa como em utilizações para mergulho.

O esquema elétrico projetado com auxílio do *software* Autocad (Figura 14) mostrou como deve ser conectado cada equipamento e acessório que irá compor

o projeto. Esse esquema ainda apresenta todas as informações relacionadas a instalação dos cabos, como sua correta disposição, espessura, comprimento e tipo de corrente (CC ou CA) para o funcionamento adequado do sistema. Adicionalmente, existe um aviso que não se deve tocar em nenhuma parte da instalação que esteja energizada, sendo necessário recorrer à distribuidora Victron Energy em caso de dúvidas.

De acordo com a análise de viabilidade econômica, o resultado do VPL obteve um valor positivo de R\$ 78.827,96, o que significa que o projeto é viável no período de investimento analisado de 15 anos.

6. CONCLUSÕES

Para a montagem do projeto proposto, foram considerados 54 módulos fotovoltaicos de 660 W modelo Vertex, com eficiência de 21,6%. Essa quantidade de módulos é inferior à capacidade máxima de instalação na cobertura do CPqMAE, porém, atende à produção de hidrogênio do LH₂M. Com a implementação desse sistema, a capacidade de geração de energia será de 832 kWh/dia e a capacidade de produção de H₂ e O₂ será de 48000 NI/dia (1,095 atm) e 24000 NI/dia (1 atm), respectivamente. Adicionalmente, serão necessários 38,57 L de água por dia para produzir esses gases.

O equipamento escolhido para ser instalado ao sistema fotovoltaico off-grid, foi o eletrolisador do tipo PEM LBEX-P20K da Fuel Cell Store com o custo de R\$ 488.800,00, visto que este funciona em potências de até 20 kW, podendo trabalhar em 12 kW de maneira adequada como dimensionado no projeto.

O custo total do projeto foi de R\$ 1.018.254,31. Esse custo é composto pelos seguintes itens: eletrolisador (R\$ 488.800,00), embalagem de madeira (R\$ 1080,00), envio e manuseio do equipamento (R\$ 48.745,00), importação (R\$ 97.976,00) e sistema fotovoltaico (R\$ 381.653,31).

O esquema elétrico projetado com o auxílio do *software* Autocad apresenta informações importantes sobre a instalação dos cabos, como sua correta distribuição, espessura, comprimento e tipo de corrente (CA ou CC). Tais

informações devem ser seguidas durante a implementação do projeto, pois são fundamentais para o funcionamento ideal de cada equipamento e acessório que compõe o sistema fotovoltaico off-grid.

Por fim, a análise de viabilidade econômica apresentou um VPL positivo de R\$ 78.827,96 durante o período analisado de 15 anos, o que torna o projeto de sistema fotovoltaico off-grid para a produção de hidrogênio viável no LH₂M.

7. REFERÊNCIAS

[1] Institucional. CPqMAE – Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia, 2024. Disponível em: <<https://www.cpqmae.ufscar.br/pt-br/institucional>>. Acesso em 1 de abr. de 2024.

[2] TAIBI, Emanuele et al. Green hydrogen cost reduction. 2020.

[3] BODNER, Merit; HOFER, Astrid; HACKER, Viktor. H₂ generation from alkaline electrolyzer. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, v. 4, n. 4, p. 365-381, 2015.

[4] TIJANI, Alhassan Salami; YUSUP, Nur Afiqah Binti; RAHIM, AH Abdol. Mathematical modelling and simulation analysis of advanced alkaline electrolyzer system for hydrogen production. Procedia Technology, v. 15, p. 798-806, 2014.

[5] DAVID, Martín; OCAMPO-MARTÍNEZ, Carlos; SÁNCHEZ-PEÑA, Ricardo. Advances in alkaline water electrolyzers: A review. Journal of Energy Storage, v. 23, p. 392-403, 2019.

[6] Saiba agora como é feito o dimensionamento de energia solar! HCC Energia Solar, 2023. Disponível em: <<https://hccenergiasolar.com.br/saiba-agora-como-e-feito-o-dimensionamento-de-energia-solar/>>. Acesso em 15 de nov. de 2024.

[7] Passo a passo de como dimensionar um sistema solar. Energia Solar Master, 2021. Disponível em: <<https://energiasolarmaster.com.br/2022/02/01/passo-a-passo-de-como-dimensionar-um-sistema-solar/>>. Acesso em 16 de nov. de 2024.

[8] O que é um eletrolisador e por que é essencial para o fornecimento de hidrogênio verde? Iberdrola, 2024. Disponível em:

<<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>>._Acesso em 17 de nov. de 2024.

- [9] Corusse, M. Hidrogênio como vetor energético: análise da implementação de um sistema de eletrólise de água para obtenção do gás hidrogênio. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 77. 2018.
- [10] CHITOLINA, Rafael Angelo et al. Metodologia para dimensionamento de sistema fotovoltaico na modalidade de autoconsumo remoto-estudo de caso Florianópolis. 2017.
- [11] CURY, Julio César Carreira. Estudo de caso: dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial. 2023.
- [12] PROENÇA, E. D. R. B. A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal. 2007. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2007.
- [13] Um sistema Autônomo ou fora da rede não está conectado à uma Rede Elétrica. AWS Energy Tech, 2019. Disponível em: <<https://awsenergiasolar.com.br/servico/sistemas-autonomos-off-grid/>>. Acesso em 16 de jan. de 2024.
- [14] RIBEIRO, Giankarlo Fialho. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um motorhome.
- [15] ALMEIDA, Thales Hieron Soares de et al. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico grid-tie e off-grid para alimentação de energia elétrica do laboratório hidráulico do CCTA/UFCG. 2018.
- [16] OLIVEIRA, Luiz Henrique et al. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica. 2018.
- [17] BERTO, A. Módulos fotovoltaicos – Comparando os dados técnicos dos módulos solares de 36, 60 e 72 células. In: Solar Brasil. São Paulo, 27 de nov. de 2017. Disponível em: <<https://www.solarbrasil.com.br/blog/modulos-fotovoltaicos-comparando-os-dados-tecnicos-dos-modulos/>>. Acesso em 22 de fev. de 2024.
- [18] PEREIRA, Osvaldo LS; GONÇALVES, Felipe F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão-SC. Revista Brasileira de Energia, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

- [19] CARNEIRO, Joaquim AO. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. 2009.
- [20] Inverter. Victron Energy, 2024. Disponível em: <<https://www.victronenergy.pt/inverters/phoenix-inverter-12v-24v-48v-800va-3kva>>. Acesso em 24 de mar. de 2024.
- [21] SmartSolar MPPT de 150/70 a 250/100 VE.Can. Victron Energy, 2024. Disponível em: <<https://www.victronenergy.pt/solar-charge-controllers/smartsolar-mppt-ve.can>>. Acesso em 24 de mar. de 2024.
- [22] LINS, Laís Rayanne Pinheiro. Dimensionamento de sistema fotovoltaico off-grid para Escritório móvel. 2018.
- [23] Lithium Battery Smart 12,8V & 25,6V. Victron Energy, 2024. Disponível em: <<https://www.victronenergy.pt/batteries/lithium-battery-12-8v>>. Acesso em 24 de mar. de 2024.
- [24] RASHID, M. D. et al. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2015.
- [25] ZOULIAS, Emmanuel et al. A review on water electrolysis. Tcjst, v. 4, n. 2, p. 41-71, 2004.
- [26] YODWONG, Burin et al. Proton exchange membrane electrolyzer modeling for power electronics control: a short review. C, v. 6, n. 2, p. 29, 2020.
- [27] MA, Zhiwen et al. A comprehensive modeling method for proton exchange membrane electrolyzer development. International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 34, p. 17627-17643, 2021.
- [28] NECHACHE, Aziz; HODY, Stéphane. Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 149, p. 111322, 2021.
- [29] MOÇOTEGUY, Philippe; BRISSE, Annabelle. A review and comprehensive analysis of degradation mechanisms of solid oxide electrolysis cells. International journal of hydrogen energy, v. 38, n. 36, p. 15887-15902, 2013.
- [30] VINCENT, Immanuel; BESSARABOV, Dmitri. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 1690-1704, 2018.

- [31] FORTIN, Patrick et al. High-performance alkaline water electrolysis using Aemion™ anion exchange membranes. *Journal of Power Sources*, v. 451, p. 227814, 2020.
- [32] VINCENT, Immanuel; KRUGER, Andries; BESSARABOV, Dmitri. Development of efficient membrane electrode assembly for low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 16, p. 10752-10761, 2017.
- [33] LI, Changqing; BAEK, Jong-Beom. The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers. *Nano Energy*, v. 87, p. 106162, 2021.
- [34] VINCENT, Immanuel; LEE, Eun-Chong; KIM, Hyung-Man. Comprehensive impedance investigation of low-cost anion exchange membrane electrolysis for large-scale hydrogen production. *Scientific reports*, v. 11, n. 1, p. 293, 2021.
- [35] PUSHKAREVA, I. V. et al. Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 49, p. 26070-26079, 2020.
- [36] MORDOR INTELLIGENCE RESEARCH & ADVISORY. Tamanho do mercado de energia solar do Brasil e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029). Mordor Intelligence, setembro de 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-solar-energy-market>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- [37] Ceribelli, G. A. Layout da cobertura. 2024. Arquivo TIF.
- [38] PEM Water Electrolysis System (20 kW). Fuel Cell Store, 2024. Disponível em: <https://www.fuelcellstore.com/pem-water-electrolysis-system-20kw>. Acesso em 02 de abr. de 2024.
- [39] Light Bridge. PEM Water Electrolyzer System (20 kW): User Manual. Republic of Korea: Light Bridge, 2020. 4 p.
- [40] PMC Energia Solar. Esquema elétrico do sistema. 2024. Arquivo TIF. São Carlos: PMC Energia Solar.

ANEXO A – Orçamento do eletrolisador

 LIGHT BRIDGE <small>Green Hydrogen Energy</small> http://www.lightbridge.co.kr		COMPANY: Lightbridge Co.,Ltd ADDRESS: #512 Apexcity, Dongtansunhawn-daero 823, Hwaseung-si Gyeonggi-do, Republic of Korea 18471 CONTACT: lightbridge.sales@gmail.com +82 70 4407 2400 TAX ID: 134-86-89210		
PROFORMA INVOICE				
Exporter : Lightbridge Co.,Ltd Address: #512 Apexcity, Dongtansunhawn-daero 823, Hwaseung-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea 18471 Name: YuJin Lee E-Mail: lightbridge.sales@gmail.com Tel: +82 70 4407 2400		No. & Date of Invoice PI240322-01 & 2024-03-22		
		No. & Date of Contract / Order		
		L/C Issuing Bank		
Consignee : Federal University of São Carlos Address: Brazil Name: Lucas Fernando Romano E-Mail: lucasromano@estudante.ufscar.br Tel: +5516997592691		No. & Date of Documentary Credit		
		Terms of Delivery and Payment DAP and 100%T/T in Advance		
Billing Address		Country of Origin of Goods South Korea		
		Note: * Warranty: 1 Year * Any modification of disassembly of product will result in void of warranty. * Lead time may fluctuate depending on the parts supplier's availability. * After sales support will be provided in the form of email, phone, video call and on-site(in case of faulty product diagnosed by LightBridge)		
Port of Loading	Port of Discharge			
South Korea	Brazil			
Vessel/Flight No.	Sailing on/or about			
Courier				
FULL DETAILS/DESCRIPTION OF GOODS		QUANTITY	UNIT PRICE	AMOUNT
PEM Water Electrolyser System - 30kW Power Consumption Model name: LBEX-P30K Size: 1,700 X 550 X 1,800 (mm) Weight: 280 kg (wooden packing +20kg) HS code: 9028 10 Delivery: 16 weeks after payment.		1 SET	US\$97,760.00	US\$97,760.00
Wooden packing cost for products over 20kg:		1 SET	US\$216.00	US\$216.00
DHL Express Shipping & handling:		1 SET	US\$9,749.00	US\$9,749.00
Inspection: Seller's inspection is to be final				US\$107,725.00
TOTAL AMOUNT				US\$107,725.00
BANK INFORMATION *Beneficiary's Account No. : 944-008689-56-00014 *Beneficiary Name: LIGHT BRIDGE CO.,LTD *Official Name of IBK: Industrial Bank of Korea. *Bank's BIC code: IBKOKRSE *Bank Addr: 79, EULJI-RO, JUNG-GU, SEOUL, SOUTH KOREA *Branch info: Industrial Bank of Korea Gwanggyo Joongang Branch 15, Central town-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, South Korea				
		 <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> PETER KIM  CEO </div>		
Import duties and taxes are not included in the product price or shipping and handling cost. These charges are the buyer's responsibility as we are only charging the transportation fee for your order. You may check with your country's customs office to determine if there will be additional costs.				

ANEXO B – Orçamento do sistema off-grid



Orçamento Eletrolisador Off grid

Nome Obra: UFSCAR **Nº Orçamento:** **Tipo de Instalação:** Laboratório **Data:** 12/03/2024
Ciente: Lucas Romano **Estado:** SP **Contato:** **E-mail:**
Local: Sao Carlos **Fone:** 16 99759-2691

I - Especificação Técnica e Relação de Equipamentos

Segue abaixo especificação técnica dos equipamentos e acessórios para instalação do Eletrolisador Off grid.

ORÇAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Item	Descrição	Quant	Valor
Inversor	SOLAR - INVERSOR VICTRON OFF GRID MULTIPLUS-II 5000VA 48V/230V SENOIDAL PURA+CARREGADOR	3	
Controlador	SOLAR - CONTROLADOR VICTRON CARGA BLUE-SOLAR MPPT RS 450/200-TR	2	
Interface	SOLAR - INTERFACE VICTRON MK3-USB (VE.BUS PARA USB)	1	
Monitoramento	SOLAR - GX COLLOR CONTROLE VICTRON (MONITORAMENTO REMOTO)	1	
Cabo	SOLAR - CABO VICTRON VE. DIRECT 1,8M	3	
Gabinete	SOLAR - ARMARIO/GABINETE MOD. 2100 x 1500 x 800 MM (2T / 1P2,65 GA)	1	
Terminal	SOLAR - QD HCT2401-16 COMP M16 240MM2 TERMINAL	5	
Cabo Flexível	SOLAR - QD CABO FLEXIVEL LAMETIL PRETO (1x120 MMP)	100	
Chave	SOLAR - CHAVE DE BATERIA VICTRON BATTERY SWITCH ON/OFF 275A	3	
Bateria Lítio	SOLAR - BYD/ KIT BATERIA C15-8S 13,8 KWH C/GABINETE B-BOX 13,8 BMA/BMS	1	
Exaustão	SOLAR - MICROVENTILADOR SISTEMA EXAUSTAO 314x314- 220V RAL7035	2	
Ventilacao	SOLAR - MICROVENTILADOR SISTEMA VENTI 314x314- 220V RAL7035	2	
Estrutura	SOLAR - ESTRUTURA FIXACAO DOS MODULOS FOTOVOLTAICOS TELHA METALICA	110	
Cabo Solar	SOLAR - CABO SOLAR 6 MM PRETO E VERMELHO	800	
Modulo Fotovoltaico	SOLAR - MODULO FOTOVOLTAICO 660 W TRINA SOLAR MODELO VERTEX EFICIENCIA 21,6%	54	
Subtotal Equipamentos:			R\$ 318.044,43

SERVIÇOS

Item	Descrição	Quant	Valor
Instalação	Mão de obra especializada para instalação do sistema fotovoltaico de um eletrolisador off grid	UN	R\$ 63.608,88
Subtotal Serviços:			R\$ 63.608,88

VALOR TOTAL DO ORÇAMENTO

Subtotal Equipamentos:	R\$	318.044,43
Subtotal Serviços:	R\$	63.608,88
Total :	R\$	381.653,31

Condição Pagament A combinar

Validade da Proposta: 7 dias corridos.
Prazo de Produção: 30 DD

Garantia:

Modulo Solar:..... 120 meses Quadro de Comando:..... 12 meses
 Inversor :..... 60 meses Demais Equipamentos:..... Conforme fabricantes

Sem mais para o momento, nos colocamos a disposição para esclarecimento de eventuais dúvidas e aguardamos retorno para consolidação do investimento.
Atenciosamente,

PMC Energia Solar

PMC Energia Solar| www.pmconstrutora.com.br

FOR 071

1/1