

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO

DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

ABRÃO GARCIA DE OLIVEIRA JUNIOR

**UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA HÍBRIDOS EM APLICAÇÕES ATÉ 5kW**

SÃO PAULO-SP

2020

ABRÃO GARCIA DE OLIVEIRA JUNIOR

**UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA HÍBRIDOS EM APLICAÇÕES ATÉ 5kW**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do Título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e Eficiência Energética, no Programa de Pós-Graduação Lato sensu do Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoní

SÃO PAULO-SP

2020

EU AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL
DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira Junior, Abrão Garcia.

Uma Análise da Viabilidade do Uso de Sistemas de
Armazenamento de Energia Híbridos em Aplicações até 5kW, 2020.

61f.: il.; 30 cm.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e
em Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Armazenamento de energia. 2. Sistemas fotovoltaicos. 3. Fonte de
Alimentação Ininterrupta. Título

ABRÃO GARCIA DE OLIVEIRA JUNIOR

**UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA HÍBRIDOS EM APLICAÇÕES ATÉ 5kW**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do Título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e Eficiência Energética, no Programa de Pós-Graduação Lato sensu do Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

APROVADO EM XX/XX/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoní

Orientador

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Prof. xxx

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
minha irmã, minha esposa, meus sogros e ao meu
primo Bruno Garcia de Oliveira (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial para meus familiares em especial a minha esposa Natália Aparecida de Melo pela paciência e ajuda na execução deste trabalho.

Aos meus amigos, os integrantes do Serviço Técnico de Conversão, Transformação e Acumulação de Energia (CTAE) do IEE-USP: Alcio Katsuyoshi Shimizu, Almir Sabino, Antonio Quirino, Fernando Gava e Francisco Salotti pela amizade, pelo compartilhamento das informações e conhecimentos aqui apresentados.

Em especial ao engenheiro José Cesar de Souza Almeida Neto do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do IEE-USP pela cordialidade, paciência e informações passadas, ao engenheiro especialista em UPS's Armando Cavero Miranda pela cordialidade, paciência e conhecimento compartilhado, ao engenheiro Fabio Ramos do banco da Amazônia de Belém-PA pela paciência, amizade e compartilhamento de informações aqui apresentadas, ao professor de engenharia elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) Danilo Ferreira de Souza pela amizade e estímulo a minha decisão em seguir os estudos e aos professores Dr. Gustavo Barreto e Dr. José Aquiles Baesso Grimoni pela disposição e conselhos na orientação deste trabalho.

Abandonar a vida por um sonho é
estimá-la exatamente por quanto ela vale.

Michel de Montaigne

RESUMO

Como o tema energia e fontes alternativas estão no centro das grandes questões atuais, este trabalho analisa a viabilidade do uso de dois equipamentos que usam tecnologia de armazenamento de energia oriunda de fontes híbridas, tradicional (rede pública de energia elétrica) e solar (painéis fotovoltaicos). O primeiro equipamento é uma *Uninterruptible Power Supply (UPS)* híbrida e o segundo é uma bateria de lítio para carros elétricos e aplicações domésticas de nome comercial *Power Wall (PW)*. Foi verificado o retorno do investimento na compra de tais equipamentos com sendo a *UPS* híbrida comparada com o uso de uma *UPS* tradicional e a bateria *Power Wall* verificada como alternativa a perda de créditos gerados na revisão tarifária da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) modalidade 5, além de comparado seu preço contra um sistema de armazenamento de energia isolado tradicional. Foram escolhidas três cidades para a comparação tarifária, São Paulo-SP, Belém-PA localizada no estado que possui a energia mais cara do Brasil em agosto de 2020 e Araruama-RJ cidade que possui a energia mais cara do Brasil em agosto de 2020. Tais equipamentos ainda não são comercializados no país apesar de ser possível encontrar uma *UPS* híbrida similar no mercado.

Palavras-chave: Armazenamento de energia. Sistemas fotovoltaicos híbridos. Fonte de alimentação ininterrupta.

ABSTRACT

As the theme energy and alternative sources are at the center of major current issues, this paper analyzes the feasibility of using two devices that use energy storage technology from hybrid sources, traditional (public electricity grid) and solar (photovoltaic panels). The first piece of equipment is a hybrid Uninterruptible Power Supply (UPS) and the second is a lithium ion battery for electric cars and household applications called Power Wall (PW). The return on investment in the purchase of such equipment was verified with the hybrid UPS being compared to the use of a traditional UPS and the Power Wall battery verified as an alternative to the loss of credits generated in the tariff review of the Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 5, in addition to comparing its price against a traditional isolated energy storage system. Three cities were chosen for the tariff comparison, São Paulo-SP, Belém-PA town located at the state which has the most expensive energy in Brazil in august 2020 and Araruama-RJ city which has the most expensive energy in Brazil in august 2020. Such equipment is not yet commercialized in the country although it is possible to find a similar hybrid UPS on the market.

Keywords: Energy storage. Hybrid photovoltaic systems. Uninterruptible power supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo energético mundial 1990 – 2017 em (ktoe)	18
Figura 2 – Gráfico matriz elétrica brasileira 2019.....	19
Figura 3 - Ruído no sinal elétrico.....	26
Figura 4 - UPS semafórica internamente.....	28
Figura 5 - Diagrama de blocos <i>UPS off-line</i>	28
Figura 6 - Diagrama de blocos <i>UPS line-interactive</i>	29
Figura 7 - Diagrama de blocos <i>UPS line interactive</i> modo bateria.	30
Figura 8 - Diagrama de blocos <i>UPS on-line</i> modo normal.....	31
Figura 9 - Sistema de armazenamento de energia isolado ou <i>off-grid</i>	32
Figura 10 - Bateria chumbo ácido <i>VRLA</i>	33
Figura 11 - Conceito de <i>net metering</i>	35
Figura 12 - Revisão de incentivos a GD.....	36
Figura 13 - Diagrama de blocos <i>HUPS/ESS</i>	38
Figura 14 - Funcionamento <i>HUPS</i>	39
Figura 15 - <i>HUPS</i> vista: frontal, aberta e lateral.....	40
Figura 16 - Imagem central da tela de interface homem máquina (IHM) da <i>HUPS</i> ..	40
Figura 17 - Bateria <i>PW2</i> instalada.....	42
Figura 18 - Imagem aplicativo <i>PW2</i>	43
Figura 19 - Conceito de HSP.	45
Figura 20 – Gráfico rendimento X vida útil do painel ao longo dos anos.....	49
Figura 21 - Capacidade de armazenamento da <i>PW</i> ao longo dos anos.....	54
Figura 22 - Evolução do preço da energia elétrica residencial no Brasil de 2010 a 2020.....	57
Figura 23 - TIR <i>PW</i> com impostos em função do preço do dólar.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Irradiação solar média mensal por município.....	46
Tabela 2 - Temperatura média mensal máxima por município.....	46
Tabela 3 - Temperatura de operação média do painel por município.....	47
Tabela 4 - Potência média máxima produzida pelo painel por município....	47
Tabela 5 - Energia média mensal gerada.....	48
Tabela 6 - Energia média mensal gerada por unidade de área (kWh/m ²). ...	48
Tabela 7 - Energia gerada ao longo da vida útil de um painel em cada município.	49
Tabela 8 - Preço do kWh e composição por município.....	50
Tabela 9 - Valor a pagar para cinco perfis de consumo por município.....	51
Tabela 10 - Preço do kWh gerado em função da aplicação da alternativa 5 e percentual de perdas.	51
Tabela 11 - Valor em R\$ a perder por mês com a aplicação da alternativa 5.	52
.Tabela 12 - Valor em R\$ a perder por ano com a aplicação da alternativa 5.	52
Tabela 13 - Energia economizada ao longo da vida útil da HUPS ligada com nove painéis fotovoltaicos, em kWh.....	53
Tabela 14 - Energia total armazenada ao longo da vida útil de uma <i>PW</i>	55
Tabela 15 - Estimativa de preço <i>PW</i> no Brasil.....	55
Tabela 16 - Preço banco de baterias equivalente a <i>PW</i>	56
.Tabela 17 – Valor a mais investido numa <i>HUPS</i> em relação a uma <i>UPS</i> ..	58
Tabela 18 - VPL e TIR para <i>HUPS</i> nas localidades escolhidas.....	59
Tabela 19 - Valores investidos <i>HUPS</i>	59

Tabela 20 - Diferença de preço do kWh gerado nas localidades.....	60
Tabela 21 - VPL e TIR para PW nas localidades escolhidas.....	60
Tabela 22 - Resumo dos resultados	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATM	<i>Automated Teller Machine</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CERAL	Cooperativa de Eletrificação Rural de Araruama
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CRESES	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salva Brito
CTAE	Serviço Técnico de Conversão, Transformação e Acumulação de energia
DC	<i>Direct Current</i>
ENEL	<i>Ente Nazionale per l'Energia Elettrica</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EUA	Estados Unidos da América
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
HSP	Horas de Sol Pleno
HUPS	<i>Hybrid Uninterruptible Power Supply</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.
IEA	<i>International Energy Agency</i>

<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IEE-USP</i>	Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo
<i>IGM</i>	Índice Geral de Preços do Mercado
<i>IHM</i>	Interface Homem Máquina
<i>IP</i>	<i>Ingress Protection</i>
<i>LCD</i>	<i>Liquid Crystal Display</i>
<i>LED</i>	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>LSF</i>	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos
<i>MPPT</i>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<i>NiCd</i>	Níquel Cádmio
<i>NiMH</i>	Níquel Metal Hidreto
<i>PA</i>	Pará
<i>PASEP</i>	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
<i>PIS</i>	Programa de Integração Social
<i>PW</i>	<i>Power Wall</i>
<i>REN</i>	Resolução Normativa
<i>RJ</i>	Rio de Janeiro
<i>SP</i>	São Paulo
<i>TE</i>	Tarifa de Energia
<i>TIR</i>	Taxa Interna de Retorno
<i>TMA</i>	Taxa Mínima de Atratividade
<i>TUSD</i>	Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição

UPS *Uninterruptible Power Supply*

VPL Valor Presente Líquido

VRLA Valve Regulated Lead Acid

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	celsius
A	ampères
Ah	ampère-hora
GW	gigawatt
Hz	hertz
kg	quilograma
ktoe	quilotonelada equivalente de petróleo
kW	quilowatt
kWh	quilowatt-hora
kWh/m ²	quilowatt-hora por metro quadrado
m ²	metro quadrado
mm	milímetro
MW	megawatt
MWh	megawatt-hora
R\$	reais do Brasil
US\$	dólares dos Estados Unidos da America
V	volts
W/m ²	watt por metro quadrado
W _p	watt de pico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1.	Contextualização e motivação.....	18
1.2.	Objetivo	21
1.3.	Metodologia.....	22
1.4.	Estrutura do trabalho	23
2.	ESTADO DA ARTE	25
2.1.	Sistemas de armazenamento de energia e aplicações	25
2.2.	Sistemas de armazenamento de energia para proteção de cargas (UPS).....	26
2.2.1.	UPS Off-line	27
2.2.2.	<i>UPS</i> line interactive	29
2.2.3.	UPS On-line	30
2.3.	Sistemas de armazenamento de energia fotovoltaicos tradicionais ...	31
2.3.1.	Baterias de Chumbo Ácido.....	32
2.3.2.	Baterias de NiCd(Níquel Cádmio) e NiMH(Níquel Metal Hidreto) ...	33
2.4.	Sistemas de compensação de consumo energético (Net Metering) ..	34
3.	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	37
3.1.	Sistemas de armazenamento de energia híbrido-solar	37
3.2.	Sistemas híbridos de armazenamento de energia como alternativa para a economia de energia.....	37
3.2.1.	A <i>HUPS</i>	37
3.3.	Sistemas híbridos de armazenamento de energia como alternativa para a reposição de perdas nos subsídios a alternativa 5.....	41
3.3.1.	A Bateria <i>Power Wall</i> da Tesla.....	41
3.3.2.	Características <i>PW</i>	42
3.4.	Avaliação da aplicação da <i>HUPS</i> e da bateria <i>PW</i>	43
3.5.	Avaliação da capacidade solarimétrica nos municípios escolhidos....	44

3.6. Avaliação tarifária dos Municípios escolhidos	49
3.6.1. Pratica de Net Metering na Alternativa 0 para as localidades escolhidas	49
3.6.2. Pratica de <i>Net Metering</i> na Alternativa 5 para as localidades escolhidas	51
4. RESULTADOS	53
4.1. Estimativa de energia economizada pelo HUSP frente a um UPS tradicional	53
4.1.1. Estimativa de preço de uma <i>HUSP</i> e painéis solares	53
4.2 Estimativa de Energia armazenada ao longo da vida útil da <i>PW</i>	54
4.2.1. Estimativa de preço da <i>PW</i> no Brasil	55
4.3. Estimativa de preço de um banco de baterias comum para um sistema fotovoltaico equivalente a <i>PW</i>	55
5. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS	57
5.1. Comparações econômicas	57
5.2. Estimativas econômicas para a <i>HUPS</i>	58
5.3. Estimativas econômicas para a bateria <i>PW</i>	59
6. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APENDICE	67
ANEXOS.....	71
ANEXO A – <i>Datasheet</i> painel solar	71
ANEXO B – <i>Datasheet Power Wall</i>	72

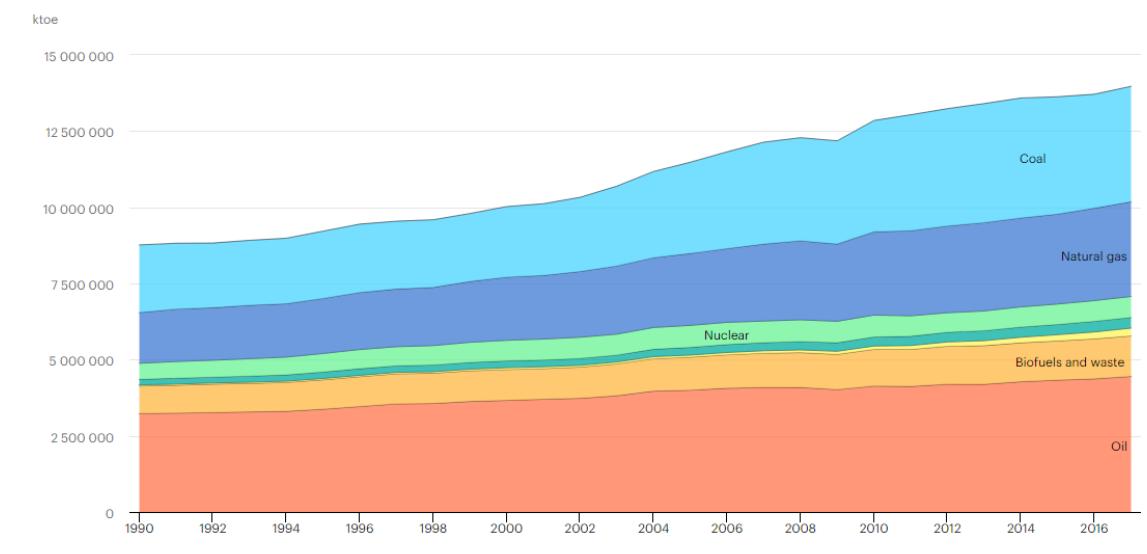
1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e motivação

Atualmente, ou seja, na segunda década do século XXI, muito se discute no mundo sobre a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a penetração das energias renováveis no cenário geral energético de todas as nações, tais motivações ocorrem não só pelo cenário de possível escassez total de tais combustíveis como pela necessidade da redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Segundo a *International Energy Agency (IEA)* o mundo consumiu em 2017 cerca de 34% de sua energia oriunda do petróleo, 24% do carvão, 21% do gás natural, 5% nuclear sendo o restante de biocombustíveis, resíduos, hidráulica e renováveis. A figura 1 ilustra o consumo energético mundial entre 1990 e 2017.¹

Figura 1 - Consumo energético mundial 1990 – 2017 em (ktoe).



Fonte: (IEA, 2019).

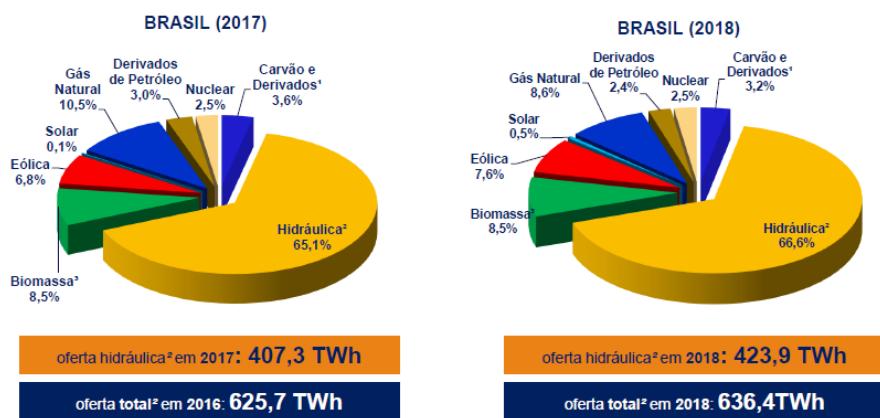
No Brasil ocorre uma situação peculiar em relação à média mundial, onde a penetração de renováveis na matriz energética tem uma participação muito mais

¹ A unidade (toe) significa tonelada equivalente de petróleo onde 1 toe é aproximadamente 11,63 MWh, uma unidade de medida de energia.

significativa, sendo segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2017/2018 tal participação foi composta por 12% oriunda de energia hidráulica, 17,5% de origem de derivados de cana e 5,9% de lixivia e outras renováveis, dando destaque para as não renováveis como o petróleo compor 36,4%, gás natural 13% e carvão 5,7% com o restante pertencendo a energia nuclear e outras não renováveis.

No que se refere à produção de energia elétrica, obteve-se a seguinte participação por fontes para o ano de 2017 e 2018, conforme ilustra a figura 2.

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira 2019.



Fonte: (EPE, 2019).

Para contextualizar a diversidade da matriz energética brasileira em relação à geração de energia elétrica hoje é preciso olhar para o passado, mais precisamente para o “apagão” que houve no ano de 2001 a nível nacional e que levou o governo federal a adotar medidas para evitar que novos apagões viessem a ocorrer, tais medidas que podem ser citadas desde então foram: a construção de usinas termelétricas, os programas de eficiência energética e os incentivos as diversas modalidades de geração de energia.

Os programas de eficiência energética passaram a exigir para alguns equipamentos fabricados no país a etiquetagem compulsória dos mesmos que passaram a ser avaliados segundo o seu desempenho energético. A ideia é que equipamentos mais eficientes contribuem para a redução do consumo de energia e

desta forma é possível poupar investimentos na construção de novas usinas, assim postergando recursos financeiros e naturais. Um exemplo de sucesso citado é o caso dos motores elétricos trifásicos de indução tipo gaiola de esquilo que através do Decreto de nº 4.508 de 11 de dezembro de 2002, foram enquadrados no programa do governo federal que determinava os níveis mínimos de eficiência energética para que estes equipamentos fossem comercializados no Brasil. A Portaria nº 553/2005 e a Portaria nº 1/2017 avançaram sobre os níveis de exigência para tais motores (SOUZA, 2018). Os motores elétricos de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, são os motores mais utilizados no mundo. No Brasil aproximadamente 26% da energia elétrica total produzida no país é consumida por motores elétricos. Ou seja, o equivalente a alimentar 4,47 milhões de lares no Brasil ao longo de um ano (WEG, 2019). Segundo (SOUZA, op. cit., p. 8) é possível observar ganhos acima de 10% de eficiência entre motores produzidos em 1946 em relação a motores produzidos em 2016.

Em relação aos incentivos as novas modalidades de geração, podemos citar como marco inicial a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 que pode ser considerada como o início da geração distribuída (GD). Tal tipo de geração consiste em ser descentralizada, ou seja, não despachada via comando central como corre com as grandes usinas de geração de energia tradicionais além de serem próximas aos centros de carga e usarem fontes renováveis. Uma modalidade peculiar que está sendo disseminada e já é mais madura nos países desenvolvidos é a micro e mini GD sendo um exemplo mais simples deste tipo de geração, uma residência com alguns painéis solares fotovoltaicos no telhado gerando energia elétrica para consumo próprio e injetando o excedente energético na rede, onde posteriormente o seu consumo é descontado de sua geração sendo o excedente convertido em algum tipo de crédito, modalidade conhecida como *net metering*. A REN nº 687/2015 regulamentou tal prática definindo limites de potência, tipos de fontes e modalidades. Como exemplo, a REN nº 687 possibilitou uma associação de moradores de um condomínio construir uma pequena usina solar fotovoltaica numa localidade distinta de onde residem e compensar energia onde moram desde que a usina e o consumo estejam sob a mesma distribuidora de energia.

A prática do *net metering* foi iniciada com uma série de incentivos tributários por parte do governo, mas devido à configuração de subsídio cruzado com usuários

da rede elétrica não praticantes de *net metering*, o cenário desta prática está ameaçado por perdas financeiras e mudanças na recuperação do investimento para os geradores.

1.2. Objetivo

Dentro do contexto de necessidade de ganhos de eficiência energética por equipamentos diversos, tal como citado no caso do motor elétrico e devido ao cenário de redução de incentivos tributários para a prática de *net metering*, este trabalho tem como motivação fazer um estudo de desempenho energético e viabilidade econômica do uso de dois equipamentos que usam energia fotovoltaica e carregamento híbrido, sendo parte convencional ou da rede e parte oriunda de painéis fotovoltaicos.

O primeiro equipamento estudado é uma *Hybrid Uninterruptible Power Supply (HUPS)* ou fonte de alimentação ininterrupta híbrida onde é usada a energia oriunda de painéis solares fotovoltaicos para fornecer alimentação para a carga, tendo a rede convencional como segunda opção e complementação para dias de baixa luminosidade solar, além de em caso de cessão do fornecimento de energia por parte dos painéis e da rede, tal equipamento possui ainda um banco de baterias como terceira opção. As *Uninterruptible Power Supply (UPS)* popularmente conhecidas como “*No-Break*” possuem larga aplicação que vão desde residências, área médica, área militar, transportes, indústria, bancos, etc.

O segundo equipamento estudado é a bateria do fabricante *Tesla Inc.* denominada *Power Wall (PW)*, tal equipamento concebido inicialmente para o carregamento de carros elétricos do mesmo fabricante, pode ter aplicação residencial como via de armazenamento de energia para posterior consumo, seu diferencial em relação a outras baterias comumente aplicadas a sistemas fotovoltaicos são referentes à sua vida útil, tamanho, preço e possibilidade de programação, controle e acompanhamento remoto.

O que motiva a ideia de desenvolver este trabalho é que estes equipamentos poderão ter amplo uso num futuro próximo, ideia fundamentada principalmente pela questão econômica. Informações em relação ao desempenho deles poderão contribuir para a tomada de decisões na escolha de um deles. A

HUPS analisada possui 3 kW de potência e foi dimensionada de forma que um número mínimo de painéis fotovoltaicos de um modelo escolhido possa suprir sua potência nominal. A vida útil da *HUPSP* foi considerada igual à vida útil de uma *UPS* comum que para tais características possui cerca de dez anos (informação pessoal)². Na prática é mais comum *UPS's* alimentarem *ATM* (*Automated Teller Machine*), equipamentos eletro-médicos, rede semafórica, equipamentos de telecomunicações, instalações militares, computadores etc.

A *HUPS* é da marca *PNE INNOTECH* um fabricante sul coreano e foi testada no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP) no ano de 2018 a pedido de um interessado em revender o equipamento no Brasil. Para este trabalho o IEE-USP forneceu os dados do relatório e o manual do equipamento desde que não fossem divulgados os resultados.

A bateria *PW* do fabricante Tesla foi avaliada a partir de dados fornecidos pelo *datasheet* do fabricante tendo sua vida útil estimada em cinco mil ciclos ou quinze anos, dados baseados nos estudos de (ROSENKRANZ; KÖHLER; LISKA, 2007) sobre baterias de lítio para veículos híbridos.

1.3. Metodologia

Para os dois equipamentos são analisados os consumos respectivos de energia elétrica e a economia de energia em três localidades no país. A cidade de São Paulo, a maior cidade do país, Belém do Pará, cidade localizada no estado com a tarifa mais cara do país e Araruama no estado do Rio de Janeiro, o município com a energia elétrica mais cara do país.

No caso da *HUPS* a condição da análise considera uma aplicação onde o equipamento funciona 24 horas por dia e em tal aplicação é verificado se vale a pena investir em um conjunto composto por uma *HUPS* mais um determinado número de painéis fotovoltaicos ou manter uma *UPS* tradicional. É verificado se as economias de energia nas três localidades São Paulo-SP, Belém-PA e Araruama-RJ dão retornos satisfatórios em função do investimento no conjunto painéis fotovoltaicos mais *HUPS*.

² Informação concedida pelo especialista em *UPS* Armando Cavero Miranda em 09/09/2020.

Para o caso da bateria *PW* as condições limitantes do estudo foram: o caso de quem já possui um sistema fotovoltaico e que supre seu consumo mensal na alternativa 0³, possui limitação de área para expansão do gerador fotovoltaico através do aumento do numero de placas, além da consideração de que o consumo de energia armazenada ocorra diariamente, típico de uma família que fica fora durante o dia e consome energia a partir da tarde até meados da noite. Considerando as condições citadas é verificada viabilidade de investimento na compra de uma bateria *PW* como alternativa as perdas de valor da energia elétrica gerada pela revisão tarifária alternativa 5⁴. No caso do estudo é verificado se vale a pena armazenar energia elétrica na *PW* e consumir posteriormente ao invés de gerar para a rede convencional, prática conhecida por *net metering*. Adicionalmente é realizada uma comparação de preços com um banco de baterias tradicional para um cenário hipoteticamente distante da rede elétrica, onde não seja possível fazer o *net metering*.

O modelo de análise econômica considera que o aumento da taxa de energia elétrica seja de 3% ao ano além de que o capital empregado seja 100% próprio e que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) seja de 8%.

A taxa de importação utilizada no estudo é de 60% mais o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) no valor de 18%.

Os dados solarimétricos usados neste trabalho foram retirados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salva Brito (CRESESB).

1.4. Estrutura do trabalho

A monografia está dividida em 9 capítulos sendo esta Introdução o primeiro capítulo onde é brevemente apresentada a situação global e nacional no que se refere as questões energéticas, além de inserido o tema objeto de estudo dentro deste contexto. Ainda na Introdução temos o objetivo e a metodologia de trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas as tecnologias tradicionais não híbridas para armazenamento de energia sendo tais tecnologias correspondentes às tecnologias

³ Explicado no item 2.4.

⁴ Explicado no item 2.4.

híbridas estudadas. Dentre as tecnologias convencionais são apresentados os tipos, descritos os princípios de funcionamento e detalhadas as aplicações. Ainda neste capítulo é explicado o conceito de *net metering* e revisão tarifaria prevista para geradores de energia.

No capítulo 3 são apresentados os detalhes dos sistemas de armazenamento de energia estudados, a *HUPS* e a bateria *PW*. Detalhes técnicos e de funcionamento são apresentados, além de imagens de tais equipamentos. Ainda neste capítulo são detalhadas as características solarimétricas das localidades escolhidas além das situações tarifárias de cada localidade para a geração na situação alternativa 0 e pós revisão, na alternativa 5.

No capítulo 4 são feitas estimativas de economia energética com as tecnologias híbridas, estimativas de preços de tais tecnologias e ainda o levantamento do preço de um banco de baterias equivalente a *PW*.

No capítulo 5 são feitas comparações de ordem econômica entre as tecnologias convencionais e suas tecnologias homólogas híbridas, além da verificação da viabilidade de investimento nas tecnologias híbridas para as condições analisadas.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho com base nos resultados obtidos.

Posteriormente temos na sequência as referências bibliográficas utilizadas na construção deste trabalho, o apêndice e os anexos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Sistemas de armazenamento de energia e aplicações

Antes dos geradores elétricos existirem as baterias foram as principais fontes de eletricidade usadas, desde seu surgimento por volta do final do sec. XIX tal equipamento foi e continua sendo muito usado até hoje, além de possibilitar o surgimento de diversos dispositivos tais como: telégrafos, telefones, eletrônicos em geral, computadores portáteis, celulares, etc. Com o passar do tempo à própria bateria foi evoluindo e o surgimento de baterias recarregáveis trouxe uma ampla gama de aplicações para tal dispositivo que vão desde o seu uso nos automóveis e dispositivos portáteis até as grandes baterias estacionárias que podem ser utilizadas para armazenar grandes quantidades de energia e ajudar a estabilizar redes de energia elétrica (NEWMAX, 2020).

Assim como houve a evolução das baterias, houve também a evolução da eletrônica, está impulsionada principalmente pelo aperfeiçoamento de válvulas e transistores. Esta evolução dos equipamentos eletrônicos é a chave para o entendimento sobre a necessidade do uso de sistemas de proteção de tais equipamentos. Não se sabe ao certo quem inventou e quando começou exatamente o uso de sistemas de alimentação ininterrupta baseados no armazenamento de energia, porém sabe-se que seu uso foi inicialmente presenciado com mais intensidade nos Estados Unidos da América (EUA), nos final dos anos de 1950 como uma demanda para cargas hospitalares. Basicamente equipamentos hospitalares que não podiam ser desligados de forma alguma, mesmo com a queda do fornecimento de energia. Neste momento surgem os primeiros *UPS* que basicamente se conectavam a um banco de baterias quando o fornecimento de energia elétrica era interrompido (EMADI; NASIRI; BEKAROV, 2004).

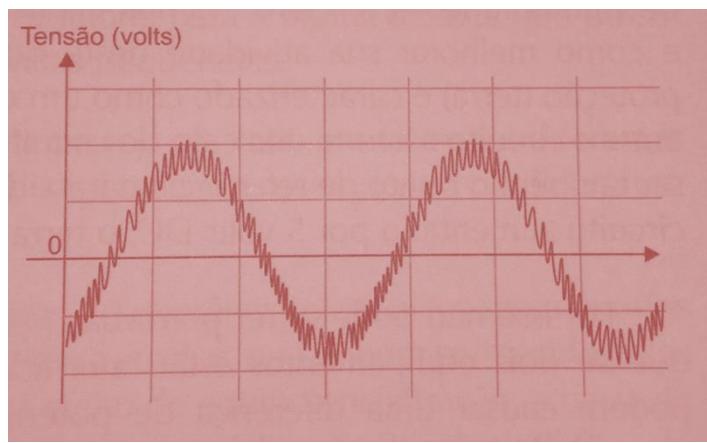
Atualmente, ou seja, na segunda década do século XXI, existem três principais aplicações para os sistemas de armazenamento de energia que são: a necessidade de proteção da carga alimentada que possui relação com a qualidade de energia que está carga consome e a segurança da rede, a necessidade de redução de custos financeiros e impossibilidade de acesso à rede elétrica tradicional. Para problemas de qualidade de energia temos a *UPS* como representante de equipamento acumulador de energia para sanar tais problemas e

por motivações econômicas e de acesso temos os bancos de baterias que quase estão sempre combinados com alguma outra fonte de energia, podendo ser, por exemplo, um moto-gerador a diesel ou placas solares fotovoltaicas.

2.2. Sistemas de armazenamento de energia para proteção de cargas (UPS).

As *UPS* possuem a função principal de proteger cargas contra malefícios oriundos da rede elétrica, tais malefícios podem ser o desligamento por determinado intervalo de tempo, um surto de sobretensão mesmo de curta duração, um afundamento de tensão de mesmo de curta duração, ruído no sinal, transientes, transitórios, harmônicos, etc. Basicamente as *UPS*'s mais modernas devem fornecer o sinal elétrico para a carga com o mínimo possível de eventos que possam vir a danificar a carga alimentada (MARTINHO, 2013). É importante destacar que o tempo de duração do fornecimento de energia da *UPS* sem a rede de alimentação tradicional é proporcional ao tamanho de seu banco de baterias, podendo ser de minutos a algumas horas.

Figura 3 - Ruído no sinal elétrico.



Fonte: (MARTINHO, 2013).

A International Electrotechnical Commission (IEC) publicou em 1999 a norma IEC 62040-3/1999 *Uninterruptible Power Systems: Method of specifying the*

performance and test requirements que reconhece três tipo de topologias para UPS's estáticas: *Off-line*, *Line Interactive* e o *On-line* ou *double conversion*. A criação desta norma foi uma demanda para a padronização de nomenclatura entre fabricantes que muitas vezes produziam o mesmo produto com nomenclaturas diferentes (GONÇALVES, 2008).

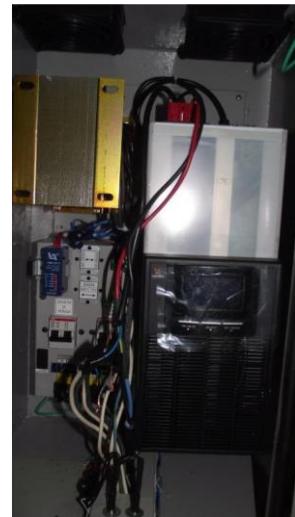
Existem ainda UPS's denominadas rotativas que trabalham com a armazenamento de energia cinética em um conjunto mecânico próprio para isso é um motor diesel, tal tipo de UPS não é analisada neste trabalho, apenas as UPS's denominadas estáticas.

2.2.1. UPS Off-line

A UPS mais simples utilizada, basicamente a de topologia mais básica e que foram as primeiras ensaiadas no IEE-USP ainda na década de 1990⁵, foram as UPS denominadas “*off-line* onda quadrada”, tais UPS's consistem basicamente em um retificador, ou seja, um circuito que converte a tensão que alimenta a UPS de *Alternating Current (AC)* em *Direct Current (DC)*, um banco de baterias e um inversor que faz a conversão inversa de DC para AC, todos estes elementos estão interligados. Enquanto a carga é alimentada pela rede ela fica com o sinal senoidal oriundo de um ramo denominado *by-pass*, enquanto o retificador alimenta o banco de baterias. Quando ocorre a falta de energia é feito o chaveamento para o conjunto inversor-bateria. O inversor usa alimentação em DC oriunda do banco de baterias, este possui um sistema de chaveamento do tipo liga-desliga e de forma constante, chaveando o sinal DC ele produz um sinal de onda quadrada (AHMED, 2000). Tal UPS ainda é comercializado e serve para aplicações onde o sinal de saída não exige muita qualidade por parte da carga, por exemplo, em cargas resistivas ou semáforos.

⁵ Informação obtida com os técnicos do laboratório de ensaios de UPS's.

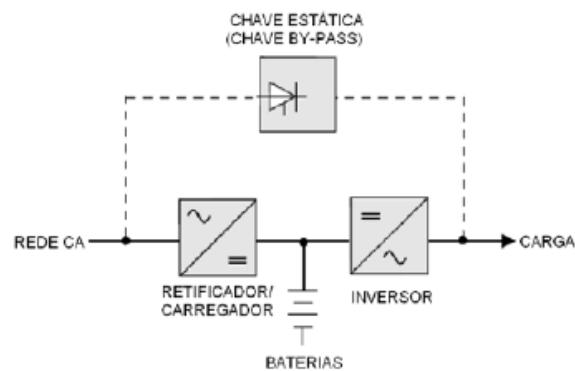
Figura 4 - UPS semafórica internamente.



Fonte: Própria do autor.

Na sequência evolutiva das *UPS's off-line* temos um tipo de *UPS* que “filtra” o sinal de onda quadrada obtido pelo chaveamento do sinal *DC*, para convertê-lo em um sinal bem próximo de um sinal 100% senoidal, o restante de seu funcionamento é idêntico, o *UPS* é denominado *UPS off-line* ou *passive stand-by*. Seu esquema de funcionamento é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de blocos *UPS off-line*.



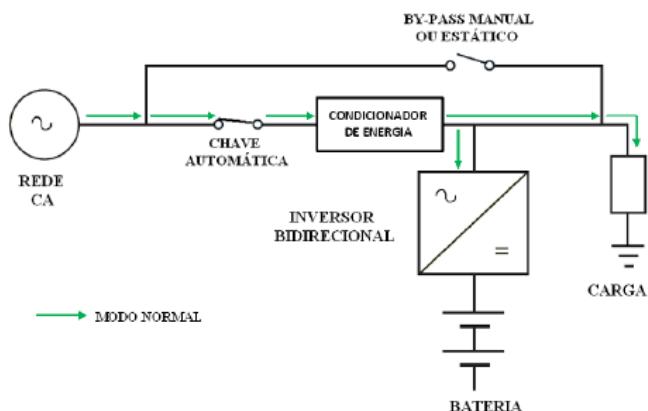
Fonte: (GONÇALVES, 2008).

Este tipo de *UPS* possui elevado rendimento por basicamente usar somente o retificador para carregar o banco de baterias e após isso desliga-lo, porém possui pobre regulação de tensão na carga, possibilidade de injeção de impurezas do sinal oriundo da rede e tempo de transferência entre a rede e o banco de baterias, o que significa que oferece algum risco para certos tipos de cargas (KARVE, 2000).

2.2.2. UPS line interactive

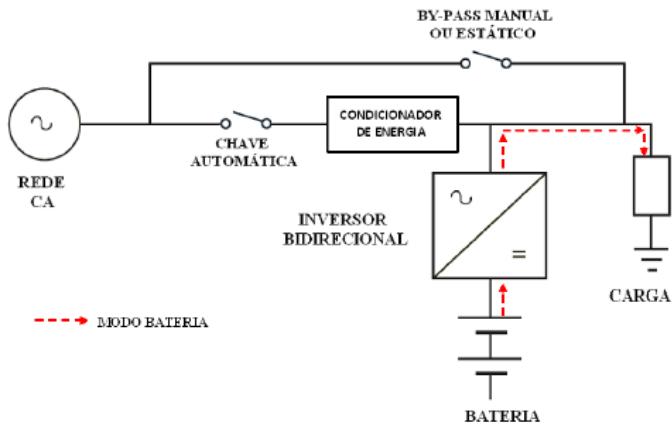
Surgido nos anos 90 este *UPS* que pode ser considerado como uma leve evolução em relação ao *UPS off-line* graças ao desenvolvimento do inversor bidirecional que atua tanto como retificador como inversor (conversor de sinal DC em AC), tal inversor proporciona o uso de um condicionador de energia que proporciona uma melhor regulação do sinal de saída ao contrário do que ocorre com o sinal da *UPS off-line* que não possui nenhum tipo de proteção contra surtos oriundos da rede. Este tipo de *UPS* apresenta ainda algum problema em relação aos distúrbios oriundos da rede, na mudança da própria rede para o modo bateria é gerado um transitório, assim como do ramo de *by-pass*, porém há um ganho de regulação da tensão e tempo de transferência menor entre a rede e a bateria (Ibid., p. 27-31).

Figura 6 - Diagrama de blocos *UPS line-interactive*.



Fonte: (GONÇALVES, 2008).

Figura 7 - Diagrama de blocos *UPS line interactive modo bateria*.

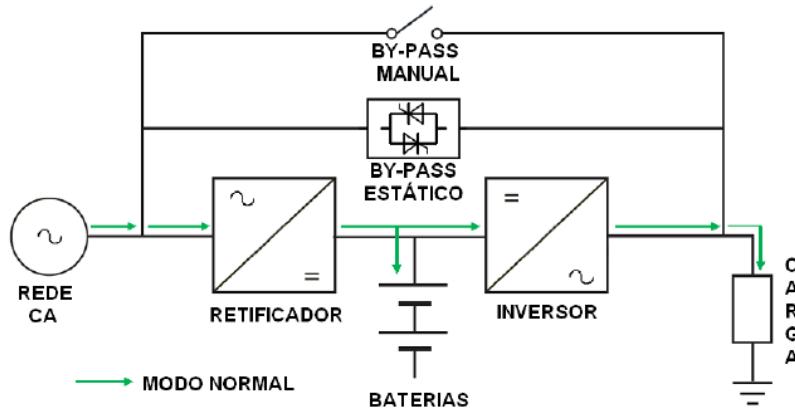


Fonte: (GONÇALVES, 2008).

2.2.3. UPS On-line

Esta topologia também conhecida como dupla conversão é caracterizada por converter duas vezes o sinal elétrico oriundo da rede, a primeira conversão é feita no retificador de AC para DC e serve para alimentar o banco de baterias e o inversor simultaneamente, que faz a segunda conversão DC para AC, o inversor fica constantemente ligado, sem interrupção e quando a energia é cessada pelo retificador a bateria entra em ação para alimentá-lo. Neste tipo de UPS a saída não sofre com qualquer tipo de problema de surto de entrada, pois o sinal de saída sempre será dependente do inversor micro controlado que é alimentado por sinal DC constante, ora do retificador, ora da bateria. Ainda é possível usar uma chave para fazer um *by-pass* no circuito da máquina, geralmente para manutenção (Ibid.,p. 27-31).

Figura 8 - Diagrama de blocos UPS on-line modo normal.



Fonte: (GONÇALVES, 2008).

Este tipo de máquina é o mais indicado para cargas sensíveis a surtos elétricos e também é a mais cara de todas.

2.3. Sistemas de armazenamento de energia fotovoltaicos tradicionais

Os sistemas de armazenamento de energia ou isolados fotovoltaicos servem para alimentar locais que não dispõe de rede elétrica tais como zonas rurais, zonas de praia, ilhas, sinalização de estradas, etc. Tais sistemas muitas vezes recebem a complementação de outras fontes de energia muito comumente um gerador a óleo diesel e podem ser de grande porte como, por exemplo, para suprir energeticamente uma fazenda ou de pequeno porte para, por exemplo, suprir energeticamente uma casa.

Estes sistemas estão integrados com um arranjo fotovoltaico e um controlador de carga. Sendo o módulo o fornecedor de energia e o controlador de carga o responsável pela regulação e proteção do sistema de armazenamento de energia. Tais sistemas nada mais são que um banco de baterias interligadas que recebem energia e descarregam, repetindo este ciclo de carga e descarga até o fim de sua vida útil. As baterias mais usadas em sistemas de armazenamento de energia isolados são as baterias de chumbo ácido devido principalmente ao seu custo, uma alternativa a tais baterias são as baterias de Níquel Cádmio (NiCd) e

Níquel Metal Hidreto (NiMH) que possuem vida útil maior e são mais caras. (VILLALVA,2012).

Figura 9 - Sistema de armazenamento de energia isolado ou off-grid.



Fonte: (ECOMAIS, 2020).⁶

2.3.1. Baterias de Chumbo Ácido

As baterias de chumbo ácido são as baterias mais conhecidas utilizadas, as populares baterias encontradas nos carros comuns movidos a motores de combustão interna, tais baterias podem ser de ácido líquido ou gel, selada ou aberta. As baterias usadas em carros diferem daquelas baterias para aplicações fotovoltaicas, isto porque as baterias para carro possuem a característica de fornecer altas correntes durante curtos intervalos de tempo, tal situação ocorre na partida dos carros enquanto as baterias usadas em sistemas fotovoltaicos fornecem certo nível de corrente durante períodos de tempo constantes. Isto ocorre porque a bateria automotiva possui placas finas de chumbo com grande área de superfície mergulhadas no ácido eletrólito, isto lhe confere um bom desempenho em reações químicas rápidas, porém para o uso destas placas em situações distintas as placas finas se deterioram rapidamente. Contudo uma bateria automotiva se descarrega geralmente 20% durante o seu uso normal enquanto as baterias de sistemas fotovoltaicos descarregam entre 50% a 80% de sua capacidade. As baterias para aplicações em descargas sustentadas, como em um sistema solar fotovoltaico são

⁶ Imagem disponível em: <http://www.ecomais.ind.br/energia-solar>, acesso em 22/09/20.

denominadas baterias estacionárias, que levam este nome, pois devem trabalhar totalmente paradas, diferente das baterias automotivas.

As baterias estacionárias podem ser de eletrólito em líquido ou em gel, sendo que a versão em gel é considerada uma versão melhorada da bateria com eletrólito líquido, pois possui maior vida útil, um maior ciclo de carga e descarga e ainda pode ser usada em locais pouco ventilados. A bateria estacionária com eletrólito em gel possui uma válvula de segurança para a liberação de gases que possam ser gerados em condições de sobrecarga da mesma, devido a está a presença desta válvula ela é conhecida como *Valve Regulated Lead Acid (VRLA)*(Ibid.,p. 181).

Figura 10 - Bateria chumbo ácido VRLA.



Fonte: (MEGATECENERGIA, 2020).⁷

2.3.2. Baterias de NiCd (Níquel Cádmio) e NiMH (Níquel Metal Hidreto)

Estas baterias são mais caras que as baterias de chumbo ácido, possuem densidade de carga maior, o que significa um menor tamanho para um mesmo nível de energia fornecido, suportam uma variação de temperatura maior, permitem descargas mais profundas de cerca de 90% da capacidade da bateria e requerem

⁷ Imagem disponível em: <https://www.megatecnergia.com.br/baterias/seladas>, acesso em 22/08/2020.

pouca manutenção. Geralmente não são usadas em aplicações solar fotovoltaica exceto em situações muito específicas. (*Ibid.*, p. 188).

2.4. Sistemas de compensação de consumo energético (Net Metering)

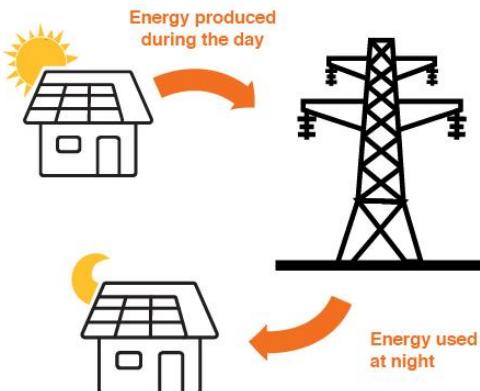
Existem sistemas de geração de energia elétrica denominados de GD, tal geração se caracteriza por ser geralmente próxima ao local de consumo, de menor porte que a geração tradicional, de energia renovável e descentralizada, ou seja, não possui controle de despacho de energia feito por uma entidade, comumente governamental. A REN nº 687/2015 caracteriza a microgeração distribuída como potência instalada menor ou igual a 75 kW e a minigeração com potência instalada superior a 75 kW até 3 MW para fontes hídricas e 5 MW para as demais fontes. Tal revisão possibilitou ainda o enquadramento de outras modalidades de consumo como a geração e consumo em locais diferentes e a GD para condomínios.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)⁸ em 2019 tivemos 154,4 mil unidades consumidoras com GD sendo 82,6 mil de geração fotovoltaicas o que corresponde a 870 MW de capacidade, deste percentual a maior parte corresponde a microgeração, que pode ser imaginada como um arranjo de painéis fotovoltaicos em um telhado numa residência gerando energia como o exemplo mais básico.

A motivação maior para o uso de um sistema de geração de energia em uma residência é a prática do *net metering*, tal prática, já adotada em muitos países consiste em possuir um medidor eletrônico bidirecional, ou seja, que mede o fluxo de potência que entra e que sai da unidade de consumo, assim é possível produzir energia para exportar para a rede elétrica para posterior consumo. Pode-se entender a rede como uma bateria virtual que, por exemplo, recebe energia durante o dia quando existe sol e os moradores da residência estão fora e que devolve esta energia na parte da noite, quando existe o consumo devido ao retorno dos moradores ao lar. Caso haja déficit entre os fluxos de energia só a diferença é cobrada, caso haja crédito de energia entre consumo e exportação, tal excedente deve ser consumido em algum período de tempo.

⁸ Adaptado da publicação retrospectiva ANEEL 2019, p. 8 e p.31.

Figura 11 - Conceito de *net metering*.



Fonte: (GOSUNPRO, 2020).⁹

No Brasil a prática de *net metering* foi caracterizada em pela REN nº482/2012 que previa uma série de incentivos tributários para a energia gerada, o que inicialmente fomentou o mercado solar fotovoltaico para microgeração, porém diversas alterações na lei reduziram os incentivos iniciais e o cenário futuro é de grande incerteza na remuneração da energia gerada com uma proposta que compromete cerca de 60% do valor de crédito auferido em relação a lei inicial de 2012.

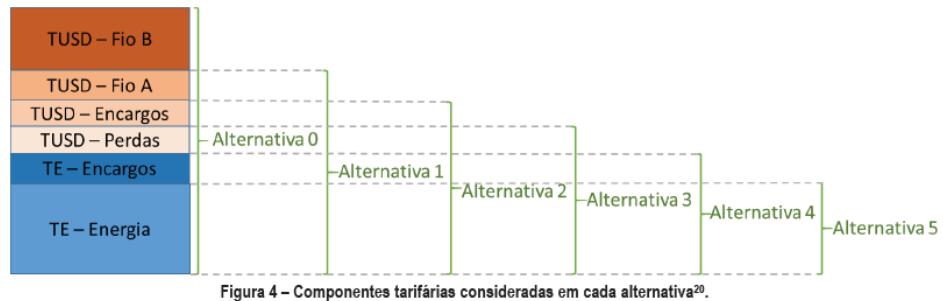
Na data da publicação da lei em 2012 foi estabelecido que todo a geração de energia deveria ser compensada pela energia consumida, porém assim como em diversos países tal fato iria perdurar por um período e que os incentivos foram apenas para incentivar o desenvolvimento do setor. Diversas alternativas para revisão da REN nº482/2012 no que se refere a parte de tributos estão sendo discutidas atualmente, (ano 2020) entre os atores envolvidos e as seguintes propostas foram apresentadas:

- Alternativa 0 a energia gerada compensa a Tarifa de Energia (TE), TE encargos + Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição Perdas (TUSD) + TUSD Encargos + TUSD Fio A e Fio B.
- Alternativa 1 a energia gerada compensa a TE + TE encargos + TUSD Perdas+ TUSD Encargos + TUSD Fio A.

⁹ Imagem disponível em: <https://www.gosunpro.com/home-solar>, acesso em 22/08/2020.

- Alternativa 2 a energia gerada compensa a TE + TE encargos + TUSD Perdas + TUSD Encargos.
- Alternativa 3 a energia gerada compensa a TE + TE encargos + TUSD Perdas.
- Alternativa 4 a energia gerada compensa a TE + TE encargos.
- Alternativa 5 a energia gerada compensa apenas a TE (ANEEL,2018).

Figura 12 - Revisão de incentivos a GD.



Fonte: (ANEEL, 2018).

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1. Sistemas de armazenamento de energia híbrido-solar

Os sistemas de armazenamento de energia com tecnologia híbrida que estão sendo comparados aos sistemas tradicionais tiveram seus dados coletados de maneira distinta, sendo no caso da *HUPS* a extração de tais dados, feita através da análise do relatório de ensaio da *HUPS* testada no Serviço Técnico de Conversão, Transformação e Acumulação de Energia (CTAE) e no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) ambos do IEE-USP que possui certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para testes em UPS's. Para as baterias *PW* e *PW2* a coleta de dados foi feita nos manuais e *datasheets*, das baterias. Tais procedimentos forneceram dados para responder a perguntas sobre desempenho e economia das tecnologias híbridas frente as tradicionais.

3.2. Sistemas híbridos de armazenamento de energia como alternativa para a economia de energia.

Nas grandes cidades é cada vez mais comum observar carros híbridos trafegando pelas ruas e apesar do elevado investimento inicial na aquisição de um modelo muitas pessoas preferem esperar o retorno investido, a perder mais dinheiro com combustível. Para aplicações que demandem segurança no fornecimento de energia a prática de juntar tecnologias distintas e tornar híbrida ganha cada vez mais espaço e assim como um carro híbrido a *HUPS* pode ser um investimento interessante para quem necessita de uma *UPS* e dispõe de um valor maior para investir para posteriormente economizar.

3.2.1. A *HUPS*

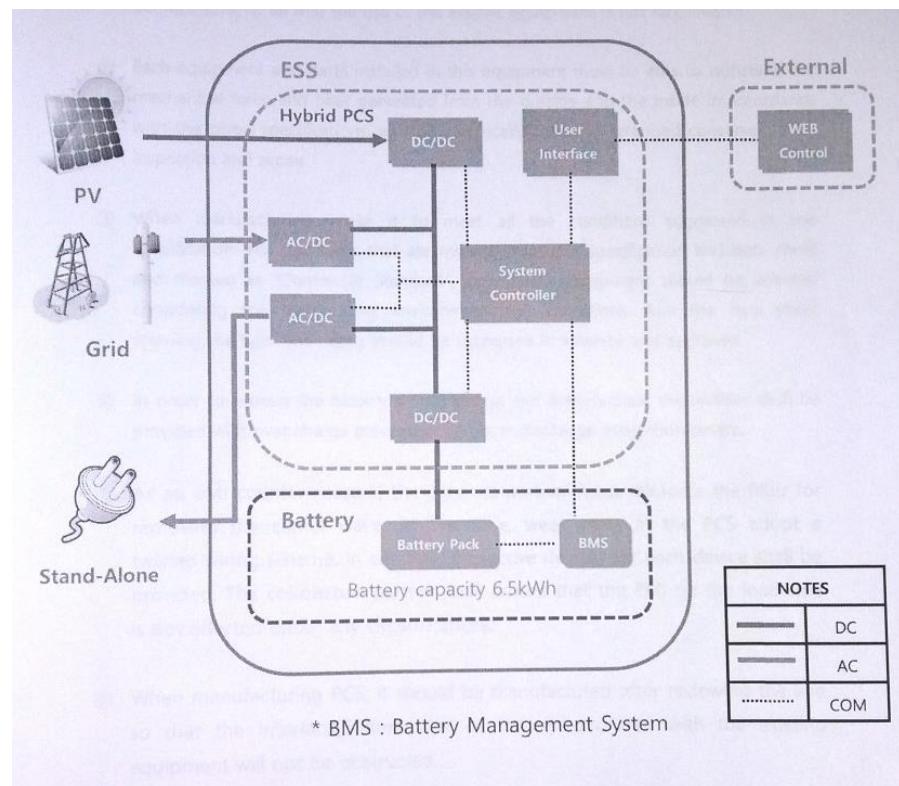
A *UPS* híbrida ou *HUPS* foi testada no IEE-USP no mês de novembro de 2018, a pedido de um interessado em importar e comercializar o equipamento no Brasil conforme citado pelos trabalhadores do laboratório de ensaios. A máquina de origem sul coreana possui os seguintes dados:

- 3kW de potência (bifásico).

- Tensão de entrada dos painéis fotovoltaicos 168 VDC ~ 378 VDC
- Tensão de entrada do banco de baterias 48 VDC ~ 58,5 VDC
- Tensão de entrada da rede de 220 VAC +10%; -12% 60 Hz
- Saída 220 VAC
- Autonomia do banco de baterias interno de 12 minutos com 3 kW.

O nome comercial do equipamento no manual do fabricante é *Energy Storage System (ESS)*. O manual do equipamento foi fornecido para consulta por cordialidade do CTAE. O seu diagrama de blocos é representado da seguinte maneira:

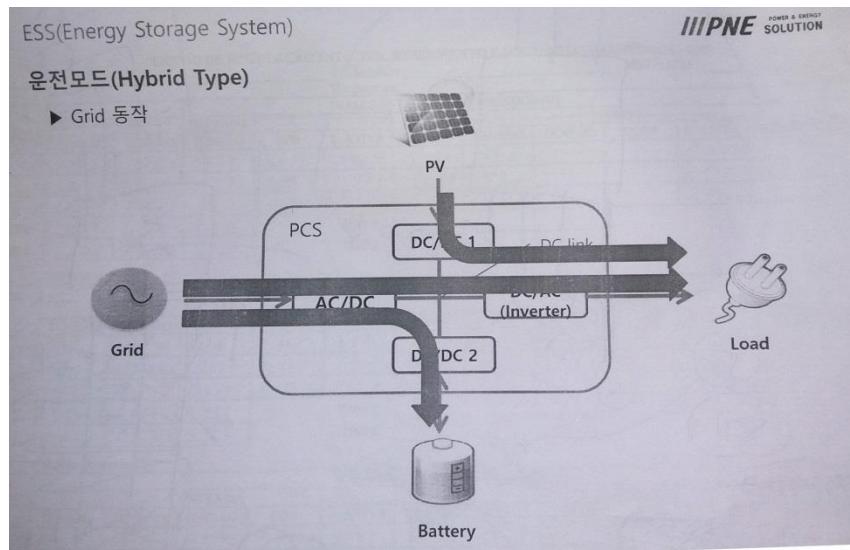
Figura 13 - Diagrama de blocos HUPS/ESS.



Fonte: (PNE INNOTECH, 2018).

Outras informações do equipamento: *IP20*; temperatura de trabalho - 10°C~40°C; tipo *On-line*; tela *LCD*; ventilação forçada; possibilidade de comunicação remota via ethernet; sistemas de fusíveis de proteção interna para rede fotovoltaica; rede tradicional e banco de baterias; C = 820mm; L=150 mm; H=115 mm; peso de 100 kg (50 kg *ESS* e 50 kg baterias). Na incapacidade do fornecimento total de energia da *HUPS* a rede elétrica complementa o fornecimento, conforme ilustra a figura 14 retirada do manual do fabricante.

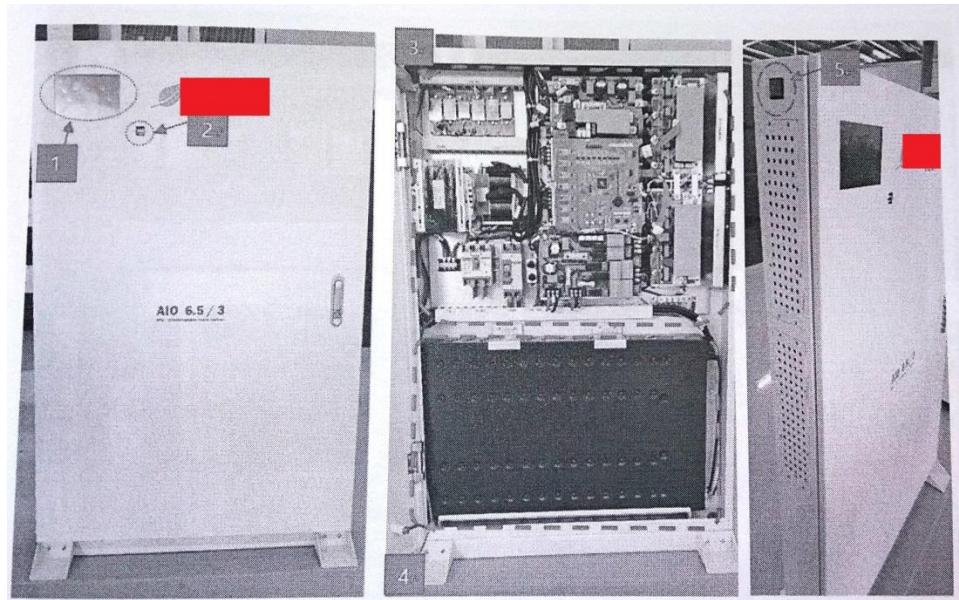
Figura 14 - Funcionamento *HUPS*.



Fonte: (PNE INNOTECH, 2018).

A foto abaixo retrata a *UPS* híbrida frontalmente de maneira fechada na primeira imagem da esquerda, na imagem central a *HUPS* está aberta com o banco de baterias localizado na parte inferior em preto e na direita uma foto lateral sendo o nome do pretendente a representante comercial preservado nas imagens.

Figura 15 - *HUPS* vista: frontal, aberta e lateral.



Fonte: (PNE INNOTECH, 2018).

A *UPS* híbrida possui ainda uma interface interativa por onde é possível acompanhar algumas grandezas elétricas. A foto abaixo retrata a interface central da *UPS* híbrida.

Figura 16 - Imagem central da tela de interface homem máquina (IHM) da *HUPS*.



Fonte: (PNE INNOTECH, 2018).

3.3. Sistemas híbridos de armazenamento de energia como alternativa para a reposição de perdas nos subsídios a alternativa 5.

Conforme observado no relatório de revisão de impacto das regras aplicáveis a micro e minigeração distribuída da ANEEL 2018, os países que adotaram a prática de *net metering*, mais cedo ou mais tarde tiveram que fazer a revisão tarifária de incentivos tributários e este fato certamente se mostra como um grande inibidor para pequenos investidores, ou seja, aqueles que investem para compensar o consumo próprio, tal como o consumo de uma residência ou pequeno comércio.

No Brasil capacidade instalada de 5,9 GW para GD foi definida como gatilho para a implementação da alternativa 5 e como consequência desta decisão houve uma manifestação contrária de diversos atores da GD tais como: fabricantes, geradores-usuários, projetistas e comercializadores o que levou a ANEEL a propor 8 GW como gatilho. A implementação da alternativa ainda não está definida tendo o segundo gatilho como sendo a chegada do ano de 2030.

Considerando a implementação da alternativa 5 como muito provável em função da observação da experiência internacional, talvez a aplicação de uma bateria híbrida de grande capacidade possa ser atrrente para quem não quer perder dinheiro na energia gerada.

3.3.1. A Bateria Power Wall da Tesla

A bateria PW da fabricante *Tesla Incorporated*. é uma bateria recarregável de íons de lítio que atualmente esta na segunda versão, sendo a primeira lançada no ano de 2015 e a segunda em Outubro de 2016. Tal bateria concebida inicialmente para carros pode ser usada como uma bateria doméstica que armazena energia durante o dia para ser consumida durante a noite ou segundo a vontade do usuário.

3.3.2. Características PW

A primeira versão da *PW* foi lançada ao preço de US\$ 3.000 e tem uma capacidade de armazenamento de 6,4 kWh de energia com possibilidade de fornecimento contínuo de 3,3 kW de energia, possibilidade de ciclos de carga e descarga ilimitados desde que de origem do painéis solares, além de controle remoto por celular via aplicativo e detecção de falta de energia com acionamento instantâneo. O *datasheet* do equipamento com todas as suas informações técnicas está anexado ao final do trabalho.

A segunda versão da *PW* ou *PW2*, lançada inicialmente ao preço de US\$ 5.500 e posteriormente US\$ 6.500 teve seu *design* alterado para um formato retangular, a adição de uma barra de *Light Emitting Diode (LED)* verde em sua lateral de forma vertical para indicar seu nível de carga, além de características melhoradas tais como possibilidade de armazenamento de 13,5 kWh e fornecimento contínuo de 5 kW.

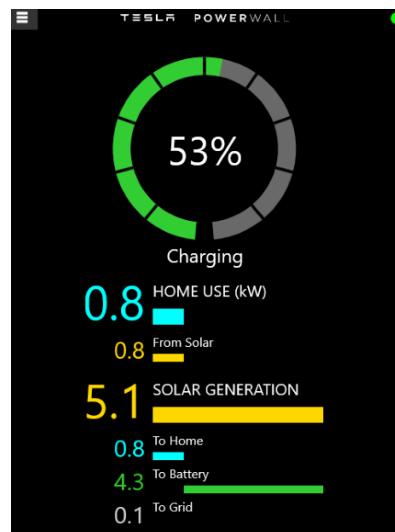
Figura 17 - Bateria *PW2* instalada.



Fonte: (LIGHTWAVESOLAR, 2020).

Pelo fato da segunda versão da bateria ter aumentado sua capacidade de armazenamento de energia seu peso e tamanho foram aumentados, desta vez para 114 kg e 1150 mm x 755 mm x 147 mm. As duas baterias possuem 10 anos de garantia com a advertência do fabricante de que ao final de 10 anos a bateria chega a 70% da sua capacidade inicial de carga.

Figura 18 - Imagem aplicativo PW2.



Fonte: (TESLA, 2020).

3.4. Avaliação da aplicação da HUPS e da bateria PW

Para analisar o desempenho da *HUPS* e da bateria *PW* é importante destacar que ambas possuem aplicações distintas, mesmo a *HUPS* podendo ser adaptada para trabalhar como a *PW*, a *HUPS* é analisada para uma aplicação em relação a uma *UPS* tradicional, ligada 24 horas por dia com carga total, sendo que a *HUPS* possui um número mínimo de painéis solares de um modelo adotado que equivale ao suprimento de sua potência nominal na maior parte do tempo. São feitas análises para as localidades escolhidas de São Paulo capital, a maior cidade do Brasil, Belém do Pará a cidade localizada no estado com a energia mais cara do Brasil em agosto de 2020 e Araruama no estado do Rio de Janeiro, sendo a cidade com a energia mais cara do Brasil em agosto de 2020, o modelo tarifário analisado é o do tipo comercial.

Em relação à *PW* conforme já citado anteriormente, os créditos auferidos pelos kWh injetados na rede da concessionária estão com os dias contados para desvalorizar em relação ao que foi no passado e para termos uma ideia da intensidade desta desvalorização é preciso quantificar as perdas e para isso adotamos os mesmos três casos para análise, um em São Paulo capital que é a maior cidade do país, um em Belém do Pará que é a cidade com a energia mais cara do país e um em Araruama no estado do Rio de Janeiro que é o município com a energia mais cara do país. É verificado se o montante perdido com esta situação pode ser compensado com o uso da *PW* para armazenamento da energia e posterior consumo, a limitação da análise exige que a energia armazenada seja consumida no dia e que a área disponível para o aumento da capacidade geradora esteja saturada, o modelo tarifário analisado é o do tipo residencial.

Para a bateria *PW* é analisado ainda o preço de um banco de baterias equivalente tradicional para aplicações fotovoltaicas, ou seja, baterias do tipo chumbo ácido estacionária, utilizado comumente em aplicações onde não existe acesso a rede elétrica.

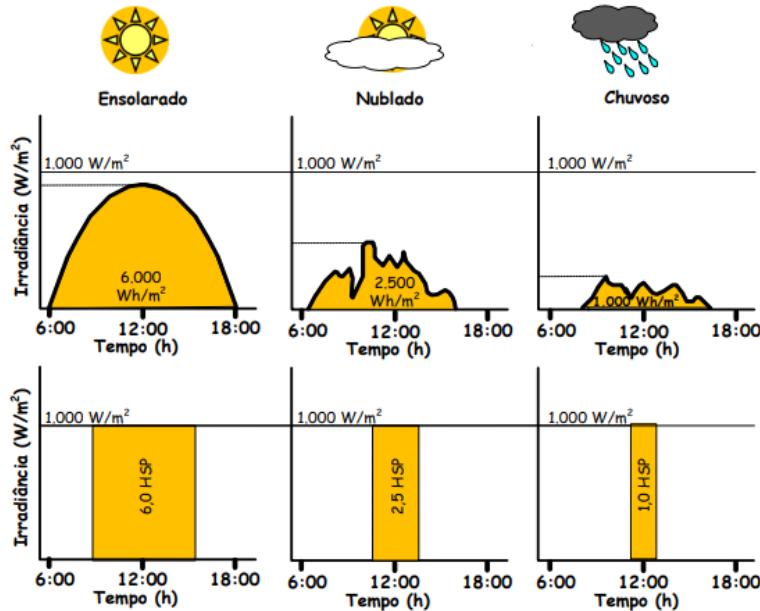
Para executar a análise no que se refere à geração para a *HUPS*, é preciso verificar a capacidade dos geradores residenciais de injetar energia, sendo que este fato depende da quantidade de placas fotovoltaicas instaladas e da localização dos geradores. Neste estudo é considerado que eles estão com sua instalação ótima, ou seja, instalados de forma correta e trabalhando sempre com a máxima potência de geração, ou seja, usando o *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*.

3.5. Avaliação da capacidade solarimétrica nos municípios escolhidos

Inicialmente para estimar a energia gerada por área de painel solar fotovoltaico é preciso adotar um modelo que seja prático e que ao mesmo tempo tenha um bom nível de precisão, pois um modelo ideal demandaria analisar dados solarimétricos de 365 dias do ano e esta forma de análise é pouco prática. Para isso foram adotados os dados solarimétricos médios mensais do site do CRESESB para as localidades escolhidas nas respectivas posições de inclinação dos painéis onde a produção de irradiação solar diária média ($\text{kWh/m}^2\text{.dia}$) é maximizada. Para melhorar

a qualidade dos dados adotou-se o modelo de Horas de Sol Pleno (HSP), ou seja, o modelo matemático que estima o quanto a produção diária média solar equivale ao valor padrão de testes em laboratório de 1000W/m^2 em função do número de horas.

Figura 19 - Conceito de HSP.



Fonte: (CEPEL, 2018).

Os dados solarímetricos do CRESESB para as localidades escolhidas São Paulo (SP), Belém (BL) e Araruama (AR) mostraram as seguintes informações para as posições de maior média anual de produção de energia:

Tabela 1- Irradiação solar média mensal por município.

Inclinação do Painel	Local	kWh/m ² .dia											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
21°N	SP	4,64	5,06	4,55	4,38	3,89	3,72	3,72	4,46	4,00	4,08	4,36	4,81
3°N	BL	4,32	4,27	4,33	4,47	4,75	5,04	5,12	5,28	5,33	5,15	5,0	4,6
20°N	AR	5,76	6,24	5,42	5,08	4,42	4,3	4,24	4,96	4,80	5,08	4,95	5,55

Fonte Adaptada (CRESESB,2020).

Os dados para estimar a temperatura de trabalho da célula e consequentemente estimar tais perdas e níveis de produção por área para cada localidade também foram levantados.

Tabela 2 - Temperatura média mensal máxima por município.

Local	Temperatura °C											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP	28,2	28,8	28	26,2	23,3	22,6	22,4	24,1	24,4	25,9	26,9	27,6
BL	30,6	30,4	30,8	31,3	31,7	31,7	32,1	32	32,2	32,4	32	31,4
AR	29,4	29,5	28,8	27,2	25,7	24,9	24,4	24,7	24,9	25,9	26,9	27,7

Fonte: adaptada (CLIMATEDATE, 2020).¹⁰

3.5.1. Estimativa da Capacidade de produção de energia por área de um painel fotovoltaico nas localidades escolhidas

Para prosseguir os estudos um painel fotovoltaico foi escolhido em um site¹¹ especializado na comercialização de sistemas fotovoltaicos, o painel é do fabricante *Ulica Solar*, de origem chinesa, o modelo do painel é o UL-395M-144 de 395 Wp comercializado ao preço de R\$ 879,00 no mesmo site. O *datasheet* do equipamento com todas as suas informações técnicas está anexado ao final do trabalho.

¹⁰ Verificado no site: pt.climate-data.org para as localidades escolhidas dia 31/08/2020.¹¹ Verificado no site: www.neosolar.com.br consultado dia 31/08/2020.

Usando os dados do painel, os dados climáticos das localidades escolhidas e aplicando a metodologia de cálculo de (ZILLES et al.,2012) descrita no apêndice para a determinação da temperatura de operação dos painéis, formamos a seguinte tabela 3 que indica a temperatura média máxima de operação das células mês a mês. Todas as referências citadas a uma unidade de painel, ou painel, neste trabalho são feitas com base no modelo de painel escolhido.

Tabela 3 - Temperatura de operação média do painel por município.

Temperatura média máxima de operação da célula °C

Local	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP	56,3	56,9	56,1	54,3	51,4	50,7	50,5	52,2	52,5	54,0	55,0	55,7
BL	58,7	58,5	58,9	59,4	59,8	59,8	60,2	60,1	60,3	60,5	60,1	59,5
AR	57,5	57,6	56,9	55,3	53,8	53,0	52,5	52,8	53,0	54,0	55,0	55,8

Fonte: Própria do autor.

Após estimar a temperatura de célula foi possível obter a potência média máxima desenvolvida no painel mês a mês, sua produção média mensal de energia e sua produção média mensal de energia por área em m².

Tabela 4 - Potência média máxima produzida pelo painel por município.

Potência média máxima produzida por painel (W)

Local	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP	346	345	347	349	354	355	355	353	352	350	348	347
BL	343	343	342	342	341	341	340	340	340	340	340	341
AR	344	344	345	348	350	351	352	352	351	350	348	347

Fonte: Própria do autor.

Tabela 5 - Energia média mensal gerada.

Energia média mensal gerada pelo painel (kWh)

Local	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP	42,4	46,1	41,8	40,4	36,3	34,8	34,9	41,5	37,2	37,7	40,1	44,1
BL	39,1	38,7	39,1	40,3	42,7	45,4	46,0	47,5	47,9	46,2	44,9	41,5
AR	52,4	56,7	49,4	46,7	40,9	39,9	39,4	46,1	44,5	46,9	45,5	50,9

Fonte: Própria do autor.

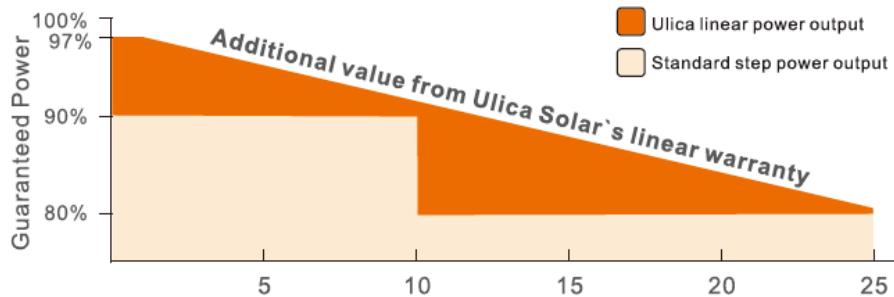
Tabela 6 - Energia média mensal gerada por unidade de área (kWh/m²).**Energia média mensal gerada por unidade de área (kWh/m²)**

Local	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SP	23,0	25,1	22,6	21,9	19,7	18,9	18,9	22,5	20,2	20,5	21,8	23,9
BL	21,2	21,0	21,2	21,9	23,2	24,6	25,0	25,8	26,0	25,1	24,4	22,5
AR	28,5	30,8	26,8	25,3	22,2	21,7	21,4	25,0	24,2	25,5	24,7	27,6

Fonte: Própria do autor.

Para estimar a produção de energia do painel ao longo de sua vida útil foi usado um gráfico fornecido pelo *datasheet* do fabricante e nele é possível observar que o fabricante garante 25 anos de vida útil do equipamento, um decrescimento linear que garante 97% de rendimento no primeiro ano e 80% no vigésimo quinto ano.

Figura 20 – Gráfico rendimento X vida útil do painel ao longo dos anos.



Fonte: *Datasheet* do equipamento.

Usando tais dados foi estimada a produção de energia ao longo de toda a vida útil do painel.

Tabela 7 - Energia gerada ao longo da vida útil de um painel em cada município.

Energia Produzida ao longo da vida útil de um painel (25 anos) (kWh)	
São Paulo	10569,7
Belém	11498,9
Araruama	12384,9

Fonte: Própria do autor.

3.6. Avaliação tarifária dos Municípios escolhidos

3.6.1. Prática de *Net Metering* na Alternativa 0 para as localidades escolhidas

Para estimarmos a viabilidade da instalação de sistemas de armazenamento de energia em cada localidade, primeiramente foi preciso saber o preço da energia. No site da *Ente Nazionale per l'Energia Elettrica* (ENEL), a concessionária responsável pela distribuição de energia na cidade de São Paulo foi possível

encontrar o valor das tarifas e seus respectivos impostos, idem para o caso da Equatorial Energia responsável pelo fornecimento de energia à cidade de Belém do Pará. No site da Cooperativa de Eletrificação Rural de Araruama (CERAL) responsável pelo fornecimento de energia na respectiva cidade em que carrega o nome, não foi possível encontrar o valor da tarifa, porém no site da ANEEL é possível encontrar o valor sem impostos. Desta forma foi deduzido a partir do ICMS do estado do Rio de Janeiro que a energia era 25% mais cara, valor do ICMS do estado. Os impostos Programa de Integração Social/Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) usados foram respectivamente 0,41% e 1,9%. O mês referência é agosto e o ano 2020. A taxa de iluminação em todos os casos foi desprezada, pois independe do consumo.

Tabela 8 - Preço do kWh e composição por município.

Tipo	Distribuidora	TUSD c/ Imp.	TE c/imp.	PIS/PASEP	COFINS	Preço kWh
B1 Residencial	Enel	0,32603	0,28405	0,0041	0,019	0,6332
B1 Residencial	Equatorial Energia		0,8790125		0,019	0,9021
B1 Residencial	Ceral		1,1875		0,019	1,2106

Fonte: Própria do autor.

Para a alternativa 0, ou seja, a alternativa inicial de incentivo para a prática de *net metering* cada kWh gerado tem este mesmo custo e, portanto, não existe incentivo ao uso de um sistema de armazenamento de energia. A tabela 9 indica o valor em reais pago para algumas faixas de consumo selecionadas aleatoriamente em cada localidade.

Tabela 9 - Valor a pagar para cinco perfis de consumo por município.

Consumo (kwh)	Valor em R\$ a pagar/mês				
	100	200	300	400	500
São Paulo-SP	63,32	126,64	189,95	253,27	316,59
Belém-PA	90,21	180,42	270,63	360,85	451,06
Araruama-RJ	121,06	242,12	363,18	484,24	605,30

Fonte: Própria do autor.

3.6.2. Prática de *Net Metering* na Alternativa 5 para as localidades escolhidas

Na alternativa 5 os benefícios de toda a TUSD e impostos que incidem sobre a TE devem ser pagos, ficando somente a TE sem impostos como energia compensada. O valor da tarifa das três concessionárias sem impostos foi retirado do site da ANEEL e para tal situação a tabela 10 indica o valor da energia gerada para cada localidade escolhida e o percentual de perda de cada uma em relação à alternativa 0.

Tabela 10 - Preço do kWh gerado em função da aplicação da alternativa 5 e percentual de perdas.

Tipo	Mês ref.	Município	Distribuidora	TE s/imp.	Preço kWh	Perdas %
B1 Residencial	ago/20	São Paulo	Enel	0,24868	0,24868	60,73
B1 Residencial	set/20	Belém	Equatorial Energia	0,23153	0,23153	74,33
B1 Residencial	out/20	Araruama	Ceral	0,21568	0,21568	82,18

Fonte: Própria do autor.

Para a alternativa 5 a estimativa de perdas mensais financeiras para cada faixa de consumidor escolhida em cada localidade e perdas anuais desprezando a inflação compostas ficou da seguinte maneira:

Tabela 11 - Valor em R\$ a perder por mês com a aplicação da alternativa 5.

Consumo (kwh)	Valor em R\$ a perder/mês				
	100	200	300	400	500
São Paulo-SP	38,45	76,90	115,35	153,80	192,25
Belém-PA	67,06	134,12	201,17	268,23	335,29
Araruama-RJ	99,49	198,98	298,48	397,97	497,46

Fonte: Própria do autor.

Considerando o preço da energia congelado ao longo de um ano, o valor em R\$ a se perder em um ano com a aplicação da alternativa 5.

.Tabela 12 - Valor em R\$ a perder por ano com a aplicação da alternativa 5.

Consumo (kwh)	Valor em R\$ a perder/ano				
	100	200	300	400	500
São Paulo-SP	461,40	922,80	1.384,20	1.845,60	2.307,00
Belém-PA	804,70	1.609,40	2.414,10	3.218,80	4.023,50
Araruama-RJ	1.193,90	2.387,81	3.581,71	4.775,62	5.969,52

Fonte: Própria do autor.

4. RESULTADOS

4.1. Estimativa da energia economizada pelo *HUSP* frente a um *UPS* tradicional

Para a *HUPS* adotamos conforme pode ser intuído na tabela 4 (Potência média máxima produzida pelo painel por município) que para 3 kW de energia precisamos de 9 painéis solares do modelo analisado para atender os três municípios, o tempo de vida útil da *HUPS* é de cerca de 10 anos, fato que determina três trocas da *HUPS*. A estimativa de energia economizada foi feita em função da vida útil dos painéis que possuem 25 anos e do rendimento da *HUPS* que é de 94% conforme verificado no relatório do IEE-USP. Conforme foi demonstrado anteriormente na tabela 7 sobre energia produzida ao longo da vida útil de um painel e levando em consideração as condições citadas (9 painéis e 94% de rendimento da *HUPS*), a energia economizada ao longo da vida útil do sistema será de:

Tabela 13 - Energia economizada ao longo da vida útil da *HUPS* ligada com nove painéis fotovoltaicos, em kWh.

Energia economizada ao longo da vida útil de 3 <i>HUPS</i>'s +9 painéis (25anos) (kWh)	
São Paulo	89.420,44
Belém	97.281,20
Araruama	104.776,44

Fonte: Própria do autor.

4.1.1. Estimativa de preço de uma *HUSP* e painéis solares

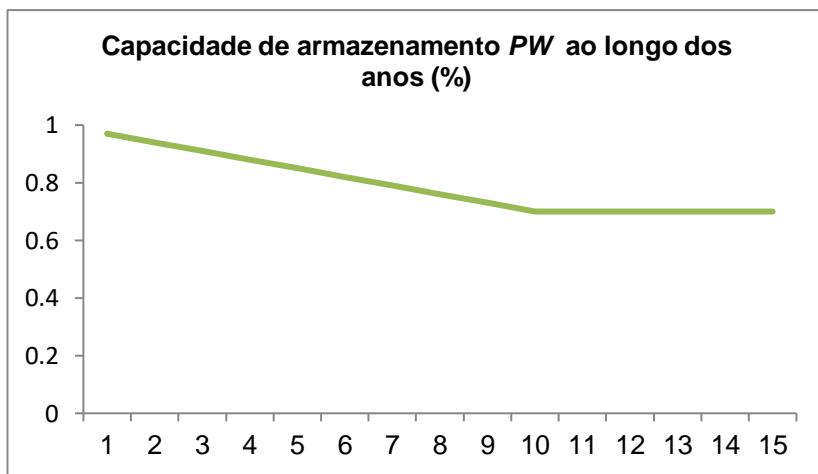
Para estimar o preço do *HUSP* é necessário fazer algumas conjecturas, pois tal modelo até a data da pesquisa deste trabalho, ou seja, agosto de 2020 não estava disponível no mercado brasileiro, além do mais o site do fabricante não divulga o preço de tal equipamento. Portanto modelos similares de *UPS* não híbridos serviram de referência para tais suposições. Na consulta com o mesmo especialista citado anteriormente em nota de rodapé na página 22 que estimou o tempo de vida útil da *HUPS* em dez anos, foi obtida a informação de que uma *HUPS* teria 30% de sobre custo em relação a uma *UPS* trifásica de mesma potência, informação relativa

ao preço que pratica a empresa que o especialista colabora, pois já é possível encontrar na internet uma *HUPS* comercializada por tal empresa no Brasil. Então em uma pesquisa num site de compras na internet¹² no mês referido foi possível encontrar um modelo de *UPS* similar ao *HUSP* ao preço de R\$ 6,5mil, trata-se do *APC Smart 3kVA-220V SMC3000XLBI* trifásico. Este valor foi usado como referência para determinar o preço da *HUPS* que foi estimada em R\$ 8,45mil.

4.2 Estimativa da energia armazenada ao longo da vida útil da *PW*

Para estimar tal valor algumas considerações foram levadas em conta, a capacidade de armazenamento de energia da *PW* conforme descrita pelo fabricante em seu *datasheet* que é de 6,4 kWh, seu rendimento inicial adotado foi de 97% com decrescimento linear até o décimo ano para 70% e este mesmo nível de rendimento é mantido até o décimo quinto ano quando a bateria deverá parar de funcionar conforme ilustra o gráfico da figura 21. A tabela 14 indica a energia armazenada ao longo de sua vida útil.

Figura 21 - Capacidade de armazenamento da *PW* ao longo dos anos.



Fonte: Própria do autor.

¹² Verificado no site: www.americanas.com.br consultado dia 20/08/2020 às 20h.

Tabela 14 - Energia total armazenada ao longo da vida útil de uma *PW*.

Energia armazenada ao longo da vida útil de uma <i>PW</i> (kWh)
27681,6

Fonte: Própria do autor.

4.2.1. Estimativa de preço da *PW* no Brasil

Para estimarmos o valor da bateria *PW* no Brasil devemos levar em conta à cotação do dólar e para isso consideraremos o valor verificado no dia 07/09/2020 para o dólar comercial que foi de R\$ 5,30 para cada US\$ 1.¹³

Para contabilizarmos os impostos sobre importação usamos o valor de 60% baseado na portaria nº 156/1999 art 1º e o ICMS de 18% média nacional.¹⁴

Tabela 15 - Estimativa de preço *PW* no Brasil.

Preço do dólar R\$ 5,30 dia 07/09/20			
Preço			
<i>PW sem impostos</i>	R\$	15.900,00	
<i>PW com impostos</i>	R\$	28.302,00	

Fonte: Própria do autor.

4.3. Estimativa de preço de um banco de baterias comum para um sistema fotovoltaico equivalente a *PW*

No mesmo site em que foi pesquisado o preço da *UPS* comum foi possível encontrar a bateria tipo estacionária *VRLA* para estimarmos o tamanho de um banco equivalente a *PW* em potencial energético. Trata-se do modelo *Centrium Energy DF2500* do fabricante *Freedom* 12V/165Ah ao preço de R\$ 921,00.

¹³ Verificado no site: www.uol.com.br/economia na data referida.

¹⁴ Valor conferido na reportagem: “Projeto acaba com alíquota de 4% do ICMS para comércio interestadual de importados” do jornal eletrônico do Senado Federal disponível na internet e publicado em 15/01/2018.

O banco de baterias equivalente em energia a *PW* é composto por oito baterias, com estimativa de duração de 4 anos de vida útil, tal valor foi deduzido pelo manual do fabricante considerando 1 ciclo de descarga diário a 20% da capacidade de armazenamento da bateria e temperatura ambiente de 35°C . Os cálculos estão demonstrados no apêndice.

Portanto para 15 anos de banco de baterias estacionárias do tipo *VRLA*, ou seja, para o tipo mais comum para sistemas de armazenamento de energia temos que fazer quatro renovações para termos o equivalente ao tempo de duração da *PW*, logo é necessário de gastar R\$ 29,5 mil com baterias, além de gastar com o controlador do banco de baterias, sendo este o responsável por conectar os painéis com as baterias e o inversor que converte a tensão *DC* do banco em *AC*. O preço estimado do controlador foi de 1mil R\$¹⁵ baseado no modelo (TRACER 3210AN 30A MPPT) e do inversor foi de R\$ 3,8mil¹⁶ baseado no modelo (EPEVER UPOWER 3000W 30A MPPT) perfazendo portanto R\$ 34,3mil para um banco de baterias equivalente a uma *PW*, com o acréscimo de 1 ano de vida útil.

Tabela 16 - Preço banco de baterias equivalente a *PW*.

Preço do banco de baterias		
Bateria unidade	R\$	921,90
Banco de baterias x 4	R\$	29.500,80
Controlador de cargas	R\$	1.000,00
Inversor	R\$	3.800,00
Total	R\$	34.300,80

Fonte: Própria do autor.

¹⁵ Verificado no site: www.americanas.com.br consultado dia 20/08/2020 às 21h.

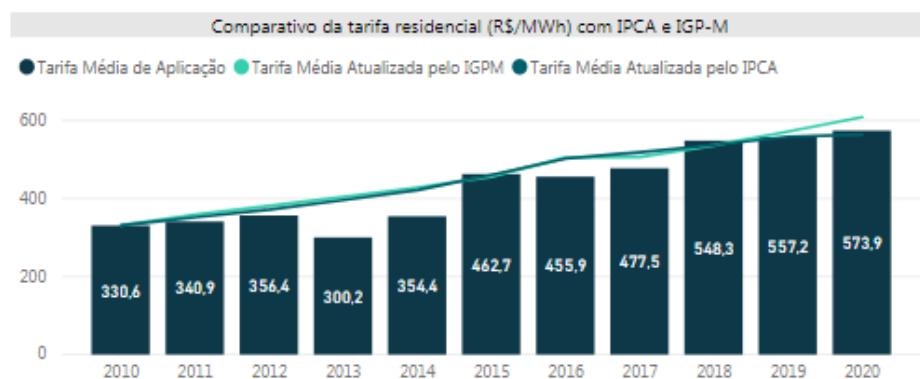
¹⁶ Verificado no site: www.neosolar.com.br no dia 20/08/2020 às 21h30.

5. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS

5.1. Comparações econômicas

Para fazermos as comparações econômicas foram adotas algumas premissas como forma de simplificação de valores demonstrados. No site da ANEEL é possível verificar que elevação de preço médio no país para o ano de 2020 foi igual ao Índice Geral de Preços do Mercado (IGPM) para clientes residenciais juntando TUSD e TE. No site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na página “IBGE explica inflação”, é possível verificar que a inflação acumulada nos últimos 12 meses contando Agosto de 2020 foi de 2,44%, como o cenário brasileiro de geração de energia elétrica no Brasil é dependente de chuvas foi adotado que o valor do aumento no preço da energia elétrica corresponde em 3% ao ano.

Figura 22 - Evolução do preço da energia elétrica residencial no Brasil de 2010 a 2020.



Fonte: (ANEEL, 2020).

No site da Enel-SP informa que a partir da resolução homologatória nº 2568 o preço da tarifa B1 residencial é exatamente igual ao preço da tarifa B3 demais classes, isto é a tarifa comercial adotada nesta comparação. No site da Equatorial Energia para as classes residencial normal e comercial é possível verificar também a igualdade dos preços. No site da CERAL Araruama não são informados os preços das tarifas tanto para a classe de consumo residencial como comercial, portanto seguindo as outras duas distribuidoras citadas foi adotada a igualdade no preço para as duas classes da CERAL Araruama, sendo que o preço foi deduzido através dos

valores de TUSD e TE verificados no site da ANEEL, conforme explicado anteriormente.

5.2. Estimativas econômicas para a *HUPS*

Primeiramente para avaliar o retorno financeiro do uso da *HUPS* foi verificado como alternativa a aplicação do montante de capital no investimento de três *HUPS*'s em relação a três *UPS*'s bifásicas, isto porque a cada 10 anos uma unidade deve ser substituída para ser usada com os nove painéis fotovoltaicos, pois os painéis possuem 25 anos de vida útil. Uma taxa de 25% de custo de manutenção, foi incorporada no preço das *HUPS*'s e das *UPS*'s, referente a três trocas de baterias ao longo da vida útil das máquinas e a uma troca de seus capacitores de filtragem de sinal. O preço do *UPS* bifásico usado como referência é de R\$ 4,5mil¹⁷, tal *UPS* é da marca APC modelo SMC 3000XLBI bifásico.

.Tabela 17 – Valor a mais investido numa *HUPS* em relação a uma *UPS*.

Valores investidos	
3 UPS's comuns	R\$ 17.812,50
3 HUPS's + 9 Painéis	R\$ 41.548,50
Diferença (3*HUPS's + 9 painéis) - 3UPS 's comuns	R\$ 23.736,00

Fonte: Própria do autor.

Em seguida foi avaliado o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) com a TMA de 8%, taxa escolhida em função da conjuntura econômica de baixos juros de remuneração para agosto de 2020. A evolução no preço do kWh em 3% ao ano conforme citado e 25 anos de uso. Lembrando que o preço da energia é o da alternativa 0 considerando o investimento inicial de R\$ 23,7 mil, ou seja, a diferença a mais que deve ser investida na compra das *HUPS*'s e os nove painéis fotovoltaicos. Os cálculos das receitas obtidas estão detalhados no

¹⁷ Verificado no site: www.processtec.com.br consultado dia 13/09/2020 às 22h.

apêndice do trabalho. Portanto com a energia economizada em cada localidade temos:

Tabela 18 - VPL e TIR para *HUPS* nas localidades escolhidas.

Avaliação Econômica <i>HUPS</i>	24 anos	TIR
VPL SP	R\$ 8.654,69	11%
VPL BL	R\$ 26.468,73	18%
VPL AR	R\$ 48.827,85	25%

Fonte: Própria do autor.

Para saber o *payback* simples do projeto ou o tempo em que ele se paga nas localidades escolhidas, foi considerado que a distribuição das economias fosse igualitária ao longo dos 25 anos, considerando a inflação igual ao custo de valorização do kWh, sendo as receitas anuais iguais ao primeiro fluxo de caixa positivo do investimento.

Tabela 19 - Valores investidos *HUPS*.

Payback Simples (Anos)	
São Paulo-SP	8 anos e 10 meses
Belém-PA	5 anos e 8 meses
Araruama-RJ	3 anos e 11 meses

Fonte: Própria do autor.

5.3. Estimativas econômicas para a bateria PW

No caso da bateria *PW* é possível intuir através dos dados da tabela 20, que no momento atual, onde o preço do dólar está muito alto, além da carga tributária para este tipo de equipamento, sua compra não é viável economicamente.

Tabela 20 - Diferença de preço do kWh gerado nas localidades.

Diferença R\$/kWh entre Alt.0 e Alt.5	
São Paulo	0,38
Belém	0,67
Araruama	0,99

Fonte: Própria do autor.

O VPL encontrado está descrito na tabela 21 com a TMA de 8%, a evolução nos preços do kWh em 3% ao ano e 15 anos de uso com preço do investimento inicial em R\$ 28,3mil. Os cálculos das receitas obtidas estão detalhados no apêndice do trabalho.

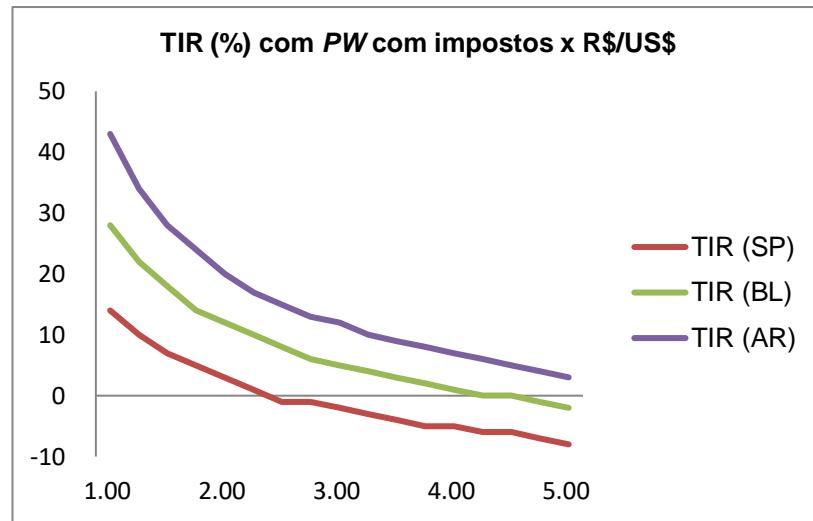
Tabela 21 - VPL e TIR para PW nas localidades escolhidas.

Avaliação Económica PW	15 anos	TIR
VPL SP	R\$ -20.686,6	-8%
Economia BL	R\$ -15.020,50	-2%
Economia AR	R\$ - 8.596,71	3%

Fonte: Própria do autor.

Usando a variação do preço da *PW* nas planilhas de cálculo de VPL e TIR é possível verificar que sem impostos a *PW* passa a valer a pena na localidade de Araruama com TIR de 12%. Com impostos é possível verificar que na cidade de Araruama a *PW* traz o retorno desejado a partir do dólar a US\$ 3,69 em Belém a US\$ 2,48 e em São Paulo a US\$ 1,42 conforme ilustra o gráfico da figura 23.

Figura 23 - TIR PW com impostos em função do preço do dólar.



Fonte: Próprio do autor.

O resumo dos resultados apresentado está ilustrado na tabela 22.

Tabela 22 - Resumo dos resultados

Equipamento	Preço	Retorno Investimento			US\$-SP	US\$-BL	US\$-AR
		(TIR)-SP	(TIR)-RJ	(TIR)-AR	(TIR) \geq 8%	(TIR) \geq 8%	(TIR) \geq 8%
kit HUPS ¹⁸	R\$ 41.548,50	11%	18%	25%	-	-	-
UPS	R\$ 17.812,50	-	-	-	-	-	-
PW	R\$ 28.302,00	-8%	-2%	3%	1,42	2,48	3,69
BB ¹⁹	R\$ 34.300,00	-10%	-4	0%	-	-	-

Fonte: Própria do autor.

¹⁸ HUPS mais nove painéis fotovoltaicos.

¹⁹ Banco de baterias estacionárias.

6. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

A *HUPS* apresentou um excelente resultado nas três localidades escolhidas mostrando que para uma determinada condição de trabalho, ou seja, aquela que exige 24 horas com o equipamento funcionando ou ligado somente durante o dia quando a maior parte da energia consumida vem dos painéis fotovoltaicos, é muito vantajoso para o comprador investir em tal equipamento junto com os nove painéis fotovoltaicos frente às tecnologias tradicionais, fato que o coloca em vantagem para ser usado na maioria do território nacional, pois a cidade de São Paulo capital possui um valor tarifário para energia elétrica menor que a maioria das cidades do país conforme pode ser verificado no ranking de tarifas da ANEEL²⁰ encontrado no site da agência.

Apesar de raro uso no Brasil da *HUPS*, em agosto de 2020 já era possível encontrar em ferramentas de busca da internet uma *HUPS* sendo comercializada por uma empresa brasileira no site buscador “Google”, fato que demonstra que é tendência a penetração deste tipo de tecnologia no mercado. Porém vale ressaltar que seu desempenho e funcionamento não necessariamente refletem em igual desempenho e funcionamento da *HUPS* usada neste trabalho.

Em relação à bateria *PW* foi feita a demonstração de que ela é mais barata em relação a um banco de baterias equivalente em carga e vida útil, porém os resultados negativos apresentados no que se refere a sua alternativa em relação à prática de *net metering* não podem servir de desestímulo ao seu uso, as condições atuais como a incipienteza da tecnologia e o preço do dólar apontavam que este seria o cenário provável hoje (agosto de 2020) para sua compra no Brasil. No estudo, mesmo no cenário atual é possível encontrar uma TMA de 3% na cidade de Araruama, fato que pode ser melhorado nos três cenários com a queda do dólar. É importante citar que a indústria dos carros elétricos são as grandes motivadoras deste tipo de tecnologia e que algumas fabricantes de carros já possuem ou estão desenvolvendo baterias similares, além de empresas de eletrônicos estarem neste ramo também. Como exemplo podemos citar as baterias:

²⁰ Verificado no site: www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas consultado dia 14/09/2020.

- LG Chem RESU, do fabricante sul coreano LG.
- Xstorage, da fabricante japonesa NISSAN.
- sonnenBatterie hybrid, da fabricante alemã Sonnen.
- Phi 3.8 battery, da fabricante estadunidense Simpliphi.
- Sunverge ONE, da fabricante estadunidense Sunverge.

Outros fabricantes de automóveis como as alemãs *Mercedez Benz* e a *BMW* estão desenvolvendo baterias similares. Com todos estes modelos apresentados e, com a provável entrada de fabricantes chineses que ao longo dos anos estão investindo muito em energias renováveis, a competição no mercado pode mudar o cenário para o uso deste tipo de sistema de armazenamento de energia e populariza-los. Estudos como “*New opportunities for using Tesla Powerwall Battery in the United States of America and Portugal*” de (RODRIGUES et al., 2015) e “*Economics of Residential Photovoltaic Battery Systems in Germany: The Case of Tesla Powerwall*” de (TRUONG et al., 2016) mostram que a bateria *PW* é uma alternativa para a recuperação de capital quando a alteração das regras de *net metering* provoca perdas na recuperação de capital investido, tais estudos foram feitos em outros países de maneira similar ao que foi proposto neste trabalho.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria comparar o desempenho de equipamentos que venham a surgir no mercado, no caso das *HUPS*, além de questões relacionadas à sua eficiência tão importante quanto são as questões relacionadas à qualidade de energia e para as baterias de lítio pode-se observar o melhor custo-benefício dentre os diversos modelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. 1. ed. [S.I.]: Pearson, 1998.

ANEEL. **Revisão das regras aplicáveis à micro e mini geração distribuída - Resolução Normativa nº 482/2012**. Brasília, p. 60., 2018.

ANEEL. **Relatório Evolução das Tarifas Residenciais**, 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>>. Acesso em: 15 Setembro 2020.

ANEEL. **Retrospectiva 2019**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESES, 2014.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVA BRITO. **Potencial Solar-Sun data V 3.0**, 2020. Disponível em: <<http://www.creesesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 27 de Agosto de 2020.

EMADI, A.; NASIRI, A.; BEKiarov, S. B. **Uninterruptible Power Supply and Active Filters**. 1. ed. [S.I.]: CRC Press, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2019**. Relatório Síntese/Ano Base 2018. ed. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 2019.

ENEL. **Tarifa de Energia Elétrica**, 2020. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicaosp.com.br/para-sua-casa/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2020.

EQUATORIAL ENERGIA. **Valor de tarifas e serviços**, 2020. Disponível em:<<https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 16 de Agosto de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2020. Disponível em: <[https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD\(2019\)](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD(2019))>. Acesso em: 15 de Agosto de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTISTICA. **Calculadora do IPCA**, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 20 Agosto 2020.

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Relatório de Ensaio N° 82716**. São Paulo-SP, 2018.

FREEDOM. **Manual Técnico Bateria Estacionária**. Sorocaba: [s.n.], 2008.

GONÇALVES, F. D. **Resposta de Sistemas Ininterruptos de Energia Frente a Fenômenos de Qualidade de Energia**. Brasília: Universidade de Brasília, 2008.

KARVE, S. **Three of a kind [UPS topologies, IEC standard]**. [S.I.]: Proc. Inst. Elect. Eng. Review, v. n° 46, 2000.

MARTINHO, E. **Disturbios da Energia Elétrica**. 3. ed. [S.I.]: ERICA, 2009.

NEWMAX. **Breve História das Baterias**, 2020. Disponível em: <www.newmax.com.br/breve-historia-das-baterias>. Acesso em: 21 Agosto 2020.

PNE INNOTEC. **Specification: OFF GRID HESS 6.5kWH PCS 3kW**. Suwon-si.2018

RODRIGUES, S. et al. **New Opportunities for Using Tesla Power Wall Baterry in the United States of America and Portugal**. Carnegie Mellon University, Pittsburgh-PA, 2015. 5.

ROSENKRANZ, C. A.; KÖHLER, U.; LISKA, J. L. **Modern Battery Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles**. Hannover, 2007.

SOUZA, D. F. **Uma Avaliação do Desempenho de Motores Elétricos de Indução Comercializados no Brasil entre 1945-2016 e o Impacto da Legislação Brasileira**. São Paulo-SP: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.Tese de Mestrado, 2016.

TESLA. **Tesla Power Wall**, 2020. Disponível em: <<https://www.tesla.com/powerwall>>. Acesso em: 12 Agosto 2020.

TRUONG, C. N. et al. **Economics of Residential Photovoltaic Baterry Sistems in Germany: The Case of Tesla's Power Wall**. MDPI, Munich, 11 May 2016. 17.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. 2. ed. [S.I.]: ERICA, 2012.

WEG. Motores eficientes geram economia de energia na indústria. **Valor econômico**, 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2020.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica**. [S.I.]: Oficina de Textos, 2012.

APENDICE

- Determinação da temperatura de operação dos painéis:

$$T_c = T_A * \frac{G_T}{800} * (T_c^* - 20) * 0,9$$

Onde:

T_c = Temperatura da célula [°C].

T_A = Temperatura ambiente[°C].

T_c^* = Temperatura nominal de operação da célula TNOC[°C] usado 45°C.

G_T = Radiação solar média no plano da célula [W/m²].

- Potencia de pico do painel fotovoltaico:

$$P_{MP} = P_{MP}^0 * \frac{G_T}{G_{REF}} * [1 + \gamma_{MP} * (T_c - T_{cref})]$$

Onde:

P_{MP} = Potência de pico do painel fotovoltaico [W].

P_{MP}^0 = Potencia nominal do painel fotovoltaico [W].

G_T = Radiação solar média no plano da célula [W/m²].

G_{REF} = Radiação solar nas condições STC = 1000W/m².

γ_{MP} = Coeficiente de temperatura para potência máxima [°C⁻¹].

T_c = Temperatura da célula [°C].

T_{CREF} = Temperatura da célula nas condições STC = 25°C.

- Energia Gerada método Horas de Sol Pleno (HSP):

$$(HSP) = \frac{\bar{H}_T}{1} = \frac{\frac{kWh}{m^2dia}}{\frac{kWh}{m^2h}} = \bar{H}_T [\frac{h}{dia}]$$

$$E_{GFV} = \eta_{SPMP} * P_{MP} * (HSP) * TD$$

Onde:

η_{SPMP} = Rendimento do MPPT considerado 99%.

P_{MP} = Potencia de pico dos painéis fotovoltaicos [W].

(HSP) = Horas de Sol Pleno.

TD Taxa de desempenho, adimensional adotada no Brasil entre 0,7 e 0,8, corrigida $TD = (1/0,99)*(395/348) = 0,86$ (corrigida em função do rendimento do MPPT e da potência nominal e de pico do painel).

- Calculo do dimensionamento do banco de baterias:

V_{Bateria} = 12V

Corrente-hora bateria = 165Ah

Tensão do banco 24V²¹

Energia total armazenada = 6,4kWh

Profundidade de descarga = 20%

Corrente-hora banco = Potência máxima de descarga / Tensão do banco = 266,6Ah

Corrente-hora banco com 20% de descarga = Corrente-hora banco / 20% = 1333,3Ah

²¹ Baseado na tensão do inversor usado neste trabalho e descrito anteriormente, modelo EPEVER UPOWER 3000W.

Baterias em paralelo = Corrente-hora banco com 20% de descarga /
Corrente-hora bateria = 8 unidades

No manual do fabricante²² *Freedom* indica que para 20% de descarga a bateria apresenta 1500 ciclos de vida útil, assim para uma descarga diária temos 4 anos de vida útil estimada.

- Cálculo das receitas obtidas no VPL da *HUPS*

$$VPL = \sum_{t=1}^{25} \frac{FC_t}{(1 + 8\%)^{25}}$$

Preço kWh R\$	
São Paulo	0,63318
Belém	0,90211
Araruama	1,2106

Economia anual kWh = (dados da tabela 13)/25

Economia anual kWh	
São Paulo	3576,8
Belém	3891,2
Araruama	4191

$$FC_0 = R\$ -23.736,00$$

$FC_1 \dots FC_{25}$ = Economia anual kWh * Preço kWh R\$ com juros acumulados de 3% ao ano.

- Cálculo das receitas obtidas no VPL da *PW*

$$VPL = \sum_{t=1}^{15} \frac{FC_t}{(1 + 8\%)^{15}}$$

²² Declarado nas referências bibliográficas.

Preço do kWh verificar na tabela 20.

Economia anual em função do gráfico da figura 21. Onde para cada ano temos Economia anual = $\eta_{PW} * 6,4 \text{ kWh} * 365$ (assim para cada ano temos um valor diferente em função da variação do rendimento da $PW(\eta_{PW})$).

$$FC_0 = R\$ -28.302,00$$

$FC_1 \dots FC_{15} = \text{Economia anual kWh} * \text{Preço kWh da tabela 20 R\$ com juros acumulados de } 3\% \text{ ao ano.}$

ANEXOS

ANEXO A – Datasheet painel solar

MONO 385W/390W/395W

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical Parameters Standard Test Conditions				
Module Type	UL-385M-144		UL-390M-144	UL-395M-144
Power Output	P _{max}	W	385	390
Power Tolerance	ΔP _{max}	W	0/-5W	
Module Efficiency	η m	%	19.41	19.66
Voltage at P _{max}	V _m	V	39.8	40.0
Current at P _{max}	I _m	A	9.67	9.75
Open-Circuit Voltage	V _{oc}	V	48.7	48.9
Short-Circuit Current	I _{sc}	A	10.15	10.23
STC	1000W/m ² irradiance, 25°C module temperature, AM1.			

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature	NOCT	°C	45±2
Temperature Coefficient of P _{max}	γ	%/°C	-0.39%
Temperature Coefficient of V _{oc}	β _{voc}	%/°C	-0.29%
Temperature Coefficient of I _{sc}	α _{isc}	%/°C	+0.049

OPERATING CONDITIONS

Max System Voltage	1000V/1500V		
Max Series Fuse Rating	15A		
Operating Temperature Range	-40°C ~ 85°C		
Max static snow load	5400Pa		
Max static wind load	3800Pa		
Application Class	A		

CONSTRUCTION MATERIALS

Front Cover(material/type/thickness)	low-iron tempered glass/3.2mm		
Cell(quantity/material/type/dimension)	144/monocrystalline/156x78mm		
Encapsulant(material)	ethylene vinyl acetate(EVA)		
Frame(material/anodization color)	anodized aluminum alloy/silver or black		
Junction Box(protection degree)	IP67		
Cable(length/cross-sectional area)	400mm/4mm ²		
Plug Connector	MC4 compatible		

GENERAL CHARACTERISTICS

Dimension(L/W/H)	2000/992/40mm		
Weight	22.5kg		

PACKING CONFIGURATION

Pallet Size(L/W/H)	2040/1120/2460mm		
Pallet Weight	1414kg		
Pieces per Pallet	56pcs		
Pieces per Container	616pcs		

INTERNATIONAL CERTIFICATES

- TÜV SÜD, TÜV NORD, UL, CE, JET, CEC, MCS, CQC, IMERTRON, NRE, KS
- ISO9001:2015
- ISO14001:2015
- BS OHSAS 18001:2007

ulica solar
LEADING IN TECHNOLOGY

I-V CURVE

I-V characteristics at different irradiances

I-V characteristics at different temperature

Back View

Please read the instruction manual in its entirety before handling, installing, and operating Ulica Solar modules.
Due to continuous innovation, research and improvement, the specification is subject to change without prior notice.

WWW.ULICASOLAR.COM

ANEXO B – Datasheet Power Wall

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

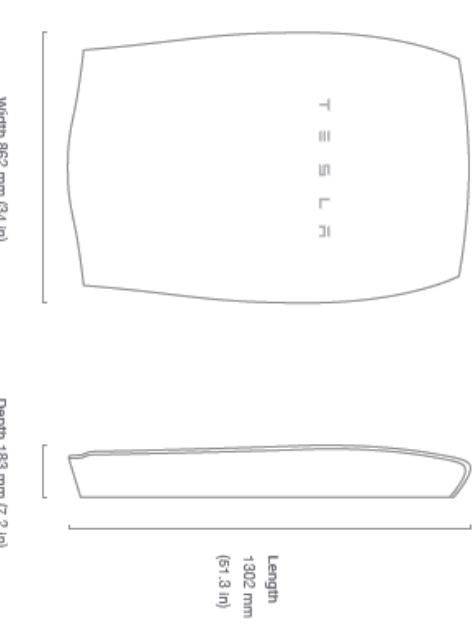
Power, continuous and peak	3.3 kW
Energy*	6.4 kWh
Internal Battery Voltage	< 50 VDC
System Operating Voltage	350 V–450 V
Voltage in OFF State	0 VDC
Current	9.5 ADC
Round Trip Efficiency*	92.5% (for a 400 V–450 V DC bus)
Depth of Discharge	100%
Equivalent Cycles	Unlimited cycles (provided Powerwall is only used for solar self-consumption and backup)

* Values provided for 25°C (77°F), 2 kW charge/discharge power

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating temperature	-20° C to 50° C (-4° F to 122° F)
Relative humidity	100% condensing
Maximum altitude	3000 m (9843 ft)
Impact Rating	IK09
Ingress Rating	IP35 & NEMA 3R (Powerwall) IP67 (Battery Pod)

MECHANICAL SPECIFICATIONS



CERTIFICATIONS

Battery/Pod	UL 1642, UL 1741, UL 1973, UN 38.3, REACH, Battery Directive 2006/66/EC, RoHS Directive 2011/65/EU, WEEE Directive 2012/19/EU, IEC 62109-1, IEC 62619, CSA C22.2.107.1
Powerwall	UL 9540, AC156 seismic certification, IEEE 693-2005 seismic certification, FCC Part 15 Class B, IEC/EN 61000 Class B