



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia eletrônica

Estudo para redução do valor da conta de energia elétrica utilizando as vantagens da tarifa branca e armazenadores de energia

Autor: Gabriel da Silva Soares
Orientador: Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Brasília, DF
2019



Gabriel da Silva Soares

Estudo para redução do valor da conta de energia elétrica utilizando as vantagens da tarifa branca e armazenadores de energia

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia eletrônica.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Brasília, DF

2019

Gabriel da Silva Soares

Estudo para redução do valor da conta de energia elétrica utilizando as vantagens da tarifa branca e armazenadores de energia/ Gabriel da Silva Soares. – Brasília, DF, 2019-

50 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2019.

1. Tarifa branca. 2. Acumuladores de energia. I. Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo para redução do valor da conta de energia elétrica utilizando as vantagens da tarifa branca e armazenadores de energia

CDU 621.38

Gabriel da Silva Soares

Estudo para redução do valor da conta de energia elétrica utilizando as vantagens da tarifa branca e armazenadores de energia

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 09 de dezembro de 2019 – Data da aprovação do trabalho:

**Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo
Pizo**
Orientador

**Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz
Arboleda**
Convidado 1

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 2

Brasília, DF
2019

Este trabalho é dedicado ao meu irmão Rafael Soares (in memoriam) por ter fortalecido em mim o desejo de sempre seguir pelo caminho correto e buscar o verdadeiro conhecimento

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pelo suporte prestado ao longo do curso, pela paciência e pelo amor incondicional.

Agradeço a toda minha família, meus amigos e à minha namorada por todos os momentos de descontração e pelas conversas produtivas que me fizeram seguir o belo caminho da engenharia.

Agradeço a todos os professores do curso de eletrônica pelo conhecimento passado ao longo da formação, especialmente ao meu orientador, que além de tudo aceitou e apoiou o meu tema com muita empolgação.

Resumo

Com o advento da tarifa branca ao Distrito Federal em 2018 surgiram oportunidades de redução do valor da conta de energia nos lares de Brasília. Essa modalidade de tarifa se diferencia da convencional por cobrar valores diferentes pela energia de acordo com o horário do dia. A intenção desse projeto é fazer uma melhor distribuição do consumo e evitar a sobrecarga da rede elétrica durante horários específicos. O sistema se propõe a armazenar energia ao longo do dia, em horários de menor demanda e menor custo para utilizar nos horários de maior demanda e maior custo, visando economia sem alterar os hábitos dos moradores. O trabalho compara baterias de lítio e chumbo-ácido a um sistema de armazenamento por hidro bombeamento, mostrando, entre outros, a diferença de tamanho entre eles. Para parametrizar os cálculos, o dimensionamento foi baseado na curva de carga levantada, utilizando uma ESP32 e sensor de corrente não invasivo, em uma unidade consumidora residencial com 3 habitantes. A economia gerada pela adesão à tarifa branca foi utilizada como entrada no fluxo de caixa e o investimento necessário para a implementação do sistema foi a saída, permitindo o cálculo do *payback*, que mostrou ser inalcançável ao longo do projeto. Os motivos pelos quais o sistema não obteve êxito financeiro foram avaliados e discutidos.

Palavras-chaves: Tarifa Branca. Acumuladores de energia. TOU. Resposta da demanda.

Abstract

With the white tariff incoming to Distrito Federal in 2018, opportunities of bill values reduction emerged in Brasília's homes. This modality differs from the conventional one by charging different values according to different day schedules. This project intends to make a better consumption distribution and avoid grid overload at specific schedules. The system proposes to store energy during the day, at lowest demand and costs times, to use it at major demand and cost times, aiming economy without significative changes in habits. This work compares lithium and lead-acid batteries to the pumped hydro storage system, showing, among other things, the size difference between them. The sizing was based on the load curve raised, utilizing an ESP32 and a non-invasive current sensor, in a consumer unity with three residents. The economy generated by the white tariff adhesion was used as an input to the cash flow and the necessary investment to the implantation of the system was the cash flows's output, allowing to calculate the payback, that turned out to be unreachable during the project. The reasons why the system did not succeed was evaluated and discussed.

Key-words: White tariff. TOU. Demand Response. Energy Accumulators.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Gráfico ilustrando o funcionamento da tarifa branca. Adaptado de ANEEL (2015)	24
Figura 2 – Ciclo de vida em relação à profundidade de descarga. (IEEE, 2008) . .	26
Figura 3 – Não linearidade causada pelas perdas em altas taxas de descarga. Capacidade nominal também depende da taxa. Gráfico baseado nas informações de SBS (2017)	27
Figura 4 – Projeção do custo das baterias de lítio até 2050 (NREL, 2019)	27
Figura 5 – Esquemático do armazenamento por bombeamento de água. Imagem retirada de Ekoh, Unsal e Maheri (2016)	28
Figura 6 – Tipos de forma de onda na saída dos inversores (PENNSTATE, 2018) .	28
Figura 7 – Modulações utilizadas em inversores puramente senoidais. (TOSHIBA, 2018)	29
Figura 8 – ESP32 na plataforma DevKitC, utilizado no projeto. Fonte: Mouser (2018)	31
Figura 9 – Sensor de corrente não invasivo. Fonte: YHDC (2015)	31
Figura 10 – Diagrama da montagem de aquisição de dados.	33
Figura 11 – Circuito para medir tensão.	34
Figura 12 – Circuito para medir tensão.	34
Figura 13 – Trecho do código onde é feita a leitura do ADC.	35
Figura 14 – Parâmetros necessários para o ThingSpeak juntamente com a função de envio de dados.	35
Figura 15 – Diagrama do sistema proposto.	36
Figura 16 – Proporção de consumo em 7 dias diferentes na semana.	37
Figura 17 – Retenção em função da quantidade de ciclos. (BATTERY UNIVERSITY, 2017)	39
Figura 18 – Fluxo de caixa	44
Figura 19 – Curvas de carga medidas apenas em dias úteis. A linha representa a energia consumida.	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Alteração percentual do valor da tarifa branca em relação à tarifa comum no DF.	24
Tabela 2 – Equipamentos utilizados na casa.	30
Tabela 3 – Comparação entre as tecnologias de chumbo-ácido e lítio (reutilizadas).	41
Tabela 4 – Estimativa de custo dos equipamentos.	44

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
VRLA	<i>Valve Regulated Lead-Acid</i>
DOD	<i>Depth of discharge</i>
RN	Resolução normativa
RDBI	Resposta da demanda baseada em incentivos
RDBT	Resposta da demanda baseada em tarifas
TOU	<i>Time of use</i>

Sumário

	Introdução	21
1	REFERENCIAL TEÓRICO	23
1.1	Resposta da demanda	23
1.1.1	Tarifa branca	23
1.2	Acumuladores de Energia	25
1.2.1	Baterias	25
1.2.2	Acumuladores Mecânicos	27
1.3	Inversores de frequência	28
2	METODOLOGIA	30
2.1	Levantamento do consumo	30
2.2	Priorização de funcionamento	32
2.3	Dimensionamento	32
2.4	Investimento e Retorno	32
3	DESCRIÇÃO DO TRABALHO	33
3.1	Primeira etapa	33
3.1.1	Circuitos	33
3.1.2	Software	34
3.2	Segunda etapa	36
4	PROJETO DO SISTEMA	37
4.0.1	Estimativa de consumo	37
4.0.1.1	Dimensionamento de baterias	38
4.0.1.1.1	Chumbo-ácido	40
4.0.1.1.2	Lítio	40
4.0.1.2	Dimensionamento do inversor e do carregador	41
4.0.1.3	Dimensionamento do aquecedor por passagem	42
4.0.1.4	Dimensionamento do sistema de Hidro Bombeamento	42
5	INVESTIMENTO E RETORNO	44
6	DISCUSSÕES	45
	REFERÊNCIAS	46

ANEXOS	49
ANEXO A – CURVAS DE CARGA	50

Introdução

O valor da tarifa de energia no Brasil tem sofrido aumento desde 1995 (ILUMINA, 2017) e ameaça continuar nesse ritmo por um tempo. Além disso, ao longo do ano o sistema de bandeiras tarifárias reflete o custo de produção da energia em relação às condições ambientais ANEEL (2019) já que nos períodos de seca o volume dos reservatórios das hidrelétricas baixa e força a ativação de usinas termelétricas, elevando o custo da tarifa (EBC, 2018). Logicamente, esses valores são repassados ao consumidor, inserindo oscilações nos valores das contas ao longo do ano. Isso mostra que a nossa capacidade de geração centralizada não atende plenamente a demanda durante todo o ano, uma vez que a demanda por energia elétrica é basicamente a mesma nos períodos de seca e chuva, mas a nossa principal fonte energética, as hidrelétricas EPE (2018, p. 16), não acompanham esse ritmo. Não obstante, a demanda por energia elétrica também vem aumentando nos últimos anos e tem projeção de aumento para os próximos 10 anos EPE (2017, p. 54), o que agrava ainda mais a situação do nosso sistema de distribuição e geração centralizada.

Os sistemas de geração distribuídos são aqueles que geram a energia em locais próximos das unidades consumidoras e tem algumas características vantajosas em relação a geração centralizada, como por exemplo:

- Várias fontes produzindo energia geram uma estabilidade maior na rede;
- Como a distribuição ocorre em lugares próximos, o seu custo é reduzido;
- Diminuição das perdas nas linhas de transmissão.

Além dessas vantagens, os sistemas de geração distribuídos são geralmente baseados em fontes renováveis, não tendo problemas de agressão ao meio ambiente, porém, é preciso salientar que apesar das vantagens, a rede de distribuição não é dimensionada para uma matriz de geração distribuída, portanto, além do interesse da unidade consumidora em aderir à geração distribuída, é necessário que seja feita uma vistoria da distribuidora para avaliar o projeto e adequar sua estrutura para receber a nova unidade.

De uma maneira geral, a ANEEL tem feito um esforço considerável para melhorar a distribuição da matriz energética brasileira. Exemplo disso foi a aprovação da RN nº 482/2012 que permitiu ao consumidor gerar sua própria energia e ainda devolver o excedente para a empresa de distribuição de sua localidade, gerando saldo positivo. Outra atuação importante foi tratada na resolução normativa nº 733/2016 que instituiu a modalidade de tarifa branca, incentivando os consumidores a consumirem em horários de

menor demanda caso sua rotina se adeque. Tudo isso na intenção de melhorar o sistema de distribuição brasileiro.

Utilizando as vantagens da tarifa branca, o trabalho busca mostrar soluções economicamente viáveis de armazenar energia durante os horários fora de ponta para devolvê-la à unidade consumidora durante os horários intermediários e de ponta, almejando a diminuição do valor da conta de energia da casa mesmo sem alterar drasticamente os hábitos de seus moradores. Esse armazenamento pode ser feito não apenas por baterias, mas também por outros meios, como armazenamento por hidro-bombeamento, super capacitores, entre outros.

O fato de não alterar significativamente os hábitos dos moradores pode passar despercebido, mas tem considerável importância nesse trabalho, pois a tarifa branca é unicamente recomendada para casas em que haja mínimo consumo de energia nos horários de ponta, então, caso opte pela tarifa branca, esse público já tem a conta com valor reduzido e não faz parte do escopo desse trabalho.

Existem dois problemas a serem solucionados: O primeiro é o alto custo da energia elétrica, que além de não ter projeção de redução, ainda sofre com as variações do preço em função da ligação das termelétricas. O segundo é o superdimensionamento da rede de distribuição para atender o consumo nos horários de ponta, que é bem maior que o consumo nos horários fora de ponta e acaba elevando o custo da rede por causa de uma demanda que só ocorre em uma parte do dia.

Objetivo Geral

Monitorar o consumo de uma residência padrão através de medições diretas na rede para propor solução utilizando a tarifa branca que auxilie na redução do valor da conta de energia sem alterar os hábitos dos moradores, avaliando se a eventual instalação de equipamentos é financeiramente viável.

Objetivos específicos

Para obter o objetivo final do projeto, são necessários objetivos menores que levam até o resultado, sendo eles:

- Montar o medidor de corrente e tensão;
- Gerar curva de carga;
- Dimensionar baterias e inversor;
- Efetuar análise de investimento.

1 Referencial teórico

1.1 Resposta da demanda

Resposta da demanda são ações realizadas sobre o preço da energia elétrica para regular o seu uso em razão das condições de geração, fornecimento, ambientais e outras. A aplicação prática da resposta de demanda segue classificação baseada em dois tipos: Em incentivos (Resposta da demanda baseada em incentivos - RDBI) e em tarifais (Resposta da demanda baseada em tarifas - RDBT) [Silva \(2018\)](#). Uma das subdivisões da RDBT é a tarifação por posto horário (difundida no inglês como *time of use - TOU*), de onde provém o sistema de tarifa branca.

1.1.1 Tarifa branca

A tarifa branca é dada como uma tarifa horo sazonal, que é caracterizada por diferenciar valores cobrados pelo Quilowatt-hora de acordo com o horário de utilização. No caso específico da tarifa branca, o consumidor paga valores diferentes de acordo com o horário do dia e o dia da semana, sendo aplicável apenas para as unidades consumidoras atendidas por baixa tensão, o denominado grupo B ([ANEEL, 2016](#)).

Aos sábados, domingos e feriados a tarifa branca é constante em um valor inferior à tarifa convencional, não importando o horário que seja realizado o uso da energia elétrica. Entretanto, nos dias úteis, o valor da tarifa branca varia em três horários distintos ([ANEEL, 2015](#)):

- Horário de ponta: Onde ocorre a maior demanda de energia.
- Intermediário: Geralmente uma hora antes e uma hora depois do horário de ponta.
- Fora de ponta: Horários com menor demanda de energia

A figura 1 é apenas uma ilustração da variação da tarifa branca ao longo do dia. É possível inferir que a diferença entre a tarifa branca e a convencional nos horários de ponta é bem maior do que a diferença entre a tarifa branca e a convencional nos horários fora de ponta, e é isso mesmo que acontece em todas as concessionárias de energia elétrica do Brasil.

A companhia energética de Brasília aderiu à tarifa branca assim que foi regulamentada pela ANEEL, em 2018, trazendo essa modalidade de cobrança ao Distrito federal, que ficou na frente de outros estados, como o Goiás, que ainda não oferecem esse tipo de

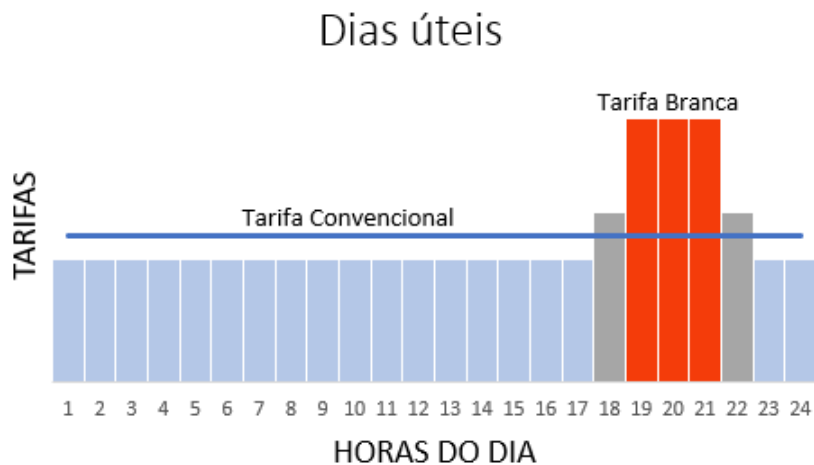


Figura 1 – Gráfico ilustrando o funcionamento da tarifa branca. Adaptado de [ANEEL \(2015\)](#)

tarifa aos consumidores. No DF, o horário de ponta é entre 18h e 21h, sendo os horários intermediários 1 hora antes e 1 hora depois do horário de ponta. Os demais horários são definidos como fora de ponta ([CEB, 2017](#)). A cobrança é feita da seguinte forma:

Tabela 1 – Alteração percentual do valor da tarifa branca em relação à tarifa comum no DF.

Horário	Variação do Preço
Fora de Ponta	-14,5%
Intermediário	+16,9%
Ponta	+80,6%

Assim que o usuário opta pela tarifa branca, a concessionária de energia elétrica tem um prazo de 30 dias para efetuar a troca do medidor de energia da unidade consumidora, sendo a concessionária a responsável por custear os valores de aquisição e instalação do equipamento com funcionalidades mínimas para atender o disposto na legislação ([ANEEL, 2016](#)).

A alta demanda de potência em um curto espaço de tempo na maior parte das residências, que são os horários de ponta, força as operadoras a super dimensionarem os seus sistemas de geração, transmissão e distribuição ([TOME, 2014](#)). Assim, todo o sistema elétrico é dimensionado para uma demanda que vai operar a maior parte do tempo fora da sua capacidade máxima.

1.2 Acumuladores de Energia

Para chegar ao objetivo do projeto é imprescindível o uso de acumuladores de energia. Existem várias tecnologias para armazenamento de energia e são divididas em cinco categorias: Armazenamento eletroquímico, mecânico, térmico, químico ou eletromagnético (AMROUCHE; REKIOUA, 2015).

Embora existam maneiras diferentes de armazenar energia em cada uma das categorias citadas acima, o projeto se limitará a tratar apenas das que possuem viabilidade comercial e aplicabilidade no atual contexto, para que a exequibilidade do projeto não seja comprometida por irrealidades que ainda nem chegaram ao mercado.

1.2.1 Baterias

Baterias são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica e seu funcionamento envolve o fluxo de elétrons de um terminal para o outro devido às reações químicas que ocorrem em seu interior. Importante lembrar que o fluxo de um terminal para o outro ocorre sobre um circuito externo, e quando se fecha esse circuito, há um fluxo de corrente. Assim, toda a corrente que passa sobre o circuito alimentado pela bateria passa por dentro da bateria também (AAS, 2016).

As baterias recarregáveis conseguem converter energia elétrica em energia química para depois liberá-la na forma de energia elétrica novamente, em um momento oportuno em que haja necessidade.

Pode-se dividir as baterias de duas maneiras: Baseado nos elementos que participam da sua reação química ou na aplicação desejada. Se utilizarmos a primeira definição, temos as baterias de níquel-cádmio, níquel metal hidreto, íons de lítio, sódio-enxofre (sal fundido) entre outras. Porém, se a definição for baseada na aplicação, nós temos as baterias de partida, baterias tracionárias e baterias estacionárias. Cada tipo de bateria tem características que se enquadram em aplicações diferentes, variando, por exemplo, a espessura e área de contato dos eletrodos e a maneira de armazenamento do eletrólito em seu interior.

Até o momento, as tecnologias de baterias recarregáveis disponíveis no mercado são extremamente sensíveis ao modo de uso, dessa forma, se ela passa por ciclos muito profundos de descarga ou se ela sofre cargas ou descargas a correntes muito elevadas o seu tempo de vida é consideravelmente reduzido. Esses fatores devem ser levados em conta no dimensionamento de qualquer sistema que utilize baterias.

Alguns conceitos importantes sobre baterias são listados abaixo:

- Profundidade de descarga: Quantidade de uso da carga da bateria por vez. Se for utilizada 20% da carga nominal, diz-se que a profundidade de descarga é de 20%.

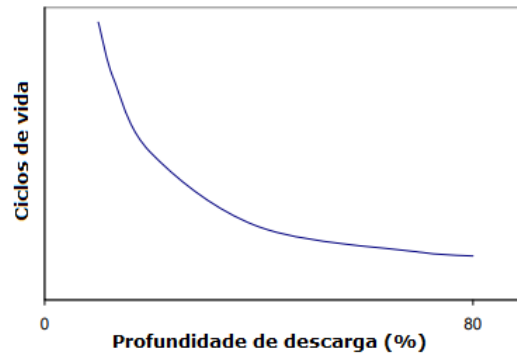


Figura 2 – Ciclo de vida em relação à profundidade de descarga. (IEEE, 2008)

Quando a profundidade de descarga está entre 10% e 20%, este ciclo é chamado de ciclo raso de descarga. Por outro lado, quando a profundidade de descarga está entre 50% e 80%, temos um ciclo profundo de descarga.

- Taxa de descarga (C-Rate): É a relação entre a corrente drenada da bateria e sua capacidade nominal em Ah. Se uma bateria completamente carregada opera à taxa de 1C e tem a capacidade nominal de 100Ah, então ela consegue drenar 100A por uma hora. Se essa mesma bateria opera em 2C, então ela consegue drenar 200A num intervalo de 30 minutos, idealmente. Essa taxa pode ser dada em números menores que 1, como 0.5C, que representa uma descarga de 50A durante duas horas (BUCHMANN, 2017). Salienta-se que taxas altas de descarga ocasionam perdas que diminuem a capacidade nominal da bateria, ou seja, se uma bateria possui 1Ah de carga quando descarregada 0.25C, ela não demonstrará essa mesma capacidade se descarregada a 2C. A Figura 3 mostra o efeito das perdas pelas altas taxas de descarga:
- Ciclos de vida: Quantidade de vezes que a bateria consegue ser carregada e descarregada até atingir 80% da sua capacidade inicial. Um ciclo é um processo de carga e descarga da bateria até a profundidade de descarga especificada.
- Eficiência de carga: É definida como a razão da quantidade de energia em Watt-hora descarregada da bateria pela quantidade de energia em Watt-hora até a recarga completa. Em baterias de chumbo-ácido esse valor gira em torno de 75% (IEEE, 2008).

As baterias estão em alta no cenário mundial e o seu valor está no meio do caminho para a difusão de tecnologias como carros elétricos, porém, a projeção é de redução desse valor dentro dos próximos anos. Na Figura 4 nota-se que o valor do kWh tem potencial promissor nos próximos anos, sofrendo, no cenário mais realista, uma diminuição de aproximadamente 33% no valor até 2030.

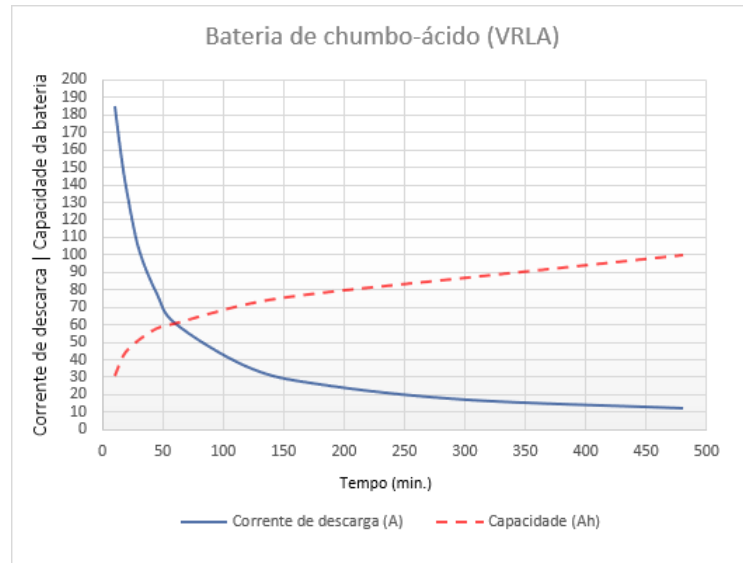


Figura 3 – Não linearidade causada pelas perdas em altas taxas de descarga. Capacidade nominal também depende da taxa. Gráfico baseado nas informações de [SBS \(2017\)](#)

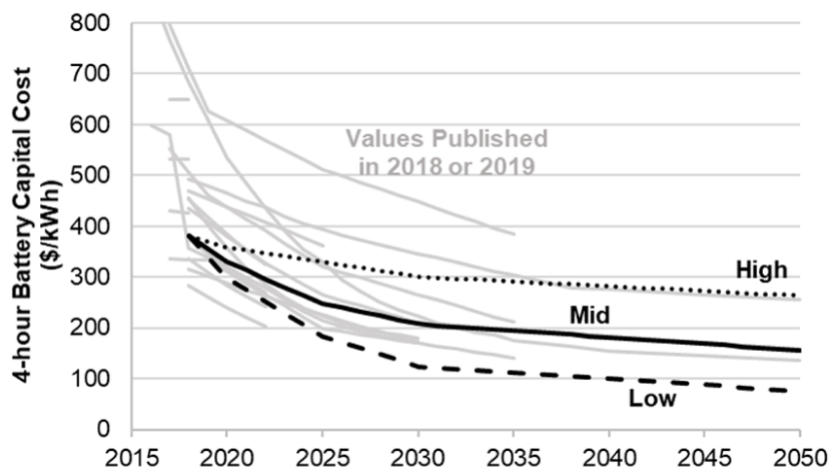


Figura 4 – Projeção do custo das baterias de lítio até 2050 ([NREL, 2019](#))

1.2.2 Acumuladores Mecânicos

Dentre os acumuladores mecânicos estão o acumulador em disco giratório (*flywheel*), que armazena energia cinética em um disco que gira numa câmara selada a vácuo, para reduzir o atrito das rotações, e quando necessário o disco é acoplado a um gerador, convertendo a energia cinética em elétrica novamente. Outra maneira de se armazenar energia mecanicamente é pressurizar um compartimento enquanto tem excedente de energia elétrica, e utilizar essa pressão posteriormente para gerar energia elétrica nos momentos demandados ([AMROUCHE; REKIOUA, 2015](#)). A Ênfase, porém, será dada aos acumuladores mecânicos de armazenamento por hidro-bombeamento, pois diferentemente dos outros citados, ele não demanda alta tecnologia nem muitas preocupações com segurança

na sua instalação.

A Figura 5 mostra o esquemático do sistema de armazenamento de energia por bombeamento hidráulico. Nessa configuração ele opera longe de rios, em reservatórios artificiais e em malha fechada.

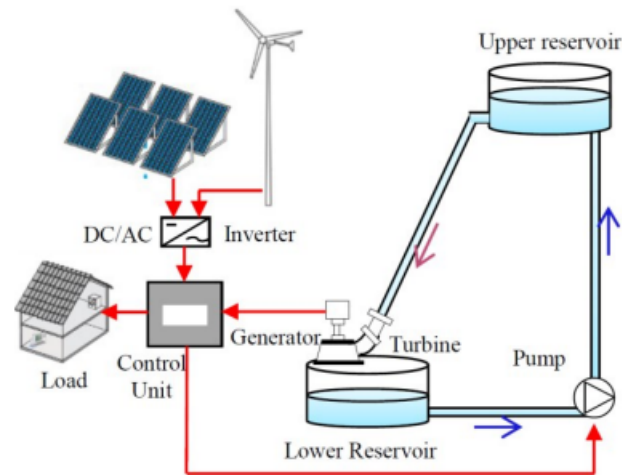


Figura 5 – Esquemático do armazenamento por bombeamento de água. Imagem retirada de [Ekoh, Unsal e Maheri \(2016\)](#)

1.3 Inversores de frequência

Inversores são responsáveis por converter corrente contínua em corrente alternada. Podem funcionar com onda quadrada, onda modificada e onda senoidal pura. A onda modificada é uma onda quadrada com vários níveis de tensão.

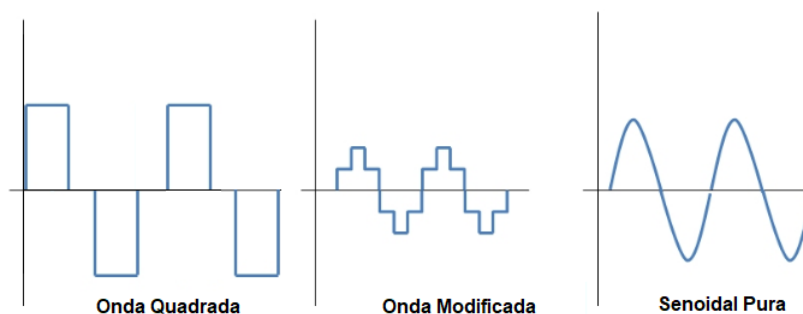


Figura 6 – Tipos de forma de onda na saída dos inversores ([PENNSTATE, 2018](#))

Dos três citados acima, o que tem maior eficiência e melhor desempenho é o de senóide pura, por inserir menos harmônicos na rede. Ele opera geralmente com 3 tipos de modulações: Pulse-width modulation (PWM), Pulse-frequency modulation (PFM) e Pulse-amplitude modulation (PAM) ([TOSHIBA, 2018](#)). Será dada preferência aos modelos com saída senoidal pura, pois ao contrário dos outros citados, ele tem compatibilidade

com qualquer tipo de carga (indutivas, capacitivas e resistivas), permitindo ligar todos os dispositivos da casa.

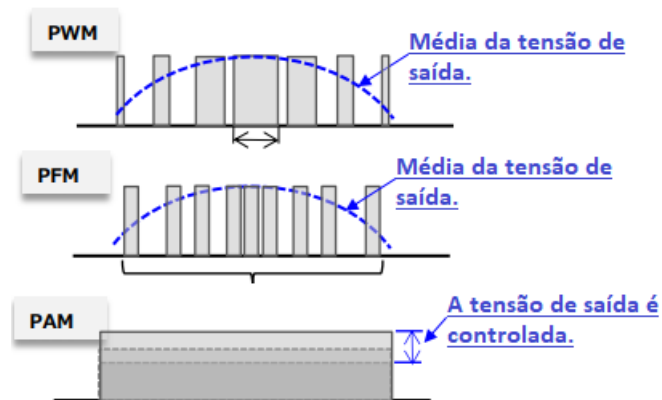


Figura 7 – Modulações utilizadas em inversores puramente senoidais. (TOSHIBA, 2018)

As aplicações dos inversores incluem o seu uso no controle de motores bem como em aplicações domésticas, pois os equipamentos da casa são feitos para trabalharem com a corrente alternada entregue pela concessionária de energia.

2 Metodologia

Para se ter uma referência em outros projetos, os equipamentos utilizados pelos três habitantes da casa são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Equipamentos utilizados na casa.

	Equipamento
Sala	TV
	Lâmpadas
	Diversos
	Ar-Condicionado
Cozinha	Geladeira
	Lâmpadas
	Filtro
	Micro-ondas
Banheiro 1	Lâmpadas
	Chuveiro
Banheiro 2	Lâmpadas
	Chuveiro
Quarto 1	PC
	Lâmpadas
Quarto 2	Notebook
	Lâmpadas
Quarto 3	Lâmpadas

2.1 Levantamento do consumo

Pretende-se observar, utilizando equipamentos de medição, o comportamento da casa como um todo em relação ao consumo de potência elétrica e, caso necessário, observar o comportamento individual de alguns equipamentos como geladeira, filtro e condicionador de ar, que possuem mecanismos de liga-desliga que fazem o consumo médio ser bem inferior ao consumo máximo. Será montado um medidor baseado em microcontrolador com dois sensores integrados, sendo um para medir tensão e outro para medir corrente. Com esses dois parâmetros pode-se extrair a potência, que é apenas o produto entre eles, a energia, que é a integral da potência e até mesmo o fator de potência - Não implementado no medidor do projeto, que se configura como a defasagem da corrente em relação à tensão e é observado apenas em circuitos com características indutivas ou capacitivas.

- ESP 32: A primeira opção apontada era utilizar um microcontrolador e uma raspberryPi para realizar a aquisição de dados. O microcontrolador seria responsável

por ceder seus conversores A/D para efetuar a leitura dos sensores (ambos analógicos) e depois transferir os dados para a raspberryPi através de algum protocolo de comunicação. A raspberryPi, por sua vez, seria responsável por enviar os dados para um servidor, para que pudessem ser analisados em momento posterior. Porém, a ESP32 apareceu como uma ferramenta versátil e barata, conseguindo realizar a função dos dois dispositivos de maneira mais prática e menos onerosa.



Figura 8 – ESP32 na plataforma DevKitC, utilizado no projeto. Fonte: [Mouser \(2018\)](#)

- Sensor de corrente: O sensor de corrente será utilizado para que seja possível, juntamente com o sensor de tensão, medir a potência consumida pela casa. Apenas o chuveiro consome em torno de 25A quando ligado, por isso, o sensor deve suportar, no mínimo, 50A para trabalhar com segurança e precisão quando a casa demandar muita corrente. Será utilizado um sensor indutivo não invasivo por questões de segurança e capacidade de medição, já que os sensores não invasivos encontrados no Brasil suportam no máximo 30A.



Figura 9 – Sensor de corrente não invasivo. Fonte: [YHDC \(2015\)](#)

- Sensor de Tensão: Sabe-se que a distribuição para a classe residencial em Brasília opera com tensão de 220V, porém, a tensão sofre variações em função da demanda e da localização. Por isso a tensão também será monitorada. Esse circuito utilizou um transformador, para abaixar a tensão da rede e evitar problemas durante o manuseio, e um par de resistores para dividir a tensão apropriadamente e permitir a leitura no conversor A/D da ESP32.
- ThingSpeak: Para armazenar os dados ao longo do dia, foi utilizado um serviço da MathWorks chamado Thingspeak. É um servidor que armazena os dados em tempo

real e tem a vantagem de poder ser acessado de qualquer lugar. Outros benefícios de utilizar um servidor é o fato de que não precisa adicionar nenhum módulo de memória à ESP32 e nem deixá-la cabeada, permitindo que o sistema de medição fosse colocado em locais mais propícios.

A norma IEC 61000-4-7 estabelece, para redes de 60Hz, janela mínima de 12 ciclos. Além disso, a IEC 61000-4-30, que faz definições em relação à medição de distorções harmônicas, estabelece minimamente 40 harmônicos para uma boa definição da rede (FAU, 2014). Entretanto, o sistema de medição faz, a cada 20s, amostragem de 60 ciclos a 2KHz, atingindo 16 harmônicos, já que esse trabalho não tem o intuito de avaliar distorções harmônicas. Ao fim dos 60 ciclos é calculado o valor RMS de corrente e de tensão e em seguida a potência. Os valores de Data, hora, tensão, corrente e potência são então enviados ao ThingsPeak ao longo do dia. Depois de 24h nesse regime, os dados são baixados.

2.2 Priorização de funcionamento

A curva de carga revela o momento do dia onde está concentrada a demanda de energia da casa, então ela traz informações importantes sobre consumo e permite sugerir a alteração de horários de uso de alguns equipamentos para períodos de tarifa branca fora de ponta. Serão listados os equipamentos e então calculada a economia gerada pelo deslocamento horário, se houver.

2.3 Dimensionamento

Com os dados de consumo da casa e com o deslocamento horário dos equipamentos feito, sobrarão os equipamentos essenciais que devem operar em horário de pico e seus respectivos consumos. Essa informação mostra a potência mínima para manter a casa operando no horário de ponta e permite o dimensionamento dos acumuladores e conversores, caso necessário. Nesse momento serão comparados os custos de implementação dos diversos sistemas (Acumuladores + Conversores) já aplicados à realidade da casa, ou seja, mostrando custos mais realísticos de implementação para aquela necessidade.

2.4 Investimento e Retorno

Após optar pelo sistema acumulador/conversor mais barato, será calculado o tempo de retorno do investimento, tendo como entrada no fluxo de caixa os valores poupados provenientes da tarifação branca e como saída os investimentos necessários para instalar o sistema, deixando-o operacional.

3 Descrição do trabalho

3.1 Primeira etapa

A primeira etapa consistiu na montagem do circuito de medição de consumo, utilizando a ESP32, o sensor de corrente e o sensor de tensão. O sensor de corrente é do tipo não invasivo e foi conectado à rede logo na entrada da caixa de disjuntores, onde passa toda a corrente da casa, já o medidor de tensão foi acoplado à tomada mais próxima do quadro de disjuntores.

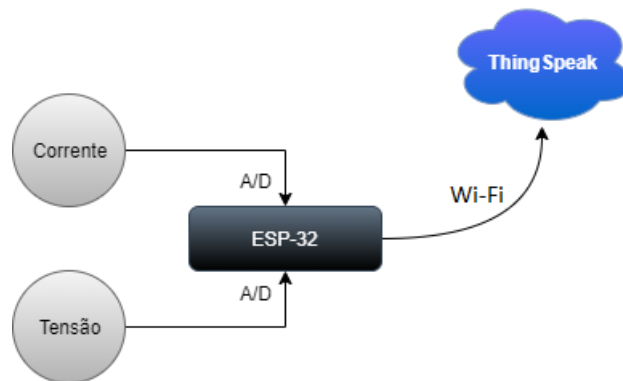


Figura 10 – Diagrama da montagem de aquisição de dados.

3.1.1 Circuitos

Os dois sensores lidam com ondas que excursionam para valores negativos e isso gera incompatibilidade com o conversor analógico-digital da ESP32, que só suporta valores positivos. Por isso, ambos os circuitos receberam um divisor de tensão simétrico para elevar o nível DC na entrada do conversor. Para medir a tensão, o circuito foi isolado por um transformador de 220Vac/10Vac com sua saída ligada em um outro divisor de tensão que já leva à porta da ESP32, como mostra a Figura 11.

Como o valor de pico no secundário é $10\sqrt{2} = 14,1V$ e a excursão máxima permitida na saída do circuito é de metade da tensão de alimentação do microcontrolador, por causa do divisor simétrico de tensão que adiciona um *offset* de 1,65V, então o divisor de tensão que leva à entrada do ADC tem a função de atenuar o valor de pico do secundário em 10 vezes.

A corrente foi monitorada através de um transformador com proporção de 100A:50mA, portanto, a cada 1A medido no condutor, 0,5mA passam pelo circuito de medição. Para que esse valor pudesse ser lido pelo microcontrolador, ele deve ser convertido em tensão

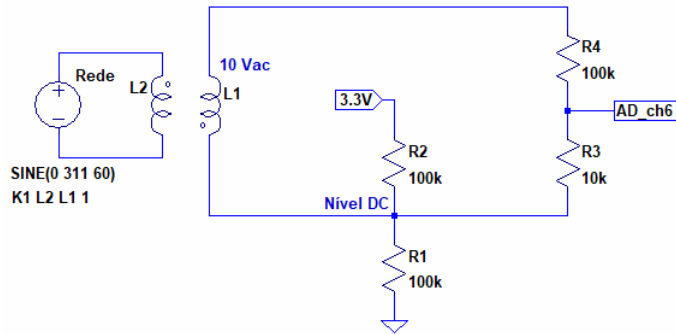


Figura 11 – Circuito para medir tensão.

através de um resistor. O valor desse resistor deve ser calibrado de acordo com a corrente a ser medida: Como o valor de entrada do ADC é limitado a uma excursão de 3,3V é importante que a queda de tensão no resistor seja limitada. Dessa forma, caso o valor de corrente a ser medida seja alto, o valor do resistor deve ser baixo e vice-versa.

Estimou-se que a casa drenaria no máximo 60A e então tentou-se inserir a maior resistência possível dentro desse limite. O valor calculado foi de 57 Ohms, que permite chegar a 57A sem saturar o conversor AD e ainda excursiona 142mV com 5A, o que é uma boa resolução. O circuito utilizada está mostrado na Figura 12.

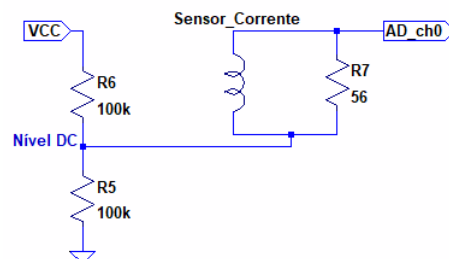


Figura 12 – Circuito para medir tensão.

3.1.2 Software

Todo o programa foi feito na IDE do Arduino. Utilizou-se uma biblioteca para a utilização dos conversores AD de maneira mais eficaz, uma para a API ThingSpeak e outra para o Wi-Fi. A rotina para a leitura dos dados é baseada nos seguintes passos:

- Ler o valor bruto do ADC através da função `adcX_get_raw(ADCX_CHANNEL_Y)`, onde X é o ADC a executar a leitura e Y é o canal desejado.
- Subtrair o nível DC do valor lido anteriormente e multiplicar o valor por constantes dependentes do divisor de tensão utilizado, da referência do ADC e da resolução;
- Chamar a função que calcula o valor RMS. Havia um problema na leitura que era a variação abrupta dos valores na senoide, picos repentinos causados pelo ADC

```

56 while (x < n_amostras) {
57     adcl_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
58
59     val_lido_v = adcl_get_raw(ADC1_CHANNEL_6);           //valor bruto do ADC
60     val_conv_v = val_lido_v - val_medio_v;             //valor do ADC retirado o nível DC
61     val_voltage[x] = (val_conv_v) * (208) * (3.3) / 4096; //valor de tensão retirado o nível DC
62
63     val_lido_c = adcl_get_raw(ADC1_CHANNEL_0);           //valor bruto do ADC
64     val_conv_c = val_lido_c - val_medio_c;             //valor do ADC retirado o nível DC
65     val_current[x] = (val_conv_c) * (28) * (3.3) / 4096; //valor de corrente retirado o nível DC
66
67     delayMicroseconds(500);                             //Frequencia de amostragem
68     x++;
69 }

```

Figura 13 – Trecho do código onde é feita a leitura do ADC.

que apareciam quando a medição de corrente se mantinha em um valor constante. Esse erro foi solucionado com um laço percorrendo o vetor e alterando os valores na posição $n+1$ do vetor para o valor de n caso o valor da posição $n+1$ fosse 3 vezes maior que o valor da posição n . Em seguida, o vetor é organizado em ordem crescente, sendo utilizadas 40 amostras imediatamente antes das 10 últimas, que são ignoradas, pois podiam conter valores ainda um pouco discrepantes. É então feita uma média com essas 40 amostras e o valor dessa média é dividido por raiz de dois, e retornado;

- Enviar os dados para o ThingSpeak. O uso do ThingSpeak necessita de chaves de acesso únicas para cada canal.

```

120 // ThingSpeak information
121 char thingSpeakAddress[] = "api.thingspeak.com";
122 unsigned long channelID = 11111;
123 char* readAPIKey = "XXXXXXXXXXXXXXXX";
124 char* writeAPIKey = "XXXXXXXXXXXXXXXX";
125 unsigned int campo1 = 1;
126 unsigned int campo2 = 2;
127 unsigned int campo3 = 3;
128
129 int write2TSDData( long TSChannel, unsigned int TSField1, float field1Data,
130                  unsigned int TSField2, float field2Data,
131                  unsigned int TSField3, float field3Data){
132
133     ThingSpeak.setField( TSField1, field1Data );
134     ThingSpeak.setField( TSField2, field2Data );
135     ThingSpeak.setField( TSField3, field3Data );
136
137     int writeSuccess = ThingSpeak.writeFields( TSChannel, writeAPIKey );
138
139     return writeSuccess;
140 }

```

Figura 14 – Parâmetros necessários para o ThingSpeak juntamente com a função de envio de dados.

3.2 Segunda etapa

O que se propõe nessa parte do trabalho é um sistema conectado à rede de distribuição local e que adote o sistema de tarifa branca. Será equipado com armazenadores de energia que tenham capacidade de suprir a demanda da casa nos horários em que o custo tarifário é maior utilizando apenas a energia acumulada nos horários fora de ponta. Esse sistema será teórico e não terá nenhum tipo de montagem prática, apenas será utilizado como embasamento para os cálculos, dessa forma, o projeto será realizado para uma unidade específica com padrões de consumo pré-estabelecidos pelo levantamento da sua curva de carga, então os resultados aqui obtidos não serão um indicativo da aplicabilidade do sistema em qualquer cenário.

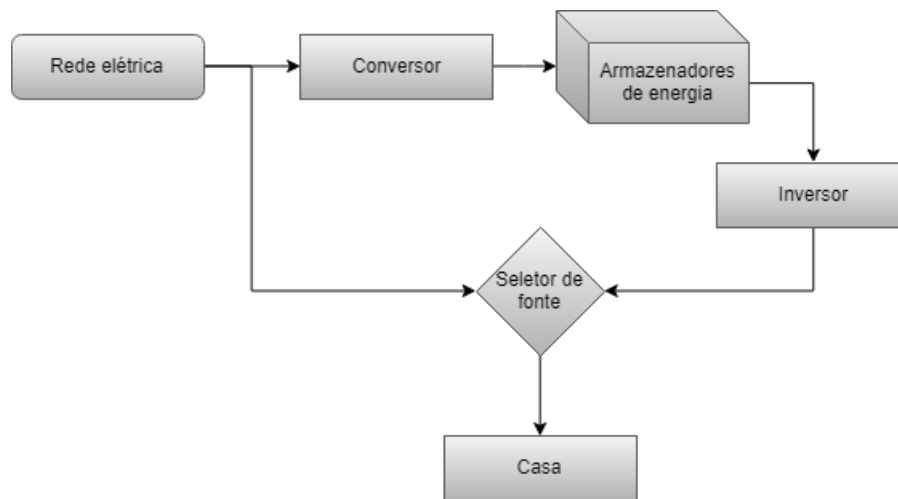


Figura 15 – Diagrama do sistema proposto.

Na Figura 15, o bloco conversores tem como entrada a energia da rede para executar sua função de transformá-la na forma de energia aceita pelo armazenador. Dessa forma, se for usado um banco de baterias, o conversor seria o carregador, porém, para um sistema PHS, o conversor pode ser entendido como a bomba, pois esta é responsável por transformar a energia elétrica que vem da rede em energia potencial elevando o nível da água em relação ao gerador.

O bloco inversor será utilizado em caso de baterias ou geradores de corrente contínua, porém, caso o gerador seja senoidal, no lugar dos inversores deve ser adicionado um controlador de carga para assegurar a qualidade dos níveis de tensão e corrente gerados.

O seletor de fonte é apenas um dispositivo capaz de alterar entre a rede ou a fonte auxiliar se baseando no horário. Assim, quando estiver em horários de ponta e intermediário, ele automaticamente seleciona a fonte auxiliar, mas faz o contrário caso esteja em horário fora de ponta.

4 Dados e dimensionamento do sistema

4.0.1 Estimativa de consumo

O consumo da casa foi monitorado por duas semanas, do dia onze de setembro até o dia 27, mas apenas uma semana já rendeu uma boa representatividade do consumo da casa nesse período do ano. As curvas de carga foram levantadas para dar embasamento ao descrito no capítulo dois: A casa tem demanda nos horários intermediários e horário de ponta? Se sim, é possível deslocar o horário de algum equipamento que consome nesses horários mais caros? Quanto custa instalar um sistema para essa casa?

As curvas de carga são gráficos que mostram o consumo de potência em determinados intervalos de tempo. Geralmente são grandes e podem poluir o texto facilmente, por isso, eles serão adicionados em anexo e aqui serão expostos gráficos de rosca mostrando o consumo em horários intermediários e de ponta em relação ao consumo da casa. As 6 horas de horário de ponta e intermediário correspondem a 25% do dia, portanto, espera-se que o consumo da casa durante o horário de ponta seja também, no mínimo, 25% do consumo total da casa, para mostrar que o consumo continua mesmo nos horários intermediários e de ponta.

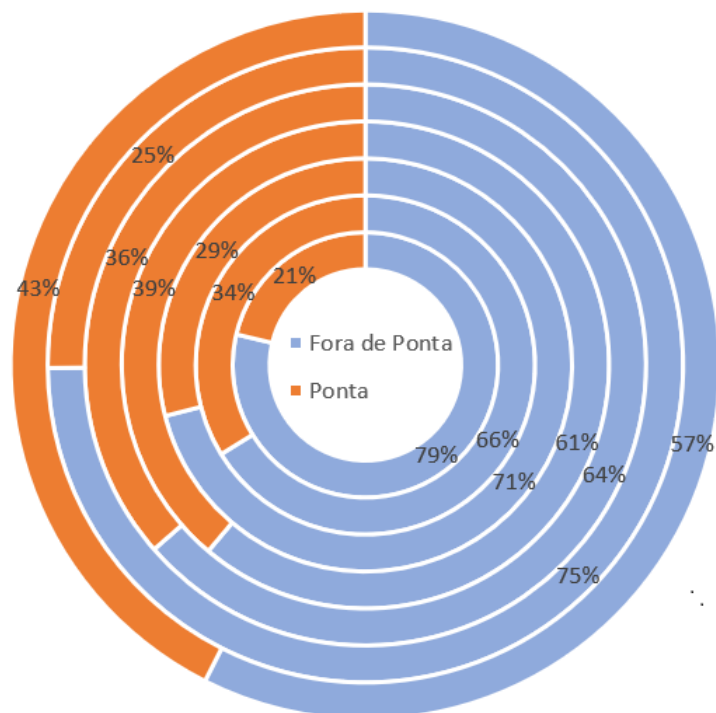


Figura 16 – Proporção de consumo em 7 dias diferentes na semana.

A figura 16 mostra que o consumo na casa nos horários intermediários e de ponta é constante ou até maior em relação ao resto do dia. Durante as medições, foi observado

que os picos de 3500W na curva de carga são referentes ao chuveiro, enquanto os picos de 1200W são gerados pelo forno microondas e o consumo que se mantém constante ao longo do dia, de aproximadamente 300W, é proveniente da geladeira e da TV. Dessa forma, os equipamentos que se mantêm ligados entre 17h e 22h não podem sofrer alteração de horário. O chuveiro, inclusive, é ligado a essa hora pelo fato do banho vir após a finalização das obrigações diárias.

Os valores encontrados trazem uma média de consumo de 1,8kWh/dia nos horários de tarifa intermediária e de ponta, com um desvio padrão de 0,56kWh/dia. Nos sete dias avaliados, o máximo consumo atingido foi de 2,5kWh/dia nesse mesmo horário. É importante salientar que a casa foi monitorada em um período de calor, portanto, os equipamentos de refrigeração estavam operando em longos intervalos, inclusive o ar-condicionado, porém, o chuveiro estava operando no regime de menor potência.

Se a energia é um parâmetro importante para dimensionar os armazenadores, os inversores têm como principal parâmetro a potência máxima drenada da rede pelos equipamentos da casa. Pelas curvas de carga, a moda dos picos de potência é próxima a 3,7kW, mas alguns picos chegaram a valores muito maiores, alcançando 6kW no dia 13/09.

O perfil de consumo da casa foi o ponto de partida para o dimensionamento dos armazenadores e conversores. Serão dimensionados dois sistemas de armazenamento: O de bateria com inversores e o de armazenamento por hidro-bombeamento. A intenção é fazer uma comparação bem direta entre os sistemas, em relação a tamanho, capacidade, eficiência e, obviamente, os custos. Além disso, foi decidido retirar a potência do chuveiro do período em que o sistema fica operando desconectado da rede pois o dispositivo será aquecido de outra forma.

4.0.1.1 Dimensionamento de baterias

Para se iniciar o dimensionamento das baterias, foram utilizados como referência as curvas de carga da casa. Tomou-se a média de consumo como 2,3kWh - Que é a média adicionada ao desvio padrão, e a média de potência como 390W. A intenção é associar as baterias de maneira a otimizar sua vida útil e o custo de instalação. Como as baterias são sensíveis à profundidade e à velocidade de descarga, o intuito foi aumentar a tensão do banco para manter uma baixa corrente e adicionar uma capacidade tal que mantivesse a profundidade de descarga dentro dos padrões para o tipo de bateria. O primeiro passo foi executar o arranjo do banco de baterias de acordo com a capacidade de tensão e de corrente de cada tecnologia. Lembrando que a bateria de Lítio suporta descargas mais profundas e tem maior capacidade de drenar corrente ininterruptamente. As baterias foram dimensionadas a partir do consumo padrão da casa, da eficiência do inversor e, portanto, da corrente drenada na entrada do inversor. Dessa forma, temos que a média de

potência consumida pela casa no horário em questão é de 390W e a eficiência do inversor foi mantida constante em 0,95.

$$P_o = 0,95 * P_i$$

$$P_i = \frac{390}{0,95} = 410W$$

Portanto, as baterias devem suprir uma carga constante de 410W no intervalo de 6 horas em que a casa estará desconectada da rede.

Para atingir os padrões de capacidade de corrente e profundidade de descarga da bateria, os bancos acabaram sendo superdimensionados, mas isso se transformou num ponto a favor do projeto: A bateria alcança o fim de vida quando sua capacidade de retenção de carga não é superior a 80% da capacidade de retenção inicial. Então, como os bancos são maiores do que o necessário para suprir a casa, o banco pode chegar a uma capacidade de retenção bem menor do que os 80% definidos no *end-of-life* da bateria, fazendo com que elas tenha uma vida útil maior do que a especificada no manual.

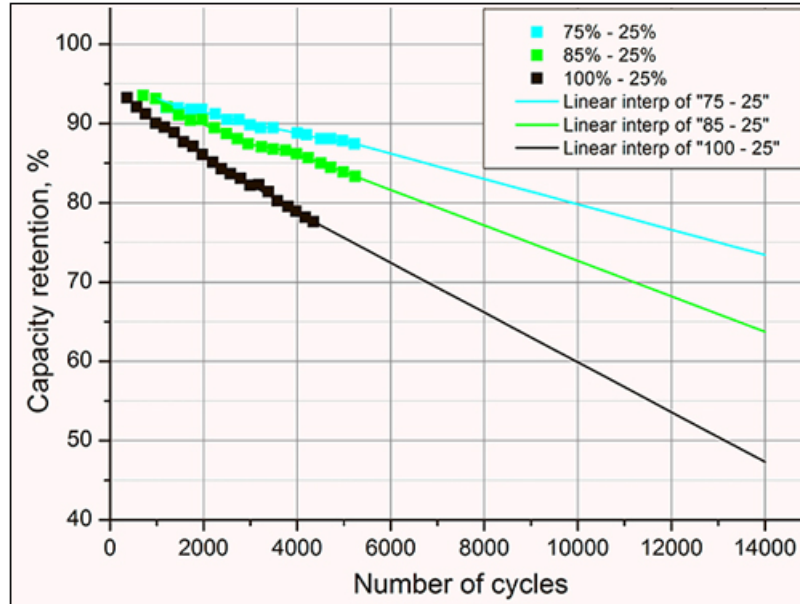


Figura 17 – Retenção em função da quantidade de ciclos. (BATTERY UNIVERSITY, 2017)

A Figura 17 mostra uma extrapolação para a capacidade de retenção das baterias de lítio em função da quantidade de ciclos. Essa é uma aproximação grosseira de primeira ordem e o comportamento não é linear até a descarga completa, mas serve como referência para estimar o tempo de vida.

4.0.1.1.1 Chumbo-ácido

Esse tipo de bateria tem uma vida útil extremamente dependente da profundidade de descarga. Para atingir 1200 ciclos, ela deve ser submetida a descargas de, no máximo, 30% da sua capacidade total. Portanto, o banco de baterias de chumbo ácido dá a impressão de que foi superdimensionado com seus 8,4kWh. Após simular alguns cenários diferentes de tensão e corrente, chegou-se à conclusão de que com 60V o banco operaria com níveis mais viáveis de corrente para as baterias.

$$I = P/V = \frac{410W}{60V} = 6,83A$$

Nas baterias estacionárias de chumbo-ácido a capacidade de descarga é em torno de 0,09C para a quantidade de ciclos almejada, isso dá algo próximo a 6,3A para a bateria de 70Ah escolhida. Mesmo que essa capacidade chegasse a níveis de 0,1C, ainda seria recomendável a associação em paralelo pois o dimensionamento foi feito para o consumo médio, não para o consumo de pico.

As baterias com melhor custo x benefício foram as de 12V - 70Ah da Freedom, que possuem, além de tudo, uma boa documentação disponível. Para alcançar os 60V foram adicionadas 5 unidades em série e para atingir a capacidade de corrente, o banco foi feito com a configuração 5s 2p, totalizando 10 baterias.

Como o banco possui 8,4kWh, então o fim de vida das baterias para o banco em questão vai ocorrer depois dos 1200 ciclos especificados pelo manual. Pela figura 17 a quantidade de ciclos a 30% DoD até chegar em 30% da capacidade de retenção original, pode alcançar facilmente os 3600 ciclos.

4.0.1.1.2 Lítio

As baterias de lítio aqui citadas são do tipo reconduzidas: Além de serem mais baratas que as baterias de lítio novas, foram as únicas disponíveis para compra no Brasil com o mínimo de documentação. Uma bela vantagem desse tipo em relação ao anterior é a de suportar descarga de 90% da capacidade total e atingir, nessas condições, os 1200 ciclos. As baterias disponíveis no mercado operam com 12V - 240Ah e 24V - 120Ah, porém, apesar de um modelo ter o dobro da capacidade de carga, o fabricante recomenda drenar no máximo entre 20A e 30A contínuos em ambos os modelos para alcançar o potencial da carga. Portanto, foi escolhida a de 24V. Após uma série de cálculos em cenários distintos, chegou-se à conclusão de que associar 2 unidades em série seria uma boa saída:

$$I = P/V = \frac{410}{48} = 8,54A$$

Com 120Ah de carga, drenando 5,54A esse banco suporta 14h com a potência média da casa. Ou seja, precisa ser carregado apenas dia sim, dia não. Se duas baterias conseguem manter a casa por 2 dias, uma bateria deveria conseguir manter por um. O problema é que com uma bateria apenas, seriam drenados 17A e, com uma corrente mais alta, a capacidade efetiva da bateria diminui devido a perdas por efeito joule nos terminais. Além disso, não haveria nenhuma margem de segurança para consumos acima da média.

Utilizando-se novamente a Figura 17 como parâmetro, e sabendo que 40% da capacidade do banco de baterias de lítio é suficiente para manter a casa, nota-se que sua vida útil também é triplicada se estipularmos o limite de vida útil como 40% de retenção em relação à capacidade inicial e profundidade de descarga próxima a 85%

Tabela 3 – Comparação entre as tecnologias de chumbo-ácido e lítio (reutilizadas).

	Chumbo-Ácido	Lítio
Tensão Nominal	60V	48V
Carga	140Ah	120Ah
Corrente Nominal	13A	20A
Profundidade de Descarga	30%	90%
Quantidade de células	5S 2P	2S
Energia	8,4kWh	5,7kWh
Custo	R\$ 3.500,00	R\$ 5.200,00

Portanto, pelo custo-benefício as baterias de chumbo-ácido foram as escolhidas para a solução proposta, já que possuem um custo 32,6% menor que as baterias de Lítio além de armazenarem 47% mais energia na comparação dos bancos.

4.0.1.2 Dimensionamento do inversor e do carregador

Caso não haja solicitação por parte do chuveiro, a casa raramente ultrapassa os 500W de potência nos horário de alta tarifação. Isso porquê não há acionamento de forno e nem da máquina de lavar, por exemplo, que são responsáveis pelos picos de 1200W e 1500W, respectivamente. Isso traz a reflexão sobre a necessidade de superdimensionar um inversor para suprir até a demanda do chuveiro ou buscar uma outra alternativa. Nesse caso, optou-se por instalar um aquecedor de passagem a gás. Isso permite o uso de um inversor apenas para atender à demanda padrão da casa. Pelo fato do inversor trabalhar com máxima eficiência em máxima carga, buscou-se um inversor com capacidade próxima à demanda média da casa adicionada de um fator de segurança de 50%, portanto:

$$P = 390W * 1,5 = 585W.$$

A melhor opção encontrada (em custo x benefício) foi um inversor puramente senoidal com capacidade para operar de 42V-60V e com potência máxima de 750VA.

Se por um lado as 6 horas de uso off-grid exigem bastante das baterias, para o carregador sobram 18h para repor a carga consumida nos horários de alta demanda. Por isso, apesar de um banco de baterias parecer assustador para pequenos carregadores, a corrente necessária para completar a carga é dada por:

$$2463Wh/18h = 136,83W$$

$$136,83W/60V = 2,28A$$

Ou seja, apenas 2,28A constantes ao longo das 18h já são suficientes para carregar a demanda solicitada pela casa no horário de ponta. Isso é entregue até mesmo por um carregador de bicicleta elétrica que opera com 60V e até 3A.

4.0.1.3 Dimensionamento do aquecedor por passagem

A vazão do chuveiro da casa foi medida e chegou ao valor de 4,5L/min. Porém, algumas duchas permitem vazão mínima menor que 3L/min. Entretanto, o menor valor de vazão encontrado no mercado é de 7L/min, por isso esse foi o valor adotado. Pela ficha técnica do aquecer, o consumo é de 0,86Kg/h. Estimando um uso diário de 30 minutos por dias para os três habitantes e sabendo que a tarifa de ponta e intermediária só valem para os dias úteis, pode-se estimar o custo mensal:

$$0,5h/dia * 22dias/mês = 11horas/mês$$

$$0,86Kg/hora * 11horas/mês = 9,46Kg/mês$$

Ou seja, será utilizado 73% do conteúdo de um botijão de gás mensalmente. Aproximando o valor do gás a R\$60,00, pode-se dizer que o custo mensal para manter o aquecedor é de R\$43,66. Se utilizarmos um chuveiro elétrico com potência de 3kW (verão) como referência, observa-se que o consumo mensal é em torno de 33kWh. Adotando-se o valor do kWh comum como R\$1,00 e lembrando que no horário fora de ponta a tarifa sofre redução de 14%, obtemos o valor de R\$28,38/mês para manter o chuveiro. Porém, não se pode esquecer que em horário de ponta - cenário do banho - a energia sofre um aumento de 80% em relação ao valor da tarifa comum, levando os mesmos banhos a custarem R\$59,40 por mês. Isso mostra que o aquecedor está no meio termo. Compensa se for utilizado em horário de ponta, apenas.

4.0.1.4 Dimensionamento do sistema de Hidro Bombeamento

Outra maneira proposta durante o trabalho para armazenar a energia foi através do hidro bombeamento, utilizando dois tanques, uma bomba, uma turbina e um controlador de carga. A intenção era que o tanque superior ficasse sobre a laje da casa e o tanque

inferior enterrado no solo, como uma piscina. Pela altura da casa de 3m, deveria ser selecionada uma turbina de baixas alturas, como roda d'água, parafuso de Arquimedes ou turbina Kaplan. Por questões de viabilidade e simplicidade, optou-se por utilizar a primeira. A roda d'água pode alcançar eficiência de 60% a 85%, por isso foi escolhido um valor no meio termo, de 75%, para dar início aos cálculos. A eficiência dos geradores chega facilmente a 98%, permitindo o uso desse valor nos cálculos. Com as perdas citadas acima, a potência requerida na entrada do sistema turbina + gerador é de:

$$P_i = \frac{P_o}{\eta_g * \eta_t} = \frac{390}{0,98 * 0,75} = 531W \quad (4.1)$$

Sabendo que a pressão hidrostática é dada por:

$$p = \rho * g * h \quad (4.2)$$

E que a potência é o produto do fluxo volumétrico Q e a pressão, pode-se calcular o fluxo requerido para manter a potência média: Utilizando a massa específica da água a 25C, a aceleração da gravidade de aproximadamente $9,8m/s^2$ e a altura da casa de 3m, podemos encontrar:

$$Q = \frac{P_i}{p} = \frac{531W}{29,312Pa} = 0,018 \frac{m^3}{s} \quad (4.3)$$

Sabendo que a casa deve ser mantida por 6 horas, é possível calcular o volume do reservatório superior com a equação:

$$V_r = Q * t_u = 0,018 \frac{m^3}{s} * 6h * 3600 \frac{s}{h} = 391m^3 \quad (4.4)$$

Nota-se, nesse passo, que para o sistema em questão, é inviável utilizar o sistema de hidro bombeamento como alternativa à bateria devido à enorme quantidade de água necessária para manter uma potência tão pequena. A título de curiosidade, o volume do reservatório superior equivale a praticamente 40% do volume de uma piscina semi olímpica.

5 Investimento e Retorno

Para calcular o tempo de retorno, a entrada será a diferença entre o valor da tarifa comum e o valor da tarifa branca. Como saída, temos o investimento inicial e os gastos fixos com a conta de energia e gás.

A média do valor da conta de energia da casa é de R\$215,00, então, optando pela tarifa branca, o valor disponível para custear todos os sistemas é de R\$31,18 mensais, que é a diferença entre o valor comum e o valor da tarifa branca. A tabela 4 mostra o valor de todos os investimentos iniciais detalhadamente:

Tabela 4 – Estimativa de custo dos equipamentos.

Produto	Custo	Vida útil
Baterias	R\$ 3500,00	13,6 anos
Inversor	R\$ 1367,00	15 anos
Carregador	R\$ 259,00	15 anos
Aquecedor a gás (kit)	R\$ 550,00	—
Tubulação	R\$ 100,00	—
Misturador	R\$ 150,00	—
Cabos	R\$ 200,00	—
TOTAL	R\$ 6126,00	

A Figura 18 mostra em vermelho os valores investidos no sistema, enquanto as linhas pretas mostram o retorno gerado pelo investimento. O intervalo de tempo é anual, ou seja, o valor de R\$374,16 equivale a 12 parcelas de R\$31,18, já que esse fluxo de caixa não é corrigido pela inflação. Com os parâmetros estipulados nesse estudo, o *payback* para o investimento nunca é alcançado.

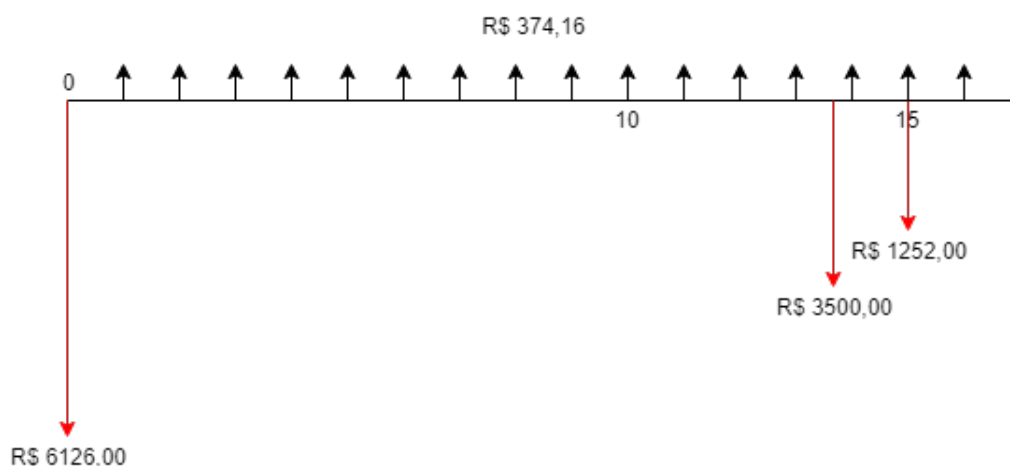


Figura 18 – Fluxo de caixa

6 Discussões e conclusão

No cenário exposto nesse trabalho, não foi estipulado valor nenhum para o sistema de seleção de fonte, portanto, na prática esse sistema seria operado manualmente. Além disso, estipulou-se que a troca do chuveiro elétrico por aquecedor de passagem nos horários de ponta e chuveiro elétrico nos horário fora de ponta será financeiramente equivalente ao uso de um chuveiro elétrico em tarifa comum. Outro ponto que pode beneficiar o sistema é a diminuição do valor dos equipamentos com o avanço da tecnologia, já que o banco de baterias foi o fator limitante no payback devido ao seu alto custo.

O cenário estudado foi apenas um, mas poderiam ser pensadas inúmeras combinações de elementos, criando diversas situações hipotéticas a fim de otimizar o custo inicial e de manutenção, como inserir um aquecedor por acumulação no lugar do aquecedor de passagem, utilizar outra configuração ou outro regime do banco de baterias.

Este trabalho limitou-se a não inserir nenhuma alternativa renovável, por isso essa vertente acabou sendo cortada dos dimensionamentos, mas soluções como aquecedores solares e painéis fotovoltaicos tem grande potencial de viabilizar o projeto, por dois motivos: Reduzem significativamente o uso da energia da rede e se integram facilmente à casa pois ela já possuirá pré disposição para recebê-los no cenário proposto, incluindo o banco de baterias para os painéis fotovoltaicos, que é a parte mais cara de um sistema off-grid.

O fluxo de caixa mostra que os principais motivos para não haver retorno do investimento é a substituição dos equipamentos mais caros ao fim de sua respectiva vida útil, como as baterias e os inversores. Porém, é importante citar que em sistemas fotovoltaicos, por exemplo, os inversores costumam durar mais de 20 anos, mas os dados inseridos aqui são das especificações técnicas dos equipamentos. Além disso, o desenvolvimento tecnológico tende a propiciar baterias com maior densidade de energia, maior durabilidade e menor custo.

Não se pode deixar de lembrar que esse projeto foi dimensionado apenas para a casa em questão e teve suas medições tomadas por um curto período de duas semanas, que podem não representar completamente o perfil de consumo.

Referências

AAS. *How a battery works*. 2016. Disponível em: <<https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>>. Acesso em: 28 de maio. 2019. Citado na página 25.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. *Resolução Normativa 733*. [S.l.], 2016. 3 p. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

AMROUCHE, O. A.; REKIOUA, D. Overview of energy storage in renewable energy systems. Algiers, Argélia, p. 6, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

ANEEL. *Tarifa Branca*. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em: 15 de maio. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 13, 23 e 24.

ANEEL. *Bandeira tarifária em maio é amarela*. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/bandeira-tarifario-maio-2019/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 20 de junho. 2019. Citado na página 21.

BATTERY UNIVERSITY. *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*. 2017. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries>. Acesso em: 28 de novembro. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 39.

BUCHMANN, I. *BU-402: What Is C-rate?* 2017. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate>. Acesso em: 03 de junho. 2019. Citado na página 26.

CEB. *Tarifa Branca*. 2017. Disponível em: <<http://www.ceb.com.br/index.php/component/content/article/83-tarifa-branca/476-tarifa-branca-de-energia>>. Acesso em: 09 de junho. 2019. Citado na página 24.

EBC. *Termelétricas entram em operação com a chegada da seca*. 2018. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-07/termeltricas-entram-em-operacao-com-chegada-da-seca>>. Acesso em: 23 de junho. 2019. Citado na página 21.

EKOI, S.; UNSAL, I.; MAHERI, A. Optimal sizing of wind-pv-pumped hydro energy storage systems. Newcastle upon Tyne, Reino Unido, p. 6, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. *Balanco energético nacional 2018*. [S.l.], 2018. 294 p. Citado na página 21.

EPE. *Projeção da demanda de energia elétrica: Para os próximos 10 anos (2017 - 2026)*. [S.l.], 2017. 95 p. Citado na página 21.

FAU. *Definição dos processos de medição*. 2014. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0105_SRD-Anexo%20I%20_Relat%C3%B3rio_3_FINAL.pdf>. Acesso em: 27 de novembro. 2019. Citado na página 32.

IEEE. *IEEE Guide for Application and Management of Stationary Batteries Used in Cycling Service*. [S.l.], 2008. 41 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 26.

ILUMINA. *A quem interessar possa – Estudo*. 2017. Disponível em: <<https://www.ilumina.org.br/a-quem-interessar-possa-estudo/>>. Acesso em: 20 de junho. 2019. Citado na página 21.

MOUSER. *Vendas*. 2018. Disponível em: <<https://br.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-DevKitC?qs=chTDxNqvsyn3pn4VyZwnyQ%3D%3D>>. Acesso em: 21 de dezembro. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 31.

NREL. *Could Batteries Provide Peaking Capacity on the Grid? With Declining Cost Projections, NREL Analysts See Potential*. 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/program/2019/could-batteries-provide-peaking-capacity-on-the-grid.html>>. Acesso em: 28 de novembro. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 27.

PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY. *Inverters: principle of operation and parameters*. 2018. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/711>>. Acesso em: 02 de junho. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.

SILVA, N. N. R. *Análise da migração de consumidores residenciais para a tarifa branca em sistemas de distribuição de energia elétrica*. Foz do Iguaçu, Brasil, p. 125, 2018. Citado na página 23.

STORAGE BATTERY SYSTEMS. *PL Series AFT Series VRLA Front Terminal Batteries*. [S.l.], 2017. 2 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 27.

TOME, M. C. *Análise do impacto do chuveiro elétrico em redes de distribuição no contexto da tarifa horossazonal*. Campinas, Brasil, p. 81, 2014. Citado na página 24.

TOSHIBA. *DC-AC inverter circuit*. [S.l.], 2018. 3 p. Citado 3 vezes nas páginas 13, 28 e 29.

YHDC. *0.333V split core current transformer*. 2015. Disponível em: <<http://en.yhdc.com/product1311.html?productId=703>>. Acesso em: 20 de junho. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 31.

Anexos

ANEXO A – Curvas de Carga

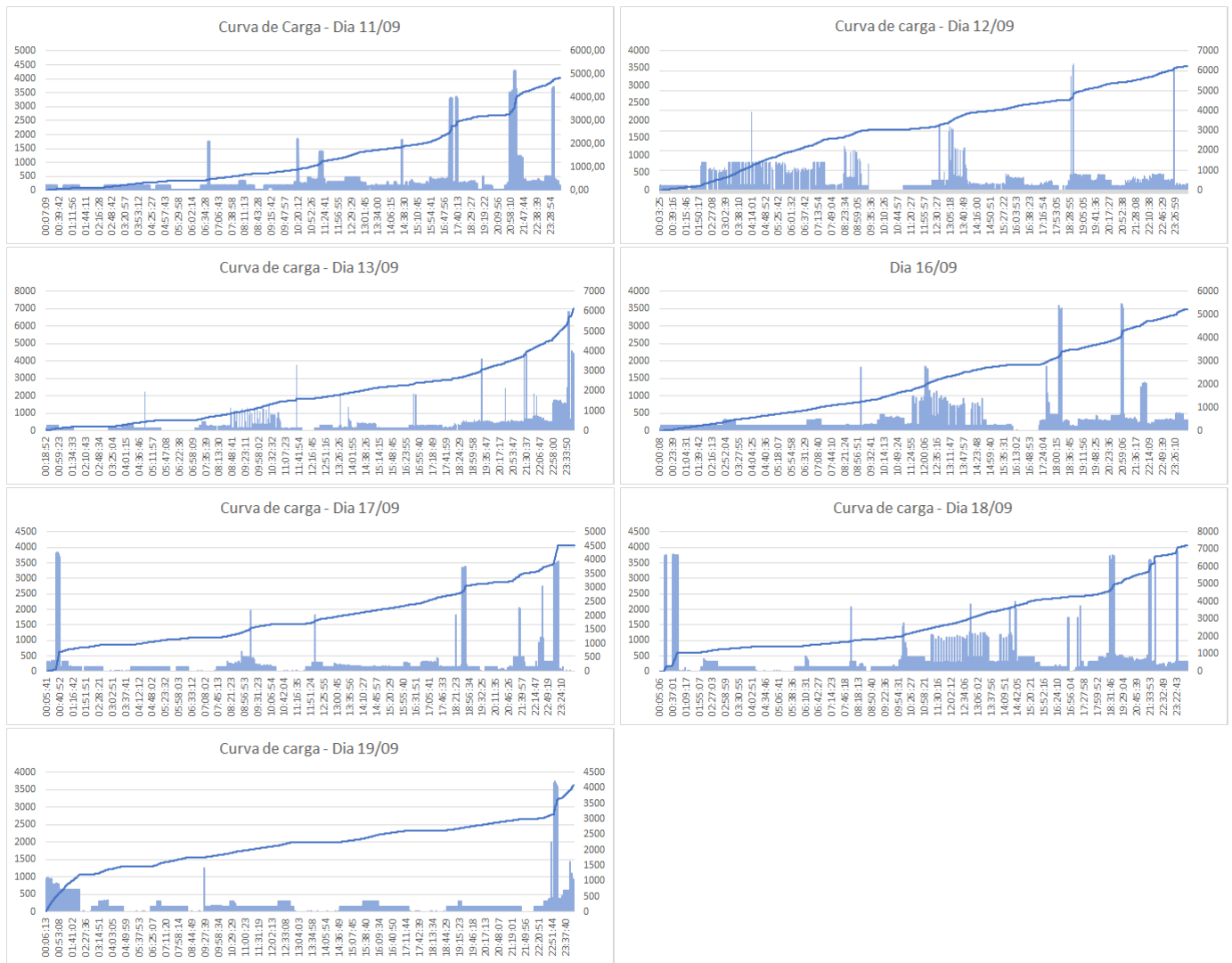


Figura 19 – Curvas de carga medidas apenas em dias úteis. A linha representa a energia consumida.