

Jefferson Ferreira Ventura

# **Estudo da Viabilidade de Implementação de Microrredes c.c. em Consumidores Residenciais**

Belo Horizonte

2019



Jefferson Ferreira Ventura

## **Estudo da Viabilidade de Implementação de Microrredes c.c. em Consumidores Residenciais**

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Thiago Ribeiro de Oliveira

Belo Horizonte

2019



*"A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo."  
- Nelson Mandela*



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha mãe Valda Lúcia Ferreira, pois é graças à seu esforço, dedicação e amor que consegui chegar até aqui. Agradeço também à todos funcionários da Universidade Federal de Minas Gerais que proporcionaram um ambiente oportuno para que a busca por conhecimento não tivesse barreiras. Em especial, gostaria de agradecer ao Professor orientador desta monografia, Thiago Ribeiro de Oliveira, por toda sua paciência, conhecimento e disponibilidade em me guiar nesta última etapa da graduação. Quero agradecer também aos amigos que conheci graças à este curso, eles foram peças chaves para meu sucesso, destaco aqui minhas melhores amigas Ana Paula Vargas de Barros e Mariana Batista Lima, que estiveram presentes nos melhores e piores momentos da vida acadêmica e sempre estão ao meu lado orientando ou apoiando-me. Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu namorado Luiz Eduardo Gouvêa Fernandes, por ter me incentivado e acreditado que eu era capaz.





# Resumo

Nos últimos anos, o sistema elétrico tem passado por muitas mudanças, tanto no perfil de uso da energia, quanto nas formas de geração. Por um lado, a diminuição do preço de painéis fotovoltaicos somada à regulamentação da mini e microgeração distribuída, que instituiu o sistema de créditos de energia, fez surgir um novo mercado para a instalação de centrais de geração em unidades consumidoras de baixa tensão, trazendo economia para estes consumidores. Por outro lado, novos modelos tarifários tem sido introduzidos, como a tarifa branca, onde se busca tornar a variação diária e sazonal do custo de energia transparente aos consumidores e assim promover novos hábitos de consumo que reduzam a demanda existente nos horários de ponta.

Como a geração fotovoltaica se dá no período fora de ponta, a introdução da tarifa branca demandaria que o emprego de um arranjo de maior potência para compensar financeiramente o consumo de energia. Outra solução seria o uso de armazenamento local, que possibilitaria se armazenar o excedente gerado no período fora de ponta, para a injeção no período de ponta, quando o custo da tarifa é significativamente mais elevado. Este trabalho tem como objetivo avaliar este cenário, analisando o custo de soluções existentes no mercado brasileiro de modo a se definir a viabilidade econômica de se empregar microrredes (geração+armazenamento local) em consumidores de baixa tensão. O trabalho simulou diversas condições para sistemas residenciais e comerciais, concluindo que a mudança para tarifa branca, sem a existência de geração distribuída, normalmente não traria benefícios aos consumidores, além disso, um dos principais empecilhos para a adoção de microrredes no cenário atual é o alto custo dos acumuladores. Por fim, o trabalho estima quais as condições necessárias para que tais sistemas se tornem viáveis no futuro.

**Palavras-chaves:** tarifa branca. microrrede. baterias. painéis fotovoltaicos. corrente contínua. controle terciário.



# Abstract

In recent years, the electrical system has undergone many changes, both in the profile of energy use and in the forms of generation. On the one hand, the decrease in the price of photovoltaic panels added to the regulation of the mini and distributed microgeneration, which instituted the system of energy credits, gave rise to a new market for the installation of power plants in low voltage consumer units, bringing savings for these consumers. On the other hand, new tariff models have been introduced, such as the white tariff, which seeks to make the daily and individual variation of the cost of energy transparent to consumers and thus promote new consumption habits that reduce demand at peak times.

As photovoltaic generation occurs in the off-peak period, the introduction of the white tariff would require the use of a higher-power arrangement to financially offset energy consumption. Another solution would be the use of local storage, which would make it possible to store the surplus generated in the off-peak period for the injection in the peak period, when the cost of the tariff is significantly higher. This work aims to evaluate this scenario by analyzing the cost of existing solutions in the Brazilian market in order to define the economic feasibility of using microgrid (generation + local storage) in low voltage consumers. The work simulated several conditions for residential and commercial systems, concluding that the change to white tariff, without the existence of distributed generation, would normally not benefit consumers, in addition, one of the main impediments to the adoption of microgrids in the current scenario is the high cost of accumulators. Finally, the paper estimates the necessary conditions for such systems to become viable in the future.

**Key-words:** white tariff. microgrid. batteries. photovoltaic panels. direct current. tertiary control.



# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Modelo de Geração Distribuída [1] . . . . .   | 21 |
| Figura 2 – Esquemático de uma microrrede [2] . . . . .   | 22 |
| Figura 3 – Comparativo tarifa branca x tarifa convencional [3] . . . . .   | 23 |
| Figura 4 – Exemplo de consumidor utilizando a Tarifa Branca [3] . . . . .  | 24 |
| Figura 5 – Modelo de uma microrrede conectada por um barramento c.c. [4] . . . . .   | 26 |
| Figura 6 – Níveis de controle hierárquico de uma microrrede . . . . .  | 27 |
| Figura 7 – Gasto de Energia Elétrica ao longo do dia por um consumidor residencial   | 29 |
| Figura 8 – Gasto de Energia Elétrica ao longo do dia por um consumidor comercial   | 30 |
| Figura 9 – Diagrama de uma microrrede . . . . .  | 31 |
| Figura 10 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria Estacionária [5]   | 32 |
| Figura 11 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria de Descarga<br>Profunda [6] . . . . .  | 33 |
| Figura 12 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria de Lítio [7] .   | 33 |
| Figura 13 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia<br>Residencial . . . . .   | 37 |
| Figura 14 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia<br>Comercial . . . . .   | 38 |
| Figura 15 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia<br>Residencial sem o uso de baterias . . . . .                               | 38 |
| Figura 16 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia<br>Comercial sem o uso de baterias . . . . .                                 | 39 |
| Figura 17 – Gráfico comparativo de Número de descargas x Profundidade de des-<br>carga para Baterias Estacionárias e Baterias de Descarga Profunda . . . . . | 40 |
| Figura 18 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia<br>Residencial com o uso de baterias . . . . .                               | 40 |
| Figura 19 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria Estacionária . . . . .  | 42 |
| Figura 20 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria de Descarga Pro-<br>funda . . . . .   | 43 |
| Figura 21 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria de Lítio . . . . .  | 43 |



# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação de preços Tarifa Branca e Tarifa Convencional [8] . . . . .   | 24 |
| Tabela 2 – Preço dos itens utilizados na microrrede . . . . .   | 39 |
| Tabela 3 – Preço do kWh de cada item da microrrede . . . . .  | 40 |
| Tabela 4 – Comparativo entre os tipo de tarifações e uso de baterias . . . . .  | 41 |
| Tabela 5 – Análise de investimento e gastos com a concessionária . . . . .  | 41 |
| Tabela 6 – Comparativo dos Preços encontrados no mercado e o preço em que as<br>baterias deveriam ser comercializadas . . . . . | 42 |
| Tabela 7 – Preço Máximo Sugerido das Baterias . . . . .   | 42 |





# Lista de abreviaturas e siglas

|       |   |
|-------|---|
| c.a.  | corrente alternada                        |
| c.c.  | corrente contínua                         |
| GD    | Geração Distribuída                       |
| kWh   | Quilowatt-hora                            |
| kW    | Quilowatt                                 |
| GW    | Gigawatt                                  |
| MW    | Megawatt                                  |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética            |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica      |
| Hz    | Hertz                                     |
| SP    | São Paulo                                 |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais S.A. |
| h     | Hora                                      |
| R\$   | Real                                      |
| Ah    | Ampère-hora                               |
| un.   | Unidade                                   |
| P.U.  | <i>Per-Unit</i>                           |



# Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                         | <b>19</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>              | <b>21</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Definições Básicas</b>                 | <b>22</b> |
| 2.1.1      | Tarifa Branca                             | 22        |
| 2.1.2      | Geração Distribuída                       | 24        |
| 2.1.3      | Microrrede                                | 25        |
| 2.1.4      | Controle Hierárquico                      | 26        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b>                        | <b>29</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Dimensionamento do sistema</b>         | <b>30</b> |
| 3.1.1      | Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos | 30        |
| 3.1.2      | Dimensionamento dos inversores            | 31        |
| 3.1.3      | Dimensionamento das baterias              | 32        |
| 3.1.4      | Do calculo do kWh                         | 34        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS</b>                         | <b>37</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>               | <b>45</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                        | <b>47</b> |
|            | <b>ANEXOS</b>                             | <b>51</b> |
|            | <b>ANEXO A – CÓDIGO MATLAB</b>            | <b>53</b> |



# 1 Introdução

A demanda por energia elétrica vem crescendo com o passar dos anos, só no Brasil, a previsão é um crescimento de 4,3% ao ano até 2023, segundo estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [9]. Com tal aumento existe a preocupação em atender essa demanda, devido ao fato da matriz energética brasileira ser, em sua grande parte, composta por hidroelétricas. A dependência de fatores voláteis, como o volume de chuva para abastecer os reservatórios, traz instabilidade na capacidade de atender a esse crescimento. Tal instabilidade, inclusive, levou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a aprovar uma resolução autorizando o aumento à partir de 1º de Junho de 2019 nas bandeiras tarifárias devido ao deficit hídrico no ano de 2018 [10].

Existe, então, uma necessidade de diversificar o cenário atual utilizando-se de fontes alternativas de energia. Somente de energia eólica há uma previsão de que até o final de 2019 sejam instaladas turbinas capazes de gerar mais de 15GW. Outro setor que está em alta é o de energia fotovoltaica, a redução de custos e um aumento na eficiência dos equipamentos está ajudando na propagação tanto residencial, quanto industrial desse tipo de geração [11], sendo cada vez mais vantajoso para o consumidor utilizar-se de painéis fotovoltaicos para economizar em sua conta de luz.

Para ser mais vantajoso, tanto para o consumidor, quanto para a concessionária, é preciso que a rede de transmissão de energia elétrica se adapte a essas gerações distribuídas e implemente o conceito de *smart grid* no sistema energético brasileiro. Esta rede inteligente utiliza uma comunicação interativa entre os vários ramos da rede, permitindo uma maior eficiência e um controle de fluxo de energia que traz benefícios tanto para os consumidores, quanto para as distribuidoras. As *smart grids* possibilitam uma maior penetração de pequenos sistemas de geração, como os fotovoltaicos ou eólicos, diretamente conectados à rede da concessionária. Dessa forma, é possível expandir o sistema de geração de energia, onde o próprio consumidor, pode ser um micro gerador de energia.

Outra forma de redução de gastos é a possibilidade de se usar os sistema de tarifa branca. Disponível para todas as unidades consumidoras à partir de 2020 [12], esta modalidade fornece uma tarifa dinâmica de acordo com o horário em que a energia é consumida. Portanto, para que haja uma diminuição considerável em sua conta de energia, o consumidor deve mudar seus hábitos e concentrar seu consumo nos horário fora de ponta. O que pode se tornar algo trabalhoso, pois os horários de ponta e intermediário, vai das 18h até as 23h, que refletem justamente o horário de maior consumo de energia nas unidades residenciais.

Mesmo que o consumidor opte pela tarifa branca e instale painéis fotovoltaicos em

sua propriedade, a economia total realizada ainda fica atrelada aos hábitos de consumo. Uma vez que toda a produção de energia fotovoltaica é dada em um horário fora de ponta. Logo, mesmo que haja a comercialização da energia produzida pelos painéis, esta seria comercializada no momento de menor preço, e o consumidor ainda necessitaria de consumir energia no momento em que se paga a maior fração de preço por ela, ou obrigaria o consumidor a realizar um investimento maior na instalação fotovoltaica, para equilibrar financeiramente, e não energeticamente, a sua conta de energia. Surgiu então a questão que é tema deste trabalho: se é economicamente viável utilizar um sistema de backup para um consumidor de baixa tensão, que consiste em um banco de baterias que são carregadas com os painéis solares e para serem utilizadas durante a faixa de tempo da tarifa de ponta.

O principal objetivo desta monografia é apresentar um estudo de viabilidade econômica sobre o uso de painéis fotovoltaicos e baterias em uma microrrede de corrente contínua para consumidores que aderirem à tarifa branca. Utilizando-se dos perfis típicos de consumo residencial e comercial, foram montados cenários para analisar se há ou não viabilidade neste projeto. Para realizar os cálculos foram usados os softwares MatLab e Excel. O código em linguagem M está anexado ao final desta monografia.

Este trabalho contém mais 4 capítulos principais. No capítulo Revisão Bibliográfica, é apresentado uma premissa e conceitos importantes para o entendimento do trabalho. Já no capítulo Metodologia, são descritos os métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo Resultados apresenta todos os dados obtidos com as análises feitas. No capítulo Considerações Finais, é realizada uma síntese de todo o conteúdo presente neste trabalho de conclusão de curso. Por fim, ao final desta monografia, é possível encontrar nos Anexos, o código computacional desenvolvido pelo autor do trabalho com ajuda de seu professor orientador.

## 2 Revisão Bibliográfica

Embora apresente pequenas mudanças e algumas melhorias desde que foi criado, o sistema energético necessita urgentemente se reinventar [13]. O uso de tecnologias baseadas no sistema de *smart grid* podem mudar todos os aspectos da interação entre clientes e concessionárias. Deve-se atentar que a *Smart Grid* não é uma tecnologia ou um equipamento específico, mas sim um conceito que permite controlar e otimizar o uso da rede elétrica [14]. Com um sistema de comunicação eficaz e autônomo é possível implementar estratégias para tomar a decisão correta minimizando, assim, as perdas no geral e tornando o sistema mais eficiente [15].

A criação dessas redes elétricas inteligentes promove a interação de acordo com a necessidade de cada região e sistema [16]. Isso possibilita integrar ao sistema de transmissão e distribuição de energia da concessionária pequenas fontes de energias renováveis e veículos elétricos, transformando-a em um sistema de geração descentralizado. Esse sistema é conhecido como Geração Distribuída (GD) de energia e que traz vários benefícios. Uma das vantagens é a diminuição das perdas nas linhas de transmissão devido à proximidade entre a produção da energia e da carga a ser alimentada. Outro benefício importante é a inserção de energia sustentável, provenientes de painéis solares ou turbinas eólicas instaladas pelo consumidor, na matriz energética [17]. A figura 1 apresenta um modelo de geração distribuída.

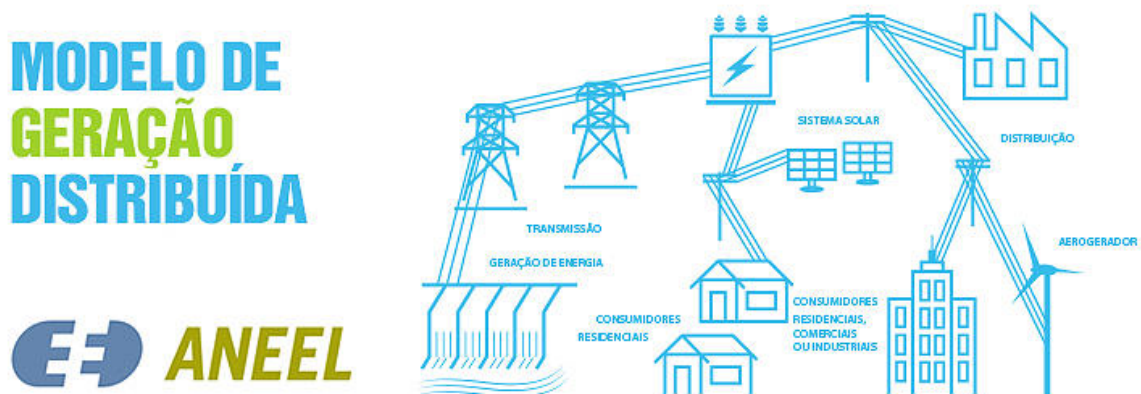


Figura 1 – Modelo de Geração Distribuída [1]

Desde o século 19, devido à conveniência e tecnologia da época, foi preferível utilizar-se de um sistema de transmissão em corrente alternada (c.a.). No Brasil, toda a energia produzida é em regime c.a., somente foge a essa regra a energia excedente da Usina

de Itaipu que é comprada do Paraguai. O lado paraguaio gera energia em c.a. a 50Hz, o que impossibilita de ser incorporada diretamente ao sistema de transmissão brasileiro, que é de 60Hz. A energia então é transformada em corrente contínua (c.c.) e escoada até a subestação de Ibiúna (SP) onde é novamente convertida em corrente alternada [18].

Com o avanço tecnológico das duas última décadas, principalmente da eletrônica de potência, é inevitável que o sistema elétrico sofra uma modernização [19]. Existe, então, a possibilidade da criação de uma microrrede em corrente contínua. A figura 2 apresenta um esquemático de uma microrrede. Por se tratar de uma possibilidade relativamente nova, existem muitos estudos teóricos realizados sobre o assunto, mas estudos práticos que lidem com a viabilidade, proteção e técnicas de projeto destes novos sistemas, ainda são preliminares.

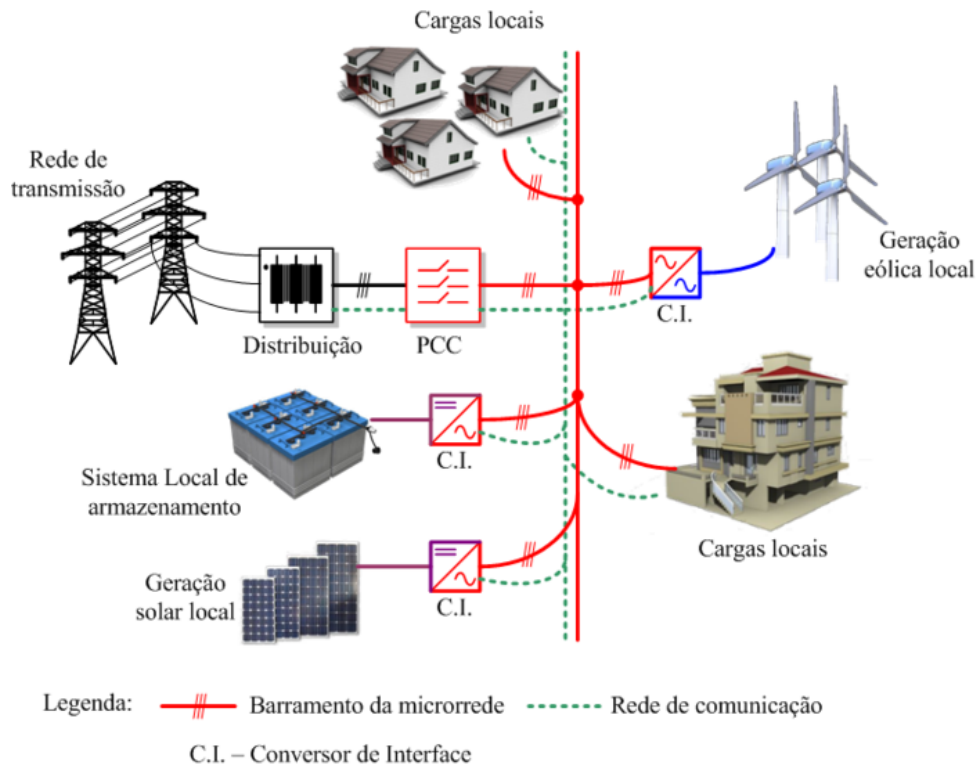


Figura 2 – Esquemático de uma microrrede [2]

## 2.1 Definições Básicas

Nesta seção serão apresentadas algumas definições básicas para que o leitor tenha uma melhor compreensão do conteúdo presente ao longo desta monografia.

### 2.1.1 Tarifa Branca

Desde 1º de Janeiro de 2018, de acordo com a Resolução Normativa nº 733/2016 os consumidores de baixa tensão podem aderir à modalidade da Tarifa Branca desde que



tenham um consumo médio mensal superior à 500kWh ou estejam fazendo uma nova ligação. À partir de 2019, podem aderir os consumidores com média mensal superior à 250kWh e após 2020 todos os consumidores de baixa tensão serão atendidos por essa modalidade de cobrança.

Diferentemente da Tarifa Convencional, onde o preço do kWh é o mesmo independente do horário de uso da energia elétrica, a Tarifa Branca consiste na precificação diferente do uso da energia elétrica ao longo do dia. Os horários de maior consumo tem um alto preço atribuído ao kWh, estes são chamados de horários de ponta. Os horários onde o preço da energia é mais barato são chamados de horários fora de ponta. Entre esses dois horários, existe o horário intermediário onde o preço do kWh tem um valor mediano entre eles. A figura 3 apresenta um comparativo dos preços entre a tarifa branca e a tarifa convencional.

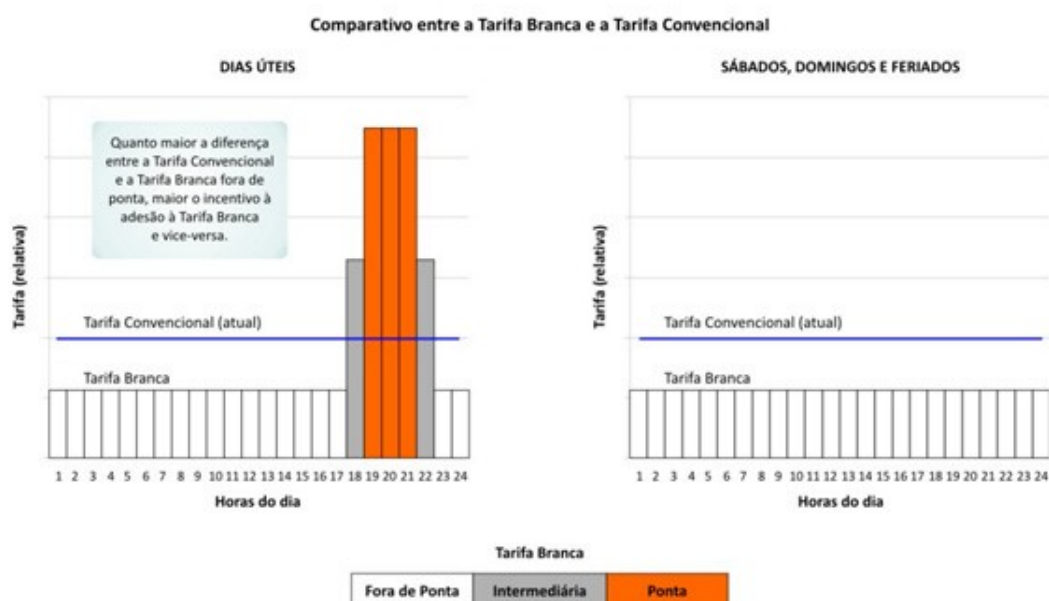


Figura 3 – Comparativo tarifa branca x tarifa convencional [3]

Quem define os horários onde as tarifas assumem valores de ponta, intermediário e fora de ponta é a concessionária. Estes horários podem variar ao longo do ano e também estão sujeitos à um aumento devido às bandeiras tarifárias. Neste trabalho, foi utilizada a Tarifa Branca proposta pela Companhia Energética de Minas Gerais S.A. - CEMIG. Na CEMIG, atualmente, o horário de ponta está definido como sendo das 17 às 20h, os horários intermediários das 16 às 17h e das 20 às 21h, e todo o restante é entendido como horário fora de ponta. Vale ressaltar que em Sábados, Domingos e Feriados Nacionais, a tarifação tem um valor único igual ao valor do horário fora de ponta durante todo o dia. Na tabela 1 são apresentados os valores da tarifa convencional e da tarifa branca juntamente com as diferentes precificações de acordo com as bandeiras para o consumidor

de baixa tensão que é o objeto de estudo desta monografia.

Tabela 1 – Comparação de preços Tarifa Branca e Tarifa Convencional [8]

| Cor da Bandeira               | Verde<br>(R\$/kWh) | Amarela<br>(R\$/kWh) | Vermelha P1<br>(R\$/kWh) | Vermelha P2<br>(R\$/kWh) |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tarifa Convencional           | 0.58684            | 0.59684              | 0.61684                  | 0.63684                  |
| Tarifa Branca - Ponta         | 1.13617            | 1.14617              | 1.16617                  | 1.18617                  |
| Tarifa Branca - Intermediário | 0.73035            | 0.74035              | 0.76035                  | 0.78035                  |
| Tarifa Branca - Fora de Ponta | 0.47923            | 0.48923              | 0.50923                  | 0.52923                  |

Para que a Tarifa Branca seja uma opção mais vantajosa que a Tarifa Convencional, é necessário que hajam mudanças na rotina, visto que o perfil típico de um consumidor residencial tem seu maior consumo no horário de ponta. A figura 4 apresenta um exemplo de aplicação da tarifa branca. É possível notar que ela só atenderia o consumidor caso ele transferisse parte do consumo do horário de ponta para o horário fora de ponta. Com essa mudança de hábito, o consumidor conseguiria economizar cerca de R\$3.85 por mês. Entretanto, se isso não for feito, o consumidor teria um prejuízo de R\$4.85 por mês.

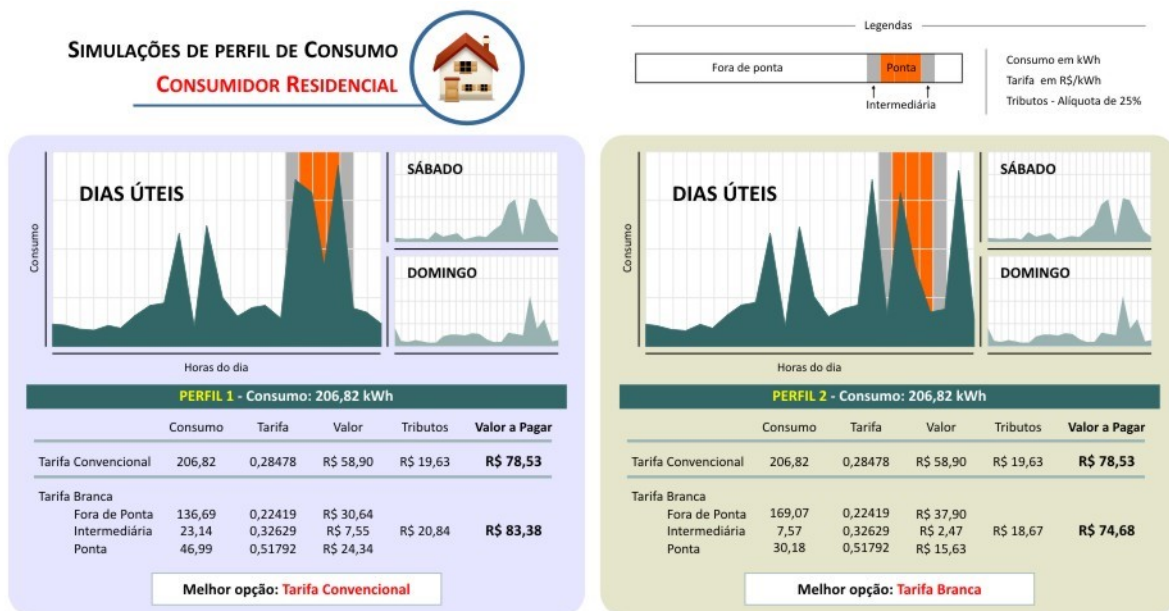


Figura 4 – Exemplo de consumidor utilizando a Tarifa Branca [3]

### 2.1.2 Geração Distribuída

Entende-se por geração distribuída a geração de energia elétrica localizada junto ou próxima do consumidor [20]. Além da vantagem de diminuir os investimentos em transmissão, a GD apresenta uma menor perda ao ser comparada com as longas linhas de transmissão de energia, melhorando também a estabilidade do sistema. Podem ser citadas

como GD as pequenas centrais hidrelétricas, os geradores a diesel, os painéis fotovoltaicos, dentre outros.

Em vigor desde 2012, a Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012 [21], permite que o consumidor brasileiro gere sua própria energia elétrica. É denominado como microrgeração distribuída as centrais geradoras de até 75kW e minigerção distribuída as centrais que tem geração entre 75kW e 5MW [22]. É possível, inclusive, exportar o excedente para a rede da concessionária, gerando assim créditos que podem ser abatidos durante o mês de uso ou até nos meses consequentes. Deve-se alertar que o crédito gerado durante a exportação somente pode ser trocado por energia, não podendo ser revertido em dinheiro.

### 2.1.3 Microrrede

O conceito de microrrede pode ser entendido como uma rede local que utiliza-se de uma geração distribuída para suprir as demandas de carga local [2]. As microrredes podem funcionar de duas uma formas: conectadas à rede elétrica ou de forma ilhada, que é quando operam de forma autônoma no caso de uma falha no sistema de transmissão ou distribuição. Exatamente por isso, uma microrrede traz consigo uma maior confiabilidade ao consumidor, pois em caso de interrupções no sistema elétrico proveniente da concessionária, as cargas podem ser supridas pelas fontes renováveis de geração local, como geradores eólicos de pequeno porte e painéis fotovoltaicos, ou através de um sistema de backup como geradores à diesel e um banco de baterias.

Para transmitir grandes potências através de longas distância, optou-se pelo uso de uma rede de transmissão em corrente alternada ao de corrente contínua. Como uma microrrede é interligada por uma rede de distribuição curta, tem-se a opção de escolha entre uma microrrede em regime c.a. ou c.c. Um dos motivos para o uso de uma microrrede c.c. vem da possibilidade de se obter um ganho de eficiência de aproximadamente 15% para consumidores residenciais [2]. Isso se deve ao fato de grande parte dos equipamentos existentes serem eletrônicos, portanto, funcionam com corrente contínua. Ao se utilizar uma conexão c.c. diminui-se, então, os números de conversões desnecessárias, sem contar nos benefícios quanto ao aproveitamento das fontes alternativas de energia. A figura 5 apresenta um esquemático de uma microrrede cujo funcionamento é em regime c.c.

Com o uso da microrrede, tem-se a necessidade do uso de controladores para monitorar toda a geração distribuída e a demanda de carga. O controlador deve garantir uma operação sincronizada com a rede da distribuidora e a microrrede de forma a manter a estabilidade do sistema. Na subseção 2.1.4 é explicado melhor sobre o funcionamento do controle hierárquico da microrrede.

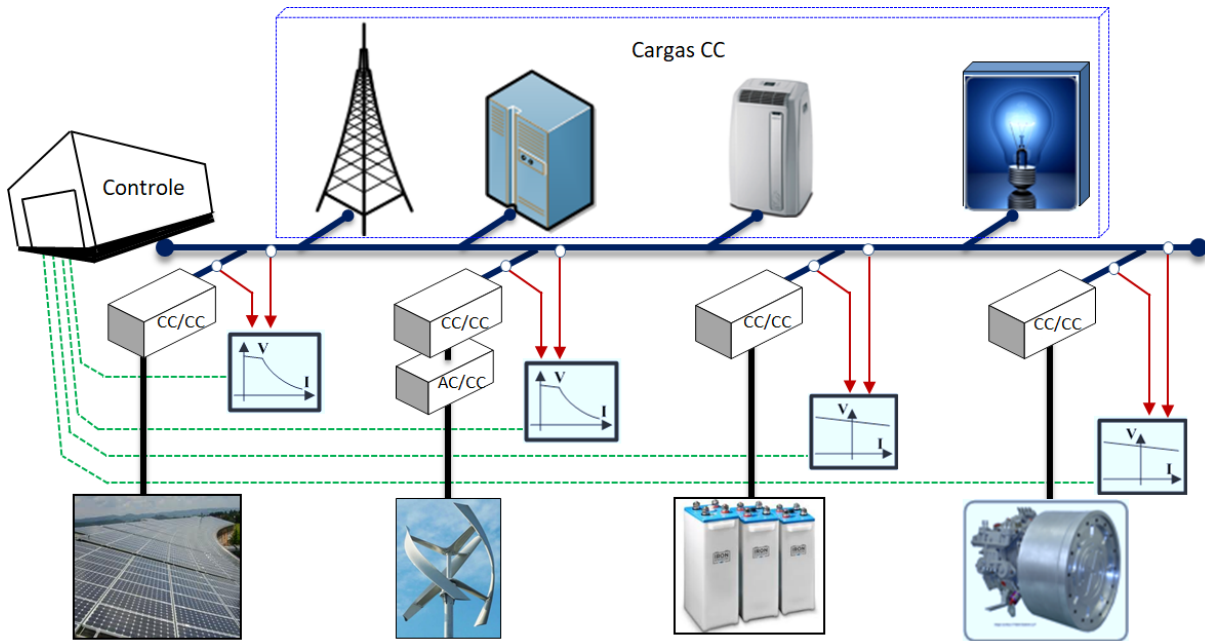


Figura 5 – Modelo de uma microrrede conectada por um barramento c.c. [4]

#### 2.1.4 Controle Hierárquico

Existem vários métodos diferentes de controle operacional que podem ser realizados pelos conversores. Podem ser citados como métodos: o controle centralizado, controle mestre-escravo, controle multi-agente e o controle autônomo distribuído. Esse último é o modelo mais adequado para ser usado em uma microrrede devido à sua maior autonomia, flexibilidade em configuração e, também, ser menos dependente de comunicação [23].

À fim de se otimizar o controle, uma estrutura hierárquica é utilizada de forma a coordenar múltiplos estágios com várias escalas de tempo para obter a melhor operação para a microrrede c.c. Dependendo da finalidade, o controle hierárquico pode ser dividido em duas ou três camadas. A figura 6 apresenta o esquemático do controle hierárquico de uma microrrede. Como o objeto de estudo desta monografia envolvem aspectos econômicos, é utilizado um controle hierárquico de três camadas contendo em sua estrutura os controles primário, secundário e terciário que podem ser definidos como [24]:

- Controle Primário: Este é o nível mais baixo da estrutura de controle, ele é responsável pelo controle da tensão e corrente.
- Controle Secundário: Este controle está no topo do do controle primário, ele é responsável por garantir uma qualidade da energia utilizada. Ele sincroniza a microrrede na rede da concessionária, compensa harmônicos e ajusta possíveis desequilíbrios de tensão.

- **Controle Terciário:** Localizado no topo da estrutura de controle ele é responsável pela operação ideal da microrrede no sistema. É neste nível que se controla o fluxo de energia entre as microrrede e a rede da concessionária. Ele também é responsável pela operação econômica.



Figura 6 – Níveis de controle hierárquico de uma microrrede

Adaptado de [25]

É através da programação do controle terciário que as operações econômicas podem ser realizadas de modo a apresentar uma economia ao consumidor. É neste nível que se definem parâmetros para que a microrrede decida qual o melhor momento de se consumir a energia provinda da concessionária ou das fontes alternativas da GD. O regime tarifário proposto pela tarifa branca apresenta preços variados, assim como o consumo e a quantidade de energia produzida pelas fontes alternativas variam ao longo do dia, portanto é responsabilidade do controle terciário analisar o momento e escolher, em tempo real, a opção que gera um menor custo ao consumidor.



## 3 Metodologia

Neste capítulo há uma descrição de como este trabalho foi implementado. Como ferramentas para auxiliar o desenvolvimento e analisar a questão principal, foi utilizado o software Excel, onde foram montadas planilhas de custos de cada item necessário para a construção de uma microrrede; e também do software MatLab, onde o código, anexo ao final desta monografia, foi programado. O código em linguagem M tem como função principal escolher o melhor custo-benefício para o sistema dimensionado.

Para realizar a curva característica de consumo por hora, foram analisados os perfis de gastos de energia elétrica pelos consumidores residenciais e comerciais. Uma média de consumo de energia a cada hora do dia pode ser vista nas figuras 7 e 8 onde correspondem respectivamente as curvas características de um consumidor residencial e um consumidor comercial. As curvas foram adaptadas para serem apresentadas em P.U. pois, assim, podem ser reproduzidas para todas as faixas de consumidores.

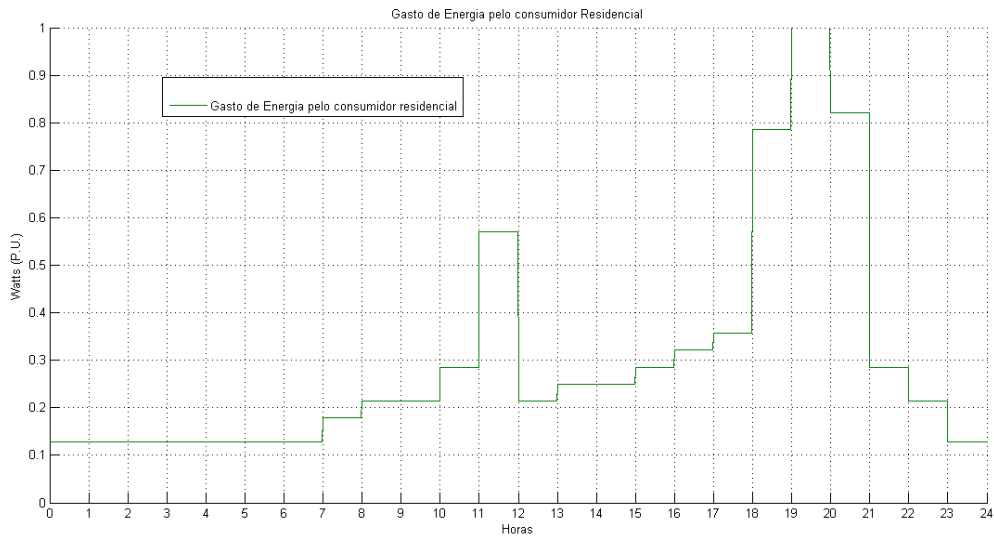


Figura 7 – Gasto de Energia Elétrica ao longo do dia por um consumidor residencial

Adaptado de [26]

O software EXCEL foi utilizado para organizar e salvar os dados necessários para que o programa escrito no MatLab pudesse realizar seus cálculos. A planilha do EXCEL contém 4 abas sendo elas nomeadas com seus respectivos conteúdos Painéis, Inversores, Bateria e BateriaDescargaProfunda. A primeira coluna de cada aba contém respectivamente a potência dos painéis, a potência máxima suportada pelo inversor e o a quantidade

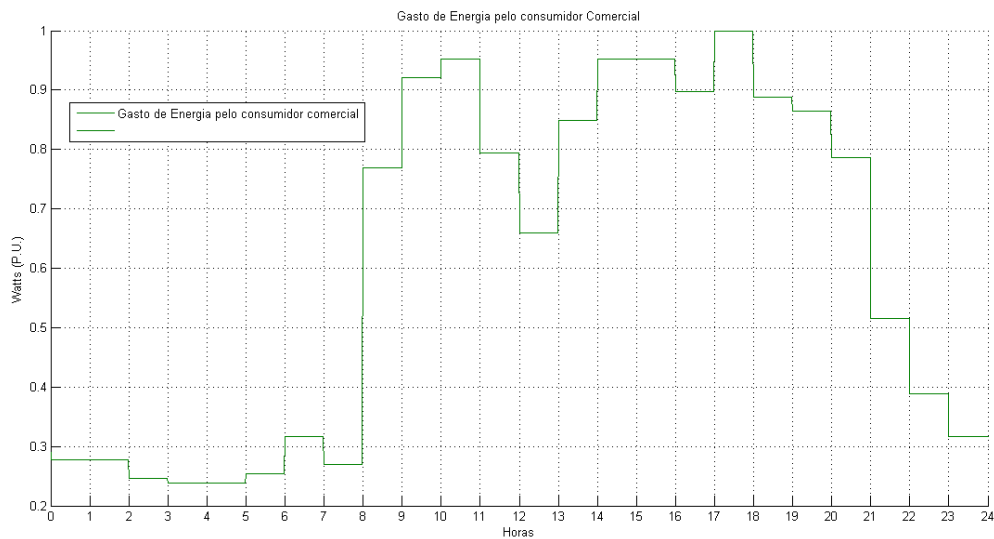


Figura 8 – Gasto de Energia Elétrica ao longo do dia por um consumidor comercial

Adaptado de [26]

de Ah para cada tipo de bateria. Já na segunda coluna de cada aba, foi salvo o preço associado a cada item.

## 3.1 Dimensionamento do sistema

Nesta seção são definidas algumas características importantes para o dimensionamento do sistema. O projeto utiliza como base as tarifas da CEMIG portanto, para validar-se o código, foi simulado um consumidor médio, com gasto de 300kWh mensal, residente em Belo Horizonte, Minas Gerais. Os preços dos painéis fotovoltaicos, inversores e baterias foram pesquisados em três lojas nacionais com pronta entrega para todo o Brasil [27] [28] [29]. Os custos como mão de obra, manutenção e acessórios necessários para construir o sistema completo não foram detalhados, porém, ao custo total, foram acrescentados 5% referentes à isso. O sistema instalado deverá fornecer energia durante 25 anos, que é o tempo de vida útil de um painel fotovoltaico.

### 3.1.1 Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos foram definidos de forma a produzir energia igual à energia gasta pelo consumidor ao longo de um dia inteiro. Para montar a curva característica da geração de energia dos painéis fotovoltaicos foi utilizado como base uma curva senoidal. O número de horas de sol pleno na região de Belo Horizonte, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil [30], é de 6h. Isso quer dizer que os painéis fotovoltaicos produzem quantidades



variadas de energia ao longo do dia, porém, o montante diário equivale à uma produção máxima durante 6 horas. Devido a complexidade de se trabalhar com o desgaste real dos painéis, foi assumido que, durante os 25 anos de uso, os painéis são capazes de produzir energia nominal.

### 3.1.2 Dimensionamento dos inversores

Os inversores tem como finalidade conectar tanto os painéis e baterias quanto a rede da concessionária à microrrede c.c., portanto seu único requisito é que eles sejam dimensionados para atender à demanda máxima. Por demanda máxima entende-se o momento onde a maior quantidade de energia seja utilizada no intervalo de tempo. Essa demanda máxima pode ser tanto a demanda máxima de consumo da rede ou das baterias, quanto da produção dos painéis. São necessários no mínimo 3 unidades de inversores, um conectado à rede da concessionária, outra conectado aos painéis fotovoltaicos e outro conectado ao banco de baterias e todos eles conectados à microrrede c.c. O tempo de vida útil de um inversores é cerca de 10 e 15 anos, portanto, serão necessárias 2 trocas ao longo dos 25 anos de funcionamento do sistema. A figura 9 apresenta um esquemático de uma microrrede onde é possível visualizar a disposição dos inversores.

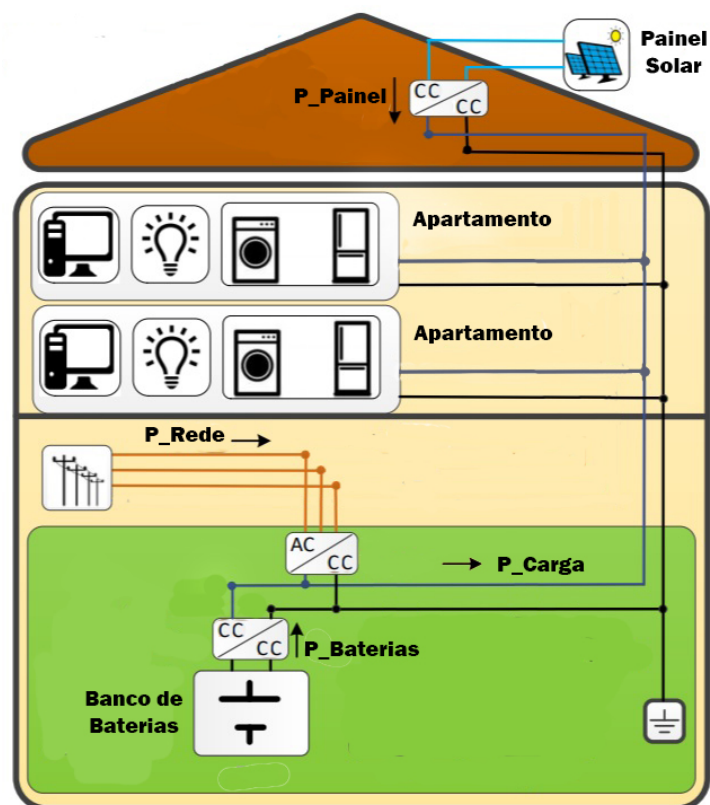


Figura 9 – Diagrama de uma microrrede

Adaptado de [25]

### 3.1.3 Dimensionamento das baterias

As baterias tem como finalidade suprir a energia gasta durante as 3 horas do horário de ponta da tarifa branca. Isso corresponde à cerca de 30% da energia gasta diariamente da residência. Para isso, é necessário um banco de baterias para fornecer tanta energia. O mercado nacional apresenta dois tipos de baterias, as baterias estacionárias e as baterias de descarga profunda. Consultado as especificações do fabricante, foi possível construir a curva de profundidade de descarga versus número de ciclos destas baterias. As figuras 10 e 11 apresentam o gráfico do fabricante com a relação profundidade de descarga versus número de ciclos da bateria estacionária e bateria de descarga profunda. Além destes dois tipos, também foi analisada a bateria de lítio. A figura 12 apresenta a curva característica deste terceiro tipo de bateria. É de fácil percepção que esse tipo de bateria apresenta um desempenho muito superior ao das outras, porém, por ser produzida apenas em casos específicos, não foi possível realizar uma pesquisa de preço para ela. Devido a seu alto custo, o código foi elaborado de forma à apresentar quais são os preços máximos em que as baterias devem ser vendidas no Brasil para que o sistema seja viável economicamente.

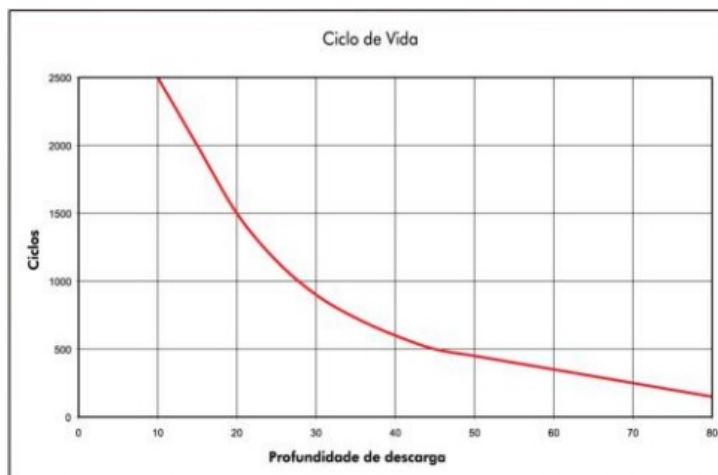


Figura 10 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria Estacionária [5]

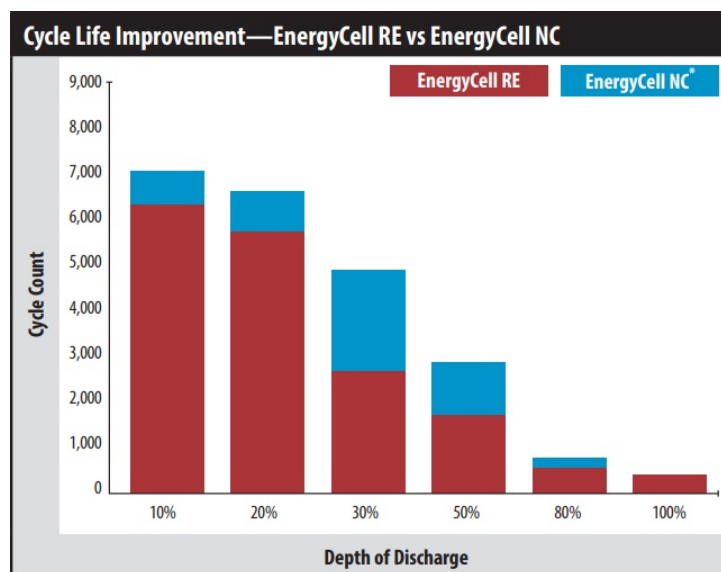


Figura 11 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria de Descarga Profunda [6]

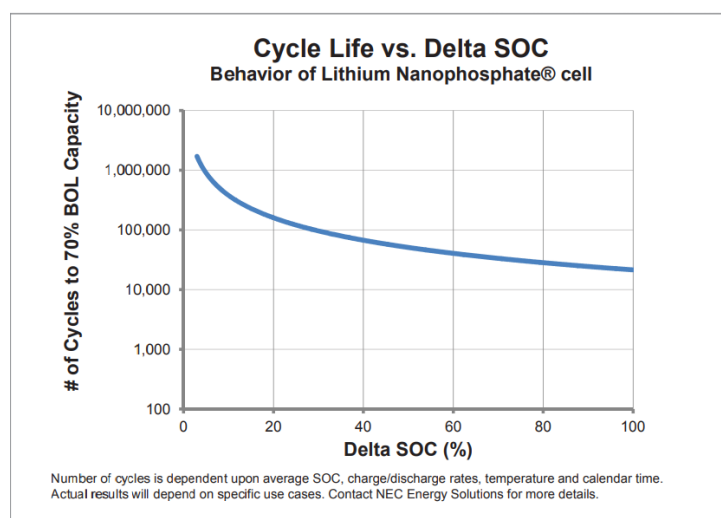


Figura 12 – Número de Ciclos X Profundidade de Descarga - Bateria de Lítio [7]

As baterias portanto apresentam um determinado número de ciclos de acordo com a profundidade de descarga que é realizada. Quanto maior for a porcentagem descarregada, menor o número de operações que elas podem realizar. Portanto, é preciso analisar cada ponto para que seja encontrado o melhor custo-benefício. De forma a facilitar a busca pelo ponto ideal de operação, foram construídas equações que descrevem as curvas características de cada tipo de bateria. Foram tomados como base para cada equação os pontos dos gráficos apresentados nas figuras 10, 11 e 12. Com isso foi possível construir as equações 3.1, 3.2 e 3.3 que representam, respectivamente, as curvas de número de ciclos versus profundidade de descarga das baterias do tipo estacionária, descarga profunda

e lítio, onde a variável 'X' corresponde a profundidade de descarga da bateria, logo, o resultado da equação é sempre o número de ciclos associado à essa porcentagem.

$$\begin{aligned}
Y_{BateriaEstacionaria}(X) = & (5.61350816710872e^{-13}) * X^{10} + (-2.54575873185477e^{-10}) * X^9 + \\
& +(4.96876379812551e^{-8}) * X^8 + (-5.45554904661231e^{-6}) * X^7 + \\
& +(0.000369223810239039) * X^6 + (-0.0158374187214828) * X^5 + \\
& +(0.424643977275059) * X^4 + (-6.70619439584411) * X^3 + \\
& +(55.5684851527453) * X^2 + (-280.024898406164) * X + (3467.59619030416);
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
Y_{BateriaDescargaProfunda}(X) = & -2.997074917946451e^{-4} * X^4 + 0.0748145954453291 * X^3 \\
& -5.526657103090593 * X^2 + 34.419462927491860 * X + 7.422221662129888e^3;
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$Y_{BateriaLitio}(X) = \begin{cases} -1.5263e^6 * X + 8.0208e^6 & \text{Se } X \leq 4.5 \\ -10.122 * X^3 + 1536.4 * X^2 - 76069 * X + 1.2999e^6 & \text{Se } X > 4.5 \text{ e } X \leq 40 \\ -540 * X + 95800 & \text{Se } X > 40 \text{ e } X \leq 100 \end{cases} \tag{3.3}$$

### 3.1.4 Do calculo do kWh

Para atingir o objetivo deste trabalho, é necessário comparar o preço da energia vendida pela concessionária com o preço da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e pelo banco de baterias. Portanto as equações 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam as equações desenvolvidas para o cálculo do kWh.

$$kWh_{painel} = 1.05 * \frac{PrecoPainel + \frac{PrecoInversor}{2}}{Potencia_{painel}} \tag{3.4}$$

$$Preco_{ciclo} = 1.05 * \frac{PrecoBateria + \frac{PrecoInversor}{2}}{Descargas * Trocas} \tag{3.5}$$

$$kWh_{bateria} = \frac{Preco_{ciclo}}{Potencia_{bateria}} \tag{3.6}$$

Pode-se observar que o o preço do inversor foi dividido igualmente para facilitar o cálculo do preço do kWh. O fator multiplicador de 1.05 visto nas equações 3.4 e 3.5 é referente ao custo estimado dos acessórios e manutenção do sistema. Os preços dos painéis, baterias e inversores são os menores preços encontrados que atendem ao sistema simulado.

---

A variável  $Potencia_{painel}$  contém o valor de toda a potência gerada pelos painéis ao longo dos 25 anos, já a variável  $Potencia_{bateria}$  contém a potência diária descarregada pela bateria. A variável Ciclos corresponde ao número de ciclos de vida útil para a profundidade de descarga de uma dada bateria e, por fim, a variável Trocas corresponde o número de trocas do banco de baterias ao longo dos 25 anos.



## 4 Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados gerados pelo software MatLab diante dos cenários apresentados no capítulo anterior. As figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, as curvas características de demanda horária e geração de energia pelos painéis fotovoltaicos para consumidores residenciais e comerciais com gastos mensal de 300kW. É possível perceber que para o consumidor comercial o alto consumo de eletricidade coincide com o horário em que os painéis estão gerando energia, enquanto para o consumidor residencial o consumo de energia tem seu pico logo após os painéis terminarem de produzir energia.

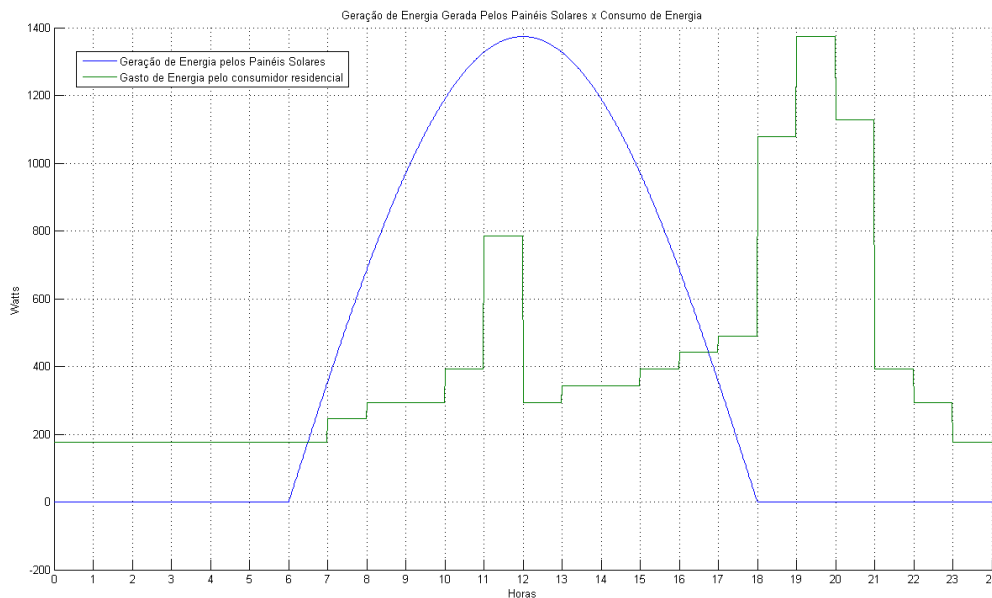


Figura 13 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia Residencial

O primeiro cenário estudado pode ser visto nas figuras 15 e 16, ele é dado utilizando apenas os painéis fotovoltaicos tanto para os consumidores residenciais, quanto para os consumidores comerciais. Neste caso energia gerada pelo painel deve primeiramente abastecer ao consumidor e a quantidade restante deve ser vendida para a concessionária. Em ambos os casos, o somatório da energia excedente proveniente dos painéis é igual à todo consumo ao longo do dia. Nesse cenário, são utilizados 7 painéis fotovoltaicos, custando ao todo R\$ 3493.00 e produzindo um montante de 11.55kW por dia.

Como discutido anteriormente, as baterias são usadas para suprir toda a energia utilizada durante todo o horário de ponta do consumidor residencial. Para isso, o código

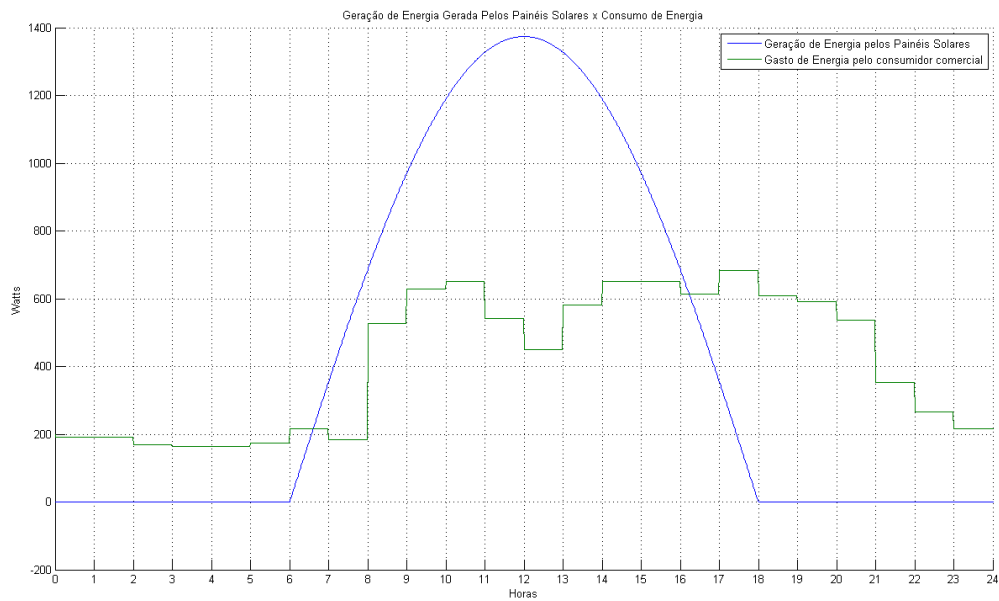


Figura 14 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia Comercial

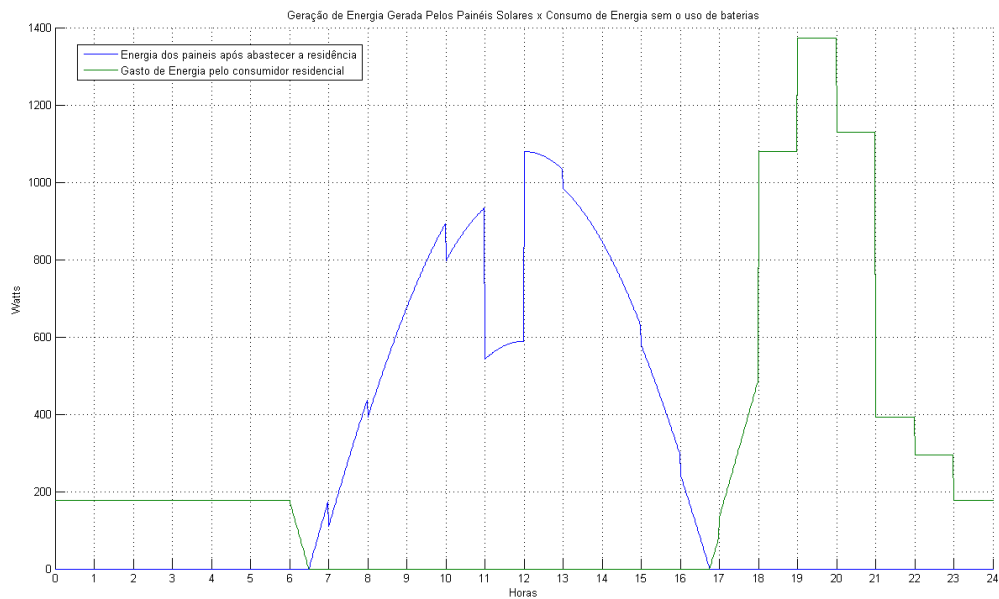


Figura 15 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia Residencial sem o uso de baterias

seleciona qual o menor custo do banco de baterias levando em conta a profundidade de descarga e o número de descargas da bateria. A figura 17 apresenta a curva característica das baterias estacionárias e de descarga profunda geradas pelas equações 3.1 e 3.2, junta-



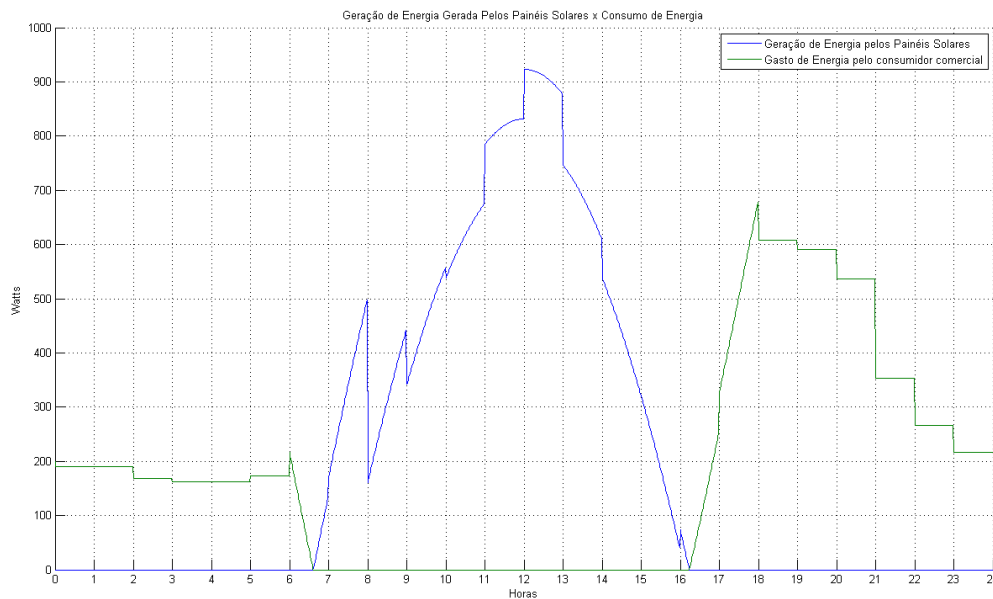


Figura 16 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia Comercial sem o uso de baterias

mente com seu ponto de melhor operação para este caso específico de consumidor. Após o fim do horário de ponta, a bateria é desconectada do sistema e somente é conectada quando for ser recarregada. Novamente, os painéis fotovoltaicos são utilizados para, em primeiro momento, abastecer o consumidor residencial. A energia excedente das primeiras horas é utilizada para recarregar as baterias, o montante restante das horas seguintes novamente é vendida para a concessionária. A figura 18 ilustra esse cenário.

De forma sucinta, a tabela 2 apresenta o número de itens utilizados no sistema e o menor preço total associado a eles. É possível perceber que as baterias são os itens de maior valor. Para a bateria estacionária, o melhor ponto de operação é com a profundidade de descarga de 16%, onde cada banco de baterias seria composto por 22 baterias que seriam trocadas 5 vezes ao longo dos 25 anos. Já para as baterias de descarga profunda, tem-se que o banco de baterias é composto por 7 baterias, trocadas 2 vezes, sendo descarregadas 33% por dia. Com o preço dos itens é possível utilizar as equações descritas na seção 3.1.4 para calcular o preço do kWh tanto do painel, quanto das baterias. A tabela 3 apresenta o resultado desse cálculo.

Tabela 2 – Preço dos itens utilizados na microrrede

| Item                                 | Número de Itens (un.) | Preço Total (R\$) |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| <i>Painel Fotovoltaico</i>           | 7                     | 3493.00           |
| <i>Inversores</i>                    | 6                     | 17856.00          |
| <i>Baterias Estacionárias</i>        | 110                   | 40909.00          |
| <i>Baterias de Descarga Profunda</i> | 14                    | 23786.00          |

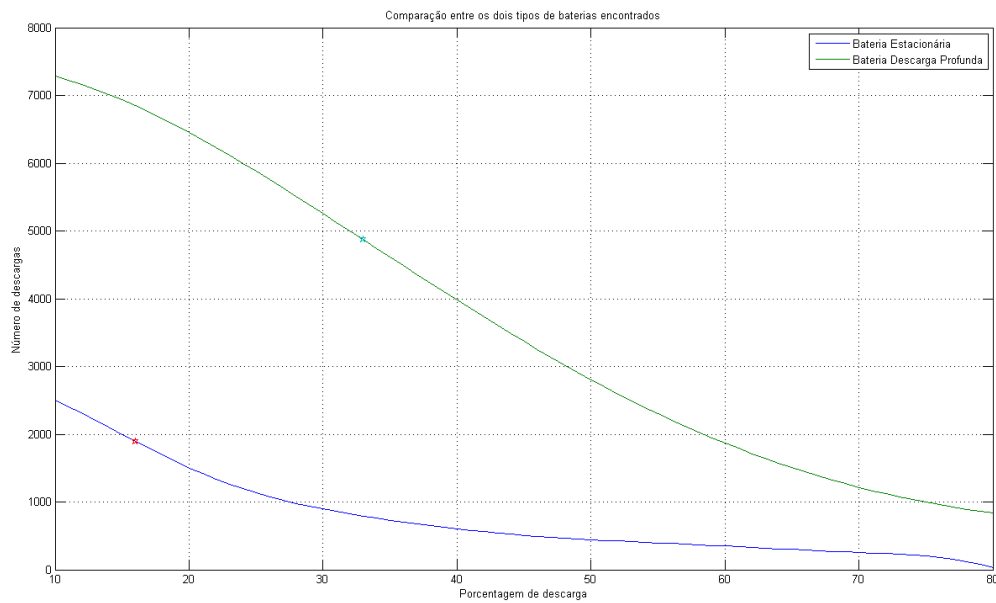


Figura 17 – Gráfico comparativo de Número de descargas x Profundidade de descarga para Baterias Estacionárias e Baterias de Descarga Profunda

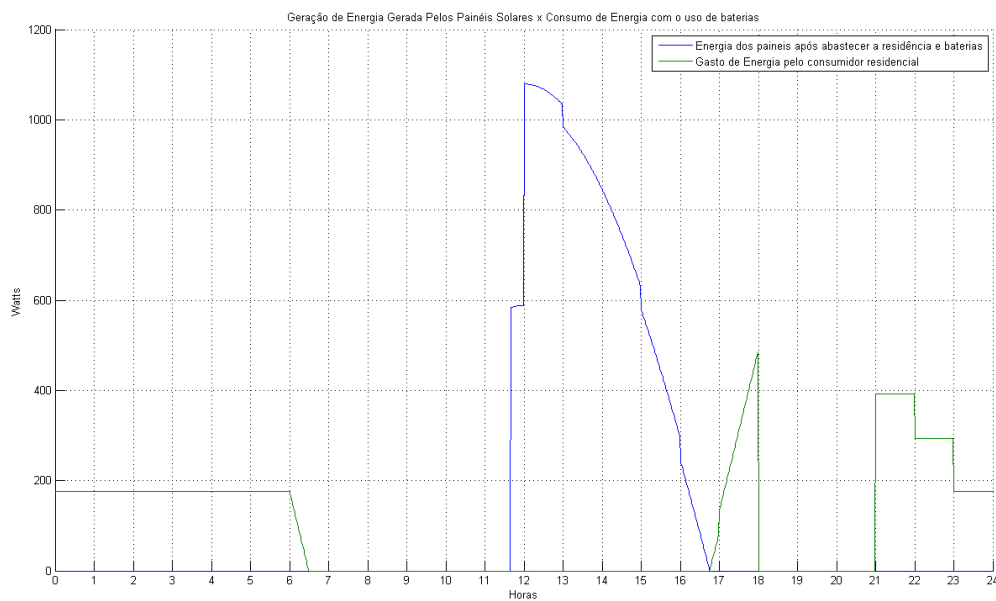


Figura 18 – Geração de Energia pelos Painéis Fotovoltaicos x Consumo de Energia Residencial com o uso de baterias

Tabela 3 – Preço do kWh de cada item da microrrede

| Item                                 | Preço kWh (R\$) |
|--------------------------------------|-----------------|
| <i>Painel</i>                        | 0.12            |
| <i>Baterias Estacionárias</i>        | 1.87            |
| <i>Baterias de Descarga Profunda</i> | 1.21            |

De modo comparativo, a tabela 4 apresenta uma averiguação dos gastos que o consumidor teria se simplesmente optasse pela mudança da tarifa convencional para a tarifa branca, sem a instalação de nenhum outro componente. É notório que em ambos os casos, sem uma mudança de hábito, há apenas desvantagens para o consumidor. Em contrapartida, a tabela 5 apresenta algumas vantagens para o consumidor caso esse decida investir em painéis fotovoltaicos e baterias. Somando o valor do investimento apenas em painéis fotovoltaicos mais o gasto final junto a concessionária, é possível perceber uma economia de cerca de 35% para o consumidor residencial e cerca de 54% para o consumidor comercial. É possível notar também que, ao utilizar-se de um sistema com baterias, o consumidor ficaria com créditos junto a concessionária, porém, isto não seria muito interessante, já que o consumidor deve investir um valor muito superior ao sistema sem baterias.

Tabela 4 – Comparativo entre os tipo de tarifações e uso de baterias

| <b>Consumidor</b>  | <b>Tarifa Convencional<br/>(R\$)</b> | <b>Tarifa Branca<br/>(R\$)</b> |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Residencial</i> | 53564.70                             | 64233.63                       |
| <i>Comercial</i>   | 53568.33                             | 54615.48                       |

Tabela 5 – Análise de investimento e gastos com a concessionária

| <b>Consumidor</b>               | <b>Gasto<br/>Concessionária (R\$)</b> | <b>Investimento<br/>(R\$)</b> | <b>Gasto Concessionária<br/>Final (R\$)</b> |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| <i>Residencial sem Baterias</i> | 64233.63                              | 16166.85                      | 18336.06                                    |
| <i>Residencial com Baterias</i> | 64233.63                              | 47391.75                      | -2132.59                                    |
| <i>Comercial sem Baterias</i>   | 54615.48                              | 16166.85                      | 8717.91                                     |

Devido ao alto valor, o preço do kWh associado às baterias ultrapassa o preço do kWh no horário de ponta até para a bandeira tarifária Vermelha Patamar 2, a mais cara atualmente. Isso torna o sistema economicamente inviável. Para que o uso de baterias sempre seja viável no horário de ponta, foi utilizado o preço do kWh como sendo R\$1.13617, que corresponde ao preço do horário de ponta na bandeira verde, para que pudesse ser calculado o preço ideal para uma unidade de cada um dos três tipos de bateria. Nas figuras 19, 20 e 21 são apresentados os valores ideais, de acordo com a profundidade de descarga, em que cada tipo de bateria deveria ser vendida para que seu uso fosse viável nesse sistema. Ressalta-se que o menor preço encontrado para cada bateria estacionária e bateria de descarga profunda foi R\$ 371.90 e R\$ 1699.00, respectivamente, sendo que, para o caso analisado neste trabalho, a profundidade de descarga utilizada foi 16% e 33%. De acordo com os gráficos de preço ideal, para essa mesma porcentagem de descarga das baterias, as baterias deveriam ser comercializadas por R\$220.70, no caso das estacionárias, e R\$ 1415.00, no caso das de descarga profunda. Este valor representa uma diminuição

Tabela 6 – Comparativo dos Preços encontrados no mercado e o preço em que as baterias deveriam ser comercializadas

|   | Bateria Estacionária | Bateria de Descarga Profunda |
|---|----------------------|------------------------------|
| Melhor Ponto de Operação Encontrado (%) | 16                   | 33                           |
| Preço Encontrado (R\$)                  | 371.00               | 1699.00                      |
| Preço Sugerido (R\$)                    | 220.70               | 1415.00                      |
| Redução (%)                             | 40.85                | 16.72                        |

Tabela 7 – Preço Máximo Sugerido das Baterias

|                             | Bateria Estacionária | Bateria de Descarga Profunda | Bateria de Lítio |
|-----------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|
| Preço Máximo Sugerido (R\$) | 233.40               | 1539                         | 8873             |
| Ponto de Operação (%)       | 17                   | 35                           | 100              |

de 40.85% e 16.72% nos preços atuais. De forma sucinta, a tabela 6 apresenta esses resultados. Já a tabela 7 apresenta o preço máximo sugerido para as baterias juntamente com seu novo ponto de operação indicado. Embora não tenha sido obtido a precificação das baterias de lítio no mercado nacional, a figura 21 também apresenta os valores ideais em que esse tipo de bateria deve ser comercializada, de acordo com sua profundidade de descarga, para que valha a pena ser utilizada no sistema, sendo que o maior preço, de acordo com o gráfico é de R\$ 8873.00. Os três gráficos apresentam descontinuidades e oscilações que podem ser explicadas por dois fatores: pelas curvas não lineares de densidade de descargas versus número de descargas; e pelo fato do código realizar o cálculo utilizando um número inteiro de baterias, sendo que o arredondamento deste número é sempre para cima.

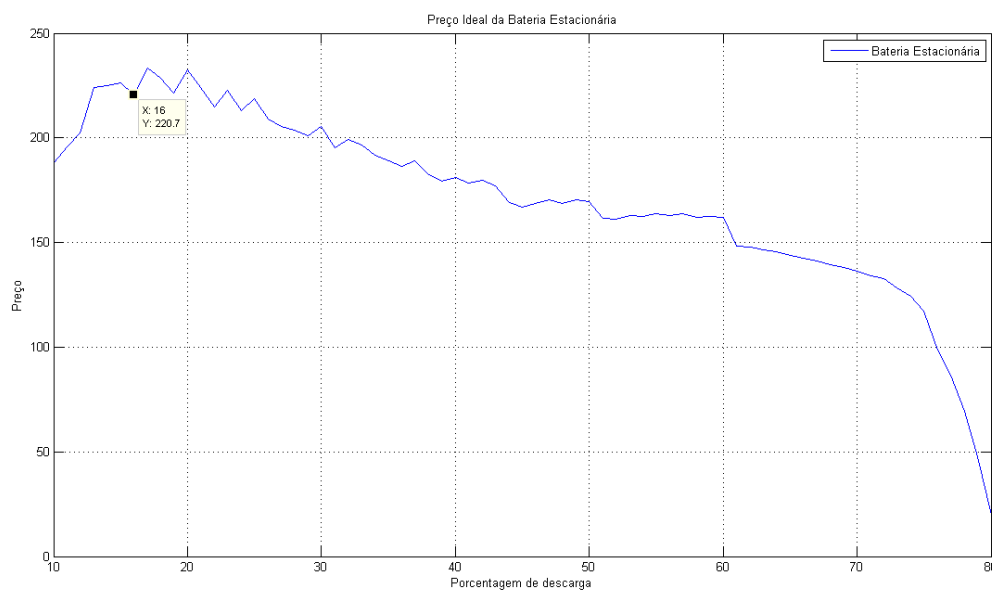


Figura 19 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria Estacionária

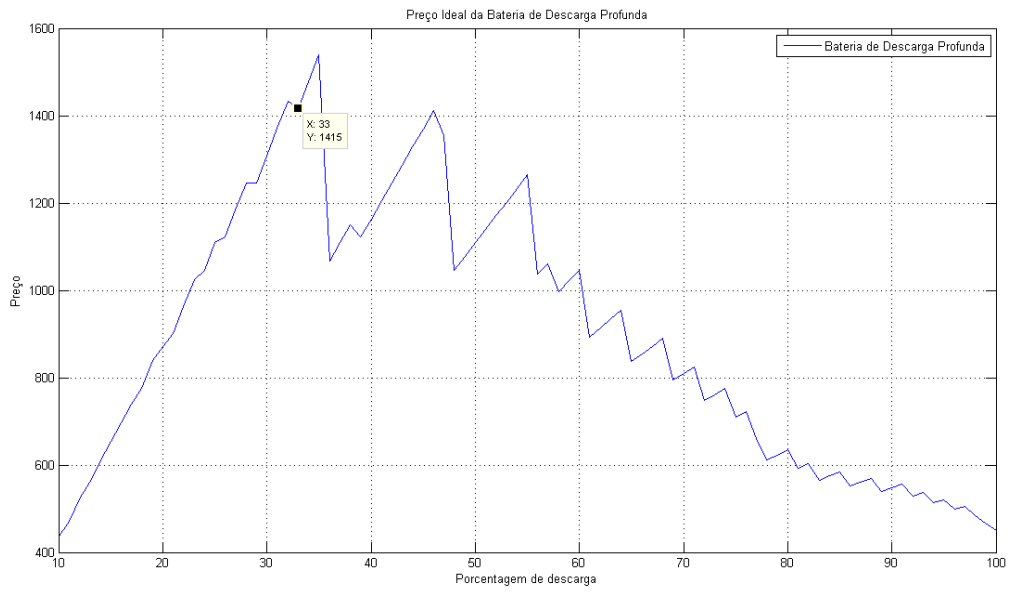


Figura 20 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria de Descarga Profunda

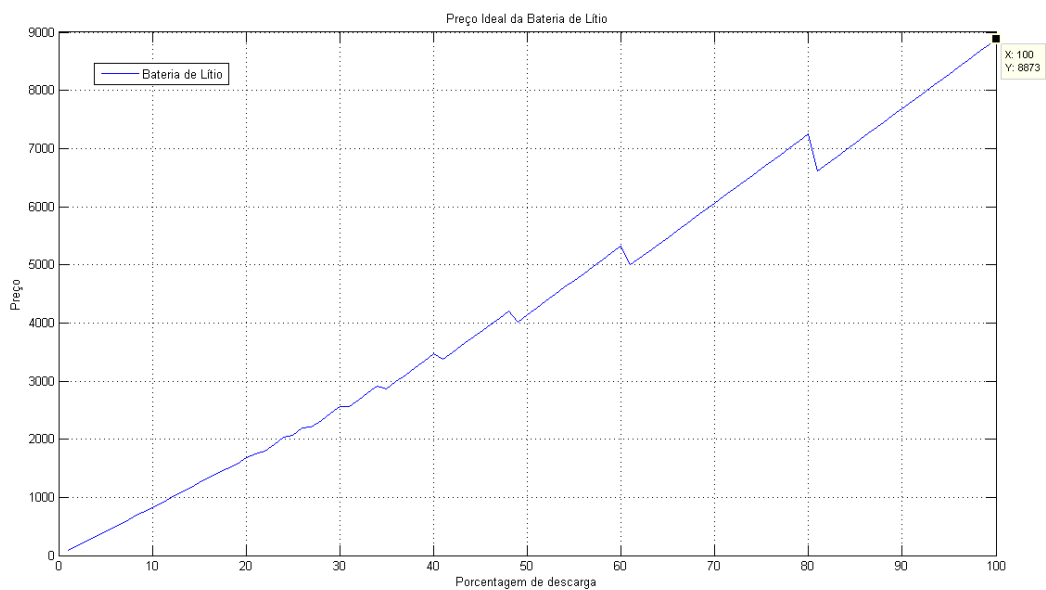


Figura 21 – Preço Ideal x Porcentagem de Descarga para Bateria de Lítio



## 5 Considerações Finais

Com o avanço das tecnologias utilizadas na transmissão e geração de energia elétrica, pode-se observar uma tendência na utilização de fontes geradoras de energia descentralizadas para abastecer toda a rede elétrica. A oportunidade de poder gerar a própria energia além de ser uma alternativa ecológica, contribui para a diminuição de perdas no sistema de transmissão da energia. Outro fator importante a ser tratado nessa oportunidade é o fato de gerar um grande retorno econômico ao consumidor.

Um dos métodos de gerar energia no seu próprio estabelecimento é usar de painéis fotovoltaicos. Porém, existe o fator limitante deste sistema de fornecer energia somente durante o dia. Uma das soluções para essa limitação é utilizar-se de uma smart grid, pois assim existe a possibilidade de comercializar a energia gerada pelos painéis durante o dia e ganhar créditos junto a concessionário para serem abatidos conforme a utilização da eletricidade. A adoção da tarifa branca disponibilizada pela CEMIG é outro ponto que influencia no uso de fontes de geração descentralizada. Usar de uma tarifa dinâmica, que varia de acordo com a hora do dia, faz com que sejam pensadas novas formas de economizar. Uma delas é alterar a rotina de consumo de energia elétrica, outra forma é utilizar-se de bancos de baterias para que supram a energia no horário de maior valor, ou seja, no horário de ponta.

Um ponto importante a ser lidado é o fato do Brasil, mesmo tendo produtores nacionais, comercializar baterias com um alto valor. Outro ponto importante é a falta de tecnologia. As baterias de lítio apresentam um melhor desempenho quando comparadas as baterias estacionárias e baterias de descarga profunda, entretanto, no momento atual, só são produzidas em casos específicos ou importadas, o que torna seu preço ainda maior.

Neste trabalho foram analisadas várias configurações de sistema de controle terciário de uma microrrede funcionando em regime semi ilhado. Conclui-se que, para os consumidores comerciais e residenciais, seja vantajoso tanto no sistema de tarifas convencionais, quanto no regime de tarifa branca o uso de painéis fotovoltaicos. A economia chega a cerca 54% para os consumidores comerciais e 35% para os consumidores residenciais ao longo dos 25 anos aos quais os painéis tem garantia de funcionamento. Porém, o uso de baterias não é compensatório para os pequenos usuários, uma vez que os preços das baterias atualmente são exorbitantes. Para valer a pena o preço da bateria deveria sofrer uma redução de cerca de 50%. Sendo assim, o uso de baterias será efetivo apenas em casos extremos como hospitais ou industrias as quais não podem ficar sem energia em momento algum, logo o banco de baterias poderia ser usado de forma emergencial, apenas para backup, dando assim tempo para que um gerador fosse acionado. Outro cenário que

talvez seja interessante, é utilizar de painéis fotovoltaicos e baterias em sistema rurais ou isolados onde há a necessidade de uso de geradores à diesel para prover energia elétrica. Esse último caso deve ser estudado mais detalhadamente, pois envolvem variáveis que fogem às que foram estudadas nessa monografia.



# Referências

- [1] ANEEL, “Modelo de geração distribuída,” 2015. [Online]. Available: <http://energygreenbrasil.com.br/?p=6381> Citado 2 vezes nas páginas 11 e 21.
- [2] T. R. de Oliveira, “Distribuição local de energia em corrente contínua: Estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede c.c. dedicado aos setores residencial e comercial,” Ph.D. dissertation, Belo Horizonte, Brasil, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 22 e 25.
- [3] ANEEL, “Tarifa branca,” 2015. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca> Citado 3 vezes nas páginas 11, 23 e 24.
- [4] A. University, “Dc microgrid laboratory [adaptado].” [Online]. Available: <http://www.et.aau.dk/departament/laboratory-facilities/dc-microgrid-lab/> Citado 2 vezes nas páginas 11 e 26.
- [5] Freedom, “Bateria estacionária freedom,” Disponível em <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.
- [6] OutbackPower, “Energycell nc series,” Disponível em <https://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Ficha>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 33.
- [7] N. E. SOLUTIONS, “Alm 12v35 data sheet,” Disponível em [https://www.neces.com/assets/12V35\\_datasheet\\_EN-7.pdf](https://www.neces.com/assets/12V35_datasheet_EN-7.pdf). Citado 2 vezes nas páginas 11 e 33.
- [8] CEMIG, “Valores de tarifa e serviços,” Disponível em [http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores\\_de\\_tarifa\\_e\\_servicos.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx). Citado 2 vezes nas páginas 13 e 24.
- [9] M. T. Tolmasquim, “Plano decenal de expansão de energia 2023,” Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2014. [Online]. Available: [http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023\\_ConsultaPublica.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023_ConsultaPublica.pdf) Citado na página 19.
- [10] ANEEL, “Cemig (mg) tem reajuste tarifário aprovado,” Disponível em [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/cemig-mg-tem-reajuste-tarifario-aprovado/656877?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/cemig-mg-tem-reajuste-tarifario-aprovado/656877?inheritRedirect=false). Citado na página 19.

- [11] M. T. Tolmasquinm, “Energia renovavel: Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica,” Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf> Citado na página 19.
- [12] ANEEL, “Resolução normativa nº 733, de 06 de setembro de 2016.” Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016733.pdf>. Citado na página 19.
- [13] F. Toledo, *Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes - Smart Grid Handbook*. Rio de Janeiro RJ: BRASPORT, 2012. Citado na página 21.
- [14] D. M. Falcão, “Integração de tecnologias para viabilização da smart grid,” *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, pp. 1–5, 2010. Citado na página 21.
- [15] P. Alto, “The green grid: Energy savings and carbon emissions reductions enabled by a smart grid,” *California: EPRI*, 2008. Citado na página 21.
- [16] R. Rivera, A. S. Esposito, and I. Teixeira, “Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local,” *Revista do BNDES, Rio de Janeiro*, no. 40, pp. 43–83, 2013. Citado na página 21.
- [17] M. N. Bacelar, “Avaliação do desempenho estático e dinâmico de uma microrrede na ocorrência de ilhamentos intencionais,” *Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: UFRJ*, 2013. Citado na página 21.
- [18] I. Binacional, “Integração ao sistema brasileiro,” Disponível em <https://www.itaipu.gov.br/energia/integracao-ao-sistema-brasileiro>. Citado na página 22.
- [19] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, “Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 24, pp. 387–405, 2013. Citado na página 22.
- [20] I. N. de Eficiência Energética, “O que é geração distribuída,” Disponível em [http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp). Citado na página 24.
- [21] ANEEL, “Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.” Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Citado na página 25.
- [22] —, “Geração distribuída,” Disponível em <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Citado na página 25.
- [23] Z. Shuai, J. Fang, F. Ning, and Z. J. Shen, “Hierarchical structure and bus voltage control of dc microgrid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3670 – 3682, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314788> Citado na página 26.

- [24] L. Meng, A. Luna, E. R. Díaz, B. Sun, T. Dragicevic, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Graells, and F. Andrade, “Flexible system integration and advanced hierarchical control architectures in the microgrid research laboratory of aalborg university,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1736–1749, 2015. Citado na página 26.
- [25] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- [26] A. A. Francisquini, “Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição,” 2006. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- [27] NeoSolar, “Visto em 15/03/2019,” Disponível em <https://www.neosolar.com.br>. Citado na página 30.
- [28] MinhaCasaSolar, “Visto em 15/03/2019,” Disponível em <https://www.minhacasasolar.com.br/painel-solar>. Citado na página 30.
- [29] EnergyShop, “Visto em 15/03/2019,” Disponível em <https://www.energystore.com.br/>. Citado na página 30.
- [30] C. Tiba, N. Fraidenraich, F. Lyra, and A. Nogueira, “Atlas solarimétrico do brasil: banco de dados terrestres,” *Recife: Editora Universitária da UFPE*, p. 32, 2000. Citado na página 30.



# Anexos



## ANEXO A – Código MatLab

```

1 clear all;
2 clc;
3 close all;
4 %limpar variaveis
5
6 Consumo_mensal = 300000; %Consumo mensal em Watts
7 Tarifas = [0.58684 1.13617 0.73035 0.47923];
8
9 % Definição de algumas constantes %
10 time = 24*60; %24h*60min = 1440min
11 ts = 24/time;
12 Passo = 0:ts:24; %passo a passo at as 24h
13 Autonomia = 30/100; %Autonomia da bateria cerca de 30% da
    potencia gasta diariamente
14 Horas_sol = 6; %Pelo Atlas Solarimetrico do Brasil
15 Consumo_diario = Consumo_mensal/30;
16 Pot_pico = Consumo_diario/7.2786; %7.2786 a area do grafico
    de consumo unitario
17 Pot_picoComercial = Consumo_diario/14.6274; %14.6274 a area
    do grafico de consumo unitario comercial
18 TrocaInversores = 2; %Numero de trocas dos inversores
19 Inv = 3; %Numero de inversores do sistema todo
20 Gasto_Ponta = 0; %KW gastos no horario de ponta
21 a = 1; %Variavel utilizada para o definir o minimo do random
    da geracao do painel solar
22 b = 1; %Variavel utilizada para o definir o maximo do random
    da geracao do painel solar
23 z = 0; %Variavel para a geracao do painel solar
24 %Variaveis para definir os preços
25 Ponta = 0;
26 Intermediaria = 0;
27 ForaPonta = 0;
28 PontaComBaterias = 0;
29 IntermediariaComBaterias = 0;
30 ForaPontaComBaterias = 0;

```

```
31 PontaSemBaterias = 0;
32 IntermediariaSemBaterias = 0;
33 ForaPontaSemBaterias = 0;
34 PontaComercial = 0;
35 IntermediariaComercial = 0;
36 ForaPontaComercial = 0;
37 PontaComercialPainel = 0;
38 IntermediariaComercialPainel = 0;
39 ForaPontaComercialPainel = 0;
40 Pot_hora = Consumo_diario/Horas_sol; %Potencia que dever ser
    produzida pelos paineis a cada hora
41 Filename = 'Microgrid.xlsx'; %Planilha com os valores dos
    paineis, baterias e inversores
42 Paineis = xlsread(Filename, 'Painis'); %L a aba contendo as
    informaes dos Painis
43 Inversores = xlsread(Filename, 'Inversores'); %L a aba contendo
    as informaes dos Inversores
44 BateriasDP = xlsread(Filename, 'BateriaDP'); %L a aba contendo
    as informaes das Baterias
45 Baterias = xlsread(Filename, 'Baterias'); %L a aba contendo as
    informaes das Baterias
46 Tensao = 12; %tens o da bateria
47
48 % Aloca o de todos os vetores e matrizes
49 Producao_Painel = zeros(time,1); %Produ o do Painel ao longo
    do dia
50 Consumidor_Residencial = zeros(time,1); %Perfil de consumo
    di rio de um consumidor residencial
51 Consumidor_Comercial = zeros(time,1); %Perfil de consumo di rio
    de um consumidor comercial
52 Sobre_Residencial = zeros(time,1); %Energia que sobra dos
    paineis ap s abastecer o consumidor residencial e as
    baterias
53 Sobre_Comercial = zeros(time,1); %Energia que sobra dos paineis
    ap s abastecer o consumidor comercial
54 ResidencialComBaterias = zeros(time,1); %Energia gasta pelo
    consumidor residencial com o uso dos paineis e baterias
55 ResidencialSemBaterias = zeros(time,1); %Energia gasta pelo
    consumidor residencial com o uso apenas dos paineis
```



```
56 ComercialSemBaterias = zeros(time,1); %Energia gasta pelo
    consumidor Comercial com o uso apenas dos paineis
57 SobreSemBateria = zeros(1441,1); %Energia que sobra dos paineis
    ap s abastecer o consumidor residencial
58 [PM,PN] = size(Paineis); %Tamanho da planilha
59 QuantidadeP = zeros(PM,1); %Aloca o vetor de zeros
60 PreçoP = zeros(PM,1); %Aloca o vetor de zeros
61 [IM,IN] = size(Inversores); %Tamanho da planilha
62 QuantidadeI = zeros(IM,1); %Aloca ao de vetor de zeros
63 PreçoI = zeros(IM,1); %Aloca o de vetor de zeros
64 [BM,BN] = size(Baterias); %Tamanho da Planilha
65 QuantidadeB = zeros(71,BM); %Aloca o de matriz de zeros
66 PreçoB = zeros(71,BM); %Aloca ao de matriz de zeros
67 Y = zeros(71,1); %Aloca ao de vetor de zeros
68 TrocasB = zeros(71,1); %Aloca ao de vetor de zeros
69 Pot_fornecidaB = zeros(71,BM);
70 Preço_min_Ideal = zeros(71,BM);
71 Preço_Bateria_Ideal = zeros(71,BM);
72 PreçoCicloB = zeros(71,BM);
73 KWh_BateriaB = zeros(71,BM);
74 [BDPM,BDPN] = size(BateriasDP); %Tamanho da Planilha
75 QuantidadeBDP = zeros(91,BDPM); %Aloca o de matriz de zeros
76 PreçoBDP = zeros(91,BDPM); %Aloca ao de matriz de zeros
77 Pot_fornecidaBDP = zeros(91,BDPM); %Aloca o de matriz de
    zeros
78 YDP = zeros(91,1); %Aloca ao de vetor de zeros
79 TrocasBDP = zeros(91,1); %Aloca ao de vetor de zeros
80 Preço_minDP_Ideal = zeros(91,BDPM); %Aloca o de matriz de
    zeros
81 Preço_BateriaDP_Ideal = zeros(91,BDPM); %Aloca o de matriz de
    zeros
82 difBDP = zeros(91,BDPM);
83 PreçoCicloBDP = zeros(91,BDPM);
84 KWh_BateriaBDP = zeros(91,BDPM);
85 YLi = zeros(100,1);
86 TrocasBLi = zeros(100,1);
87 QuantidadeBLi = zeros(100,1);
88 Pot_fornecidaBLi = zeros(100,1);
89 Preço_minLi_Ideal = zeros(100,1);
```

```
90 Preco_BateriaLi_Ideal = zeros(100,1);
91
92
93 for x = 1:1:1441; %Gera a curva de produção do painel
94     if x>360 && x<1082
95         r = a + (b-a).*rand;
96         Producao_Painel(x,1)= Pot_pico*r*sin(z/2);
97         z = z +0.00872664625997164788461845384244; %2*pi
           /(360-1080)
98     else
99         Producao_Painel(x,1) = 0;
100     end
101 end
102
103 for x = 1:1:1441; %Gera o gráfico de consumo residencial
104     if x>420 && x<481 %7 as 8h
105         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*250/1400;
106     elseif x>480 && x<601 %8 as 10h
107         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*300/1400;
108     elseif x>600 && x<661 %10 as 11h
109         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*400/1400;
110     elseif x>660 && x<721 %11 as 12h
111         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*800/1400;
112     elseif x>720 && x<781 %12 as 13h
113         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*300/1400;
114     elseif x>780 && x<901 %13 as 15h
115         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*350/1400;
116     elseif x>900 && x<961 %15 as 16h
117         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*400/1400;
118     elseif x>960 && x<1021 %16 as 17h
119         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*450/1400;
120     elseif x>1020 && x<1081 %17 as 18h
121         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*500/1400;
122     elseif x>1080 && x<1141 %18 as 19h
123         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*1100/1400;
124     elseif x>1140 && x<1201 %19 as 20h
125         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*1400/1400;
126     elseif x>1200 && x<1261 %20 as 21h
127         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*1150/1400;
```

```
128     elseif x>1260 && x< 1321 %21 as 22h
129         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*400/1400 ;
130     elseif x>1320 && x<1381 %22 as 23h
131         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*300/1400;
132     else
133         Consumidor_Residencial(x,1)=Pot_pico*180/1400;
134     end
135 end
136
137 for x = 1:1:1441; %Gera o gráfico de consumo comercial
138     if x>1 && x<61 %0 as 1h
139         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*327/1176;
140     elseif x>60 && x<121 %1 as 2h
141         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*327/1176;
142     elseif x>120 && x<181 %2 as 3h
143         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*289/1176;
144     elseif x>180 && x<241 %3 as 4h
145         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*280/1176;
146     elseif x>240 && x<301 %4 as 5h
147         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*280/1176;
148     elseif x>300 && x<361 %5 as 6h
149         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*299/1176;
150     elseif x>420 && x<481 %6 as 7h
151         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*317/1176;
152     elseif x>420 && x<481 %7 as 8h
153         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*467/1176;
154     elseif x>480 && x<541 %8 as 9h
155         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*905/1176;
156     elseif x>540 && x<601 %9 as 10h
157         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1083/1176;
158     elseif x>600 && x<661 %10 as 11h
159         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1120/1176;
160     elseif x>660 && x<721 %11 as 12h
161         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*933/1176;
162     elseif x>720 && x<781 %12 as 13h
163         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*775/1176;
164     elseif x>780 && x<841 %13 as 14h
165         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*999/1176;
166     elseif x>840 && x<901 %14 as 15h
```

```

167     Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1120/1176;
168     elseif x>900 && x<961 %15 as 16h
169         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1120/1176;
170     elseif x>960 && x<1021 %16 as 17h
171         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1055/1176;
172     elseif x>1020 && x<1081 %17 as 18h
173         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1176/1176;
174     elseif x>1080 && x<1141 %18 as 19h
175         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1045/1176;
176     elseif x>1140 && x<1201 %19 as 20h
177         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*1017/1176;
178     elseif x>1200 && x<1261 %20 as 21h
179         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*924/1176;
180     elseif x>1260 && x< 1321 %21 as 22h
181         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*607/1176 ;
182     elseif x>1320 && x<1381 %22 as 23h
183         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*457/1176;
184     else
185         Consumidor_Comercial(x,1)=(Pot_picoComercial)*373/1176;
186     end
187 end
188
189 for x = 1141:1:1321 %Contabiliza qual a potencia gasta no
    hor rio de ponta residencial
190     Gasto_Ponta = Gasto_Ponta + Consumidor_Residencial(x,1);
191 end
192
193 Carregando = -Gasto_Ponta;
194
195 for i = 1:1:1441; %Calcula o quanto sobra da potencia dos
    paineis ap s recarregar as baterias e abastecer o consumidor
    residencial
196     Sobra_Residencial(i,1) = Producao_Painel(i,1) -
        Consumidor_Residencial(i,1);
197     if Sobra_Residencial(i,1)>0
198         Carregando = Carregando + Sobra_Residencial(i,1);
199         if Carregando>0
200             Sobra_Residencial(i,1) = Sobra_Residencial(i,1);
201         else

```

```
202         Sobra_Residencial(i,1) = 0;
203     end
204 else
205     Sobra_Residencial(i,1) = 0;
206 end
207 end
208
209 for i = 1:1:1441; %Calcula o quanto sobra da pot ncia dos
    pain is ap s abastecer o consumidor comercial
210     Sobra_Comercial(i,1) = Producao_Painel(i,1) -
        Consumidor_Comercial(i,1);
211     if Sobra_Comercial(i,1)>0
212         Sobra_Comercial(i,1) = Sobra_Comercial(i,1);
213     else
214         Sobra_Comercial(i,1) = 0;
215     end
216 end
217
218 for i=1:1:1441 %Gera o gr fico de consumo residencial ap s o
    abastecimento pelos pain is e pelas baterias
219     ResidencialComBaterias(i,1) = Producao_Painel(i,1) -
        Consumidor_Residencial(i,1);
220     if ResidencialComBaterias(i,1)<0
221         ResidencialComBaterias(i,1)=-ResidencialComBaterias(i,1)
222         ;
223         if i>1080 && i<1261
224             ResidencialComBaterias(i,1)= 0;
225         end
226     else
227         ResidencialComBaterias(i,1) = 0;
228     end
229 end
230 for i=1:1:1441 %Gera o gr fico de consumo residencial ap s o
    abastecimento apenas pelos pain is
231     ResidencialSemBaterias(i,1) = Producao_Painel(i,1) -
        Consumidor_Residencial(i,1);
232     if ResidencialSemBaterias(i,1)<0
233         ResidencialSemBaterias(i,1)=-ResidencialSemBaterias(i,1)
```

```

;
234     else
235         SobreSemBateria(i,1) = ResidencialSemBaterias(i,1);
236         ResidencialSemBaterias(i,1) = 0;
237     end
238 end
239
240 for i=1:1:1441 %Gera o gráfico de consumo comercial após o
    abastecimento apenas pelos painéis
241     ComercialSemBaterias(i,1) = Producao_Painel(i,1) -
        Consumidor_Comercial(i,1);
242     if ComercialSemBaterias(i,1) < 0
243         ComercialSemBaterias(i,1) = -ComercialSemBaterias(i,1);
244     else
245         ComercialSemBaterias(i,1) = 0;
246     end
247 end
248
249 %Tarifas
250
251 for x=1:1:1441 %Calcula quantos KW foram gastos em horário de
    ponta, intermediário e fora de ponta
252     if x > 1140 && x < 1321
253         Ponta = Ponta + Consumidor_Residencial(x,1) / 60;
254         PontaComBaterias = PontaComBaterias +
            ResidencialComBaterias(x,1) / 60;
255         PontaSemBaterias = PontaSemBaterias +
            ResidencialSemBaterias(x,1) / 60;
256         PontaComercial = PontaComercial + Consumidor_Comercial(x,
            1) / 60;
257         PontaComercialPainel = PontaComercialPainel +
            ComercialSemBaterias(x,1) / 60;
258     elseif x > 1080 && x < 1141
259         Intermediaria = Intermediaria + Consumidor_Residencial(x,
            1) / 60;
260         IntermediariaComBaterias = IntermediariaComBaterias +
            ResidencialComBaterias(x,1) / 60;
261         IntermediariaSemBaterias = IntermediariaSemBaterias +
            ResidencialSemBaterias(x,1) / 60;

```

---

```

262     IntermediariaComercial = IntermediariaComercial +
        Consumidor_Comercial(x,1)/60;
263     IntermediariaComercialPainel =
        IntermediariaComercialPainel + ComercialSemBaterias(x
        ,1)/60;
264     elseif x>1320 && x<1380
265         Intermediaria = Intermediaria + Consumidor_Residencial(x
        ,1)/60;
266         IntermediariaComBaterias = IntermediariaComBaterias +
        ResidencialComBaterias(x,1)/60;
267         IntermediariaSemBaterias = IntermediariaSemBaterias +
        ResidencialSemBaterias(x,1)/60;
268         IntermediariaComercial = IntermediariaComercial +
        Consumidor_Comercial(x,1)/60;
269         IntermediariaComercialPainel =
        IntermediariaComercialPainel + ComercialSemBaterias(x
        ,1)/60;
270     else
271         ForaPonta = ForaPonta + Consumidor_Residencial(x,1)/60;
272         ForaPontaComBaterias = ForaPontaComBaterias +
        ResidencialComBaterias(x,1)/60;
273         ForaPontaSemBaterias = ForaPontaSemBaterias +
        ResidencialSemBaterias(x,1)/60;
274         ForaPontaComercial = ForaPontaComercial +
        Consumidor_Comercial(x,1)/60;
275         ForaPontaComercialPainel = ForaPontaComercialPainel +
        ComercialSemBaterias(x,1)/60;
276     end
277 end
278
279 SobrasComBaterias = trapz(Passo ,Sobra_Residencial); %Calcula
        quantos KW sobram ap s abastecer o consumidor residencial e
        as baterias
280 SobrasSemBaterias = trapz(Passo ,SobraSemBateria); %Calcula
        quantos KW sobram ap s abastecer apenas o consumidor
        residencial
281 SobrasComercial = trapz(Passo ,Sobra_Comercial); %Calcula quantos
        KW sobram ap s abastecer o consumidor comercial
282 TotalSemTarifa = 25*365*(Ponta*Tarifas(1) + Intermediaria*
```

```

    Tarifas(1) + ForaPonta*Tarifas(1))/1000; %Pre o total sem a
    tarifa branca
283 TotalComTarifa = 25*365*(Ponta*Tarifas(2) + Intermediaria*
    Tarifas(3) + ForaPonta*Tarifas(4))/1000; %Pre o total com a
    tarifa branca
284 TotalComBateria = 25*365*(PontaComBaterias*Tarifas(2) +
    IntermediariaComBaterias*Tarifas(3) + ForaPontaComBaterias*
    Tarifas(4) - SobrasComBaterias*Tarifas(4))/1000; %Pre o total
    com a tarifa branca, uso das baterias no hor rio de pico e
    venda da energia restante dos pain is a pre o de fora de
    ponta
285 TotalSemBateria = 25*365*(PontaSemBaterias*Tarifas(2) +
    IntermediariaSemBaterias*Tarifas(3) + ForaPontaSemBaterias*
    Tarifas(4) - SobrasSemBaterias*Tarifas(4))/1000; %Pre o
    total com a tarifa branca e venda da energia restante dos
    pain is a pre o de fora de ponta
286 TotalComercialSemTarifa = 25*365*(PontaComercial*Tarifas(1) +
    IntermediariaComercial*Tarifas(1) + ForaPontaComercial*
    Tarifas(1))/1000; %Pre o total SEM a tarifa branca
287 TotalComercialComTarifa = 25*365*(PontaComercial*Tarifas(2) +
    IntermediariaComercial*Tarifas(3) + ForaPontaComercial*
    Tarifas(4))/1000; %Pre o total COM a tarifa branca
288 TotalComercialComPainel = 25*365*(PontaComercialPainel*Tarifas
    (2) + IntermediariaComercialPainel*Tarifas(3) +
    ForaPontaComercialPainel*Tarifas(4) - SobrasComercial*Tarifas
    (4))/1000; %Pre o total com a tarifa branca e venda da
    energia restante dos pain is a pre o de fora de ponta
289
290 %%%Parte do Painel Solar%%%
291
292 for X = 1:1:PM;
293     QuantidadeP(X,1) = Pot_hora/Paineis(X,1); %potencia diaria/
        potencia do painel
294     N_paineis = ceil(QuantidadeP); %arredonda o n mero de
        paineis para cima
295     PrecoP(X,1) = N_paineis(X,1) * Paineis(X,2); %multiplicar o
        n mero de paineis pelo seu respectivo pre o
296 end
297 [Preco_minP, IndexP] = min(PrecoP); %encontrar o mais barato

```



---

```

298 Pot_gerada = N_paineis(IndexP,1)*Horas_sol*Paineis(IndexP,1)
      *25*365;%calcular a potencia diaria gerada com a area da
      curva solar ao longo dos 25 anos
299
300 %%%%Parte do Inversor%%%%%%%%
301
302 if Pot_pico>Pot_hora %o inversor deve ser dimensionado de forma
      a atender a demanda maxima
303     Demanda = Pot_pico;
304 else
305     Demanda = Pot_hora;
306 end
307 for X = 1:1:IM;
308     QuantidadeI(X,1) = Demanda/Inversores(X,1);%potencia maxima
      demandada/potencia do inversor
309     N_Inversores = ceil(QuantidadeI);%arredonda o nmero de
      inversores para cima
310     PrecoI(X,1) = N_Inversores(X,1) * Inversores(X,2); %
      multiplicar o nmero de inversores pelo seu respectivo
      pre o
311 end
312 [Preco_minI, IndexI] = min(PrecoI); %encontrar o mais barato
313 PrecoInversor = Preco_minI*TrocaInversores*Inv; %Calcula o
      pre o total dos inversores
314
315 %%%%Parte da Bateria%%%%%%%%
316
317 %Para Baterias Estacionarias
318
319 for X=10:1:80
320     Y(X) = (5.61350816710872e-13)*X^10 +(-2.54575873185477e-10)*
      X^9 + (4.96876379812551e-08)*X^8 + (-5.45554904661231e
      -06)*X^7 + (0.000369223810239039)*X^6 +
      (-0.0158374187214828)*X^5 + (0.424643977275059)*X^4 +
      (-6.70619439584411)*X^3 + (55.5684851527453)*X^2 +
      (-280.024898406164)*X + (3467.59619030416);
321     %y(x) a equa o do nmero de descargas da bateria de
      acordo com a profundidade de descargas
322     TrocasB(X-9) = ceil(25*365/Y(X)); %Nmero trocas de acordo

```

```

    com a profundidade de descarga da bateria
323   for Z = 1:1:BM;
324       QuantidadeB(X-9,Z) = (Gasto_Ponta/60)/(Baterias(Z,1)*
           Tensao*(X/100));%Demanda*tempo de autonomia / [ 12V*
           Corrente*Profundidade de descarga]
325       N_Baterias = ceil(QuantidadeB);%arredonda o n mero de
           baterias para cima
326       PrecoB(X-9,Z) = N_Baterias(X-9,Z) * Baterias(Z,2)*
           TrocasB(X-9); %multiplicar o n mero de baterias pelo
           seu respectivo pre o e o numero de trocas
327
328       Pot_fornecidaB(X-9,Z) = N_Baterias(X-9,Z)*Baterias(Z,1)*
           Tensao*(X/100);%Potencia fornecidade a cada ciclo de
           descarga
329       Preco_min_Ideal(X-9,Z) =((Tarifas(2)*(Pot_fornecidaB(X
           -9,Z)/1000)*(Y(X)*TrocasB(X-9)))-1.05*PrecoInversor
           *0.5 )/1.05; %Pre o M nimo ideal para o banco de
           baterias
330       Preco_Bateria_Ideal(X-9,Z) =(Preco_min_Ideal(X-9,Z))/(
           N_Baterias(X-9,Z)*TrocasB(X-9)); %Pre o M nimo
           ideal para uma nica bateria
331
332       PrecoCicloB(X-9,Z) = (1.05*PrecoB(X-9,Z)+1.05*
           PrecoInversor*0.5)/(Y(X)*TrocasB(X-9));
333       KWh_BateriaB(X-9,Z) = PrecoCicloB(X-9,Z)/(Pot_fornecidaB
           (X-9,Z)/1000);
334
335       end
336   end
337   [Preco_minB, IndexB]=min(PrecoB(:)); %Encontra o pre o minimo do
           banco de baterias e seu respectivo ndice
338   [Row, Col]=ind2sub(size(PrecoB), IndexB);%row = profundidade de
           descargas & col = o respectivo banco de baterias da tabela
339   Profundidade = Row+9; %Profundidade de descarga da bateria
340   Pot_fornecida = N_Baterias(Row, Col)*Baterias(Col,1)*Tensao*(
           Profundidade/100);%Potencia fornecidade a cada ciclo de
           descarga
341
342   %Para Baterias de Descarga Profunda

```

```

343
344 for X=10:1:100
345     YDP(X) = -2.997074917946451e-04*X^4 + 0.0748145954453291*X^3
           - 5.526657103090593*X^2 + 34.419462927491860*X +
           7.422221662129888e+03;
346     %YDP(x) a equação do número de descargas da bateria de
           acordo com a profundidade de descargas
347     TrocasBDP(X-9) = ceil(25*365/YDP(X)); %Número de trocas de
           acordo com a profundidade de descarga da bateria
348     for Z = 1:1:BDPM;
349         QuantidadeBDP(X-9,Z) = (Gasto_Ponta/60)/(BateriasDP(Z,1)
           *Tensao*(X/100)); %KW gastos durante o horário de
           ponta / [12V*Corrente*Profundidade de descarga]
350         %N_BateriasDP = (QuantidadeBDP); %arredonda o número de
           baterias para cima
351         N_BateriasDP = ceil(QuantidadeBDP); %arredonda o número
           de baterias para cima
352         PrecoBDP(X-9,Z) = N_BateriasDP(X-9,Z) * BateriasDP(Z,2) *
           TrocasBDP(X-9); %multiplicar o número de baterias
           pelo seu respectivo preço e o número de trocas
353         Pot_fornecidaBDP(X-9,Z) = N_BateriasDP(X-9,Z)*BateriasDP
           (Z,1)*Tensao*(X/100); %Potência fornecida a cada
           ciclo de descarga
354         Preco_minDP_Ideal(X-9,Z) =((Tarifas(2)*(Pot_fornecidaBDP
           (X-9,Z)/1000)*(25*365)) -1.05*PrecoInversor*0.5 )
           /1.05;
355         Preco_BateriaDP_Ideal(X-9,Z) =(Preco_minDP_Ideal(X-9,Z))
           /(N_BateriasDP(X-9,Z)*TrocasBDP(X-9));
356         PrecoCicloBDP(X-9,Z) = (1.05*PrecoBDP(X-9,Z)+1.05*
           PrecoInversor*0.5)/(25*365);%(YDP(X)*TrocasBDP(X-9));
357         KWh_BateriaBDP(X-9,Z) = PrecoCicloBDP(X-9,Z)/(
           Pot_fornecidaBDP(X-9,Z)/1000);
358     end
359 end
360 [Preco_minBDP, IndexBDP]=min(PrecoBDP(:)); %Encontra o preço
           mínimo do banco de baterias e seu respectivo índice
361 [RowDP, ColDP]=ind2sub(size(PrecoBDP), IndexBDP); %row =
           profundidade de descargas & col = o respectivo banco de
           baterias da tabela

```

```

362 ProfundidadeDP = RowDP+9; %Profundidade de descarga da bateria
363 Pot_fornecidaDP = N_BateriasDP (RowDP, ColDP) *BateriasDP (ColDP, 1) *
    Tensao*(ProfundidadeDP /100); %Potencia fornecidade a cada
    ciclo de descarga
364
365 %Para Baterias de L t io
366
367 for X=1:1:100
368     if X<4.6
369         YLi(X) = -1.5263e+006*X + 8.0208e+006;
370     elseif X>4.5 && X<40
371         YLi(X) = -10.122*X^3 + 1536.4*X^2 - 76069*X + 1.2999e
            +006;
372     else
373         YLi(X) = -540*X + 95800;
374     end
375     %YLi(x) a equa o do n mero de descargas da bateria de
        acordo com a profundidade de descargas
376     TrocasBLi(X) = ceil(25*365/YLi(X)); %N mero trocas de
        acordo com a profundidade de descarga da bateria
377     QuantidadeBLi(X) = (Gasto_Ponta/60)/(100*Tensao*(X/100)); %KW
        gastos durante o hor rio de ponta / [ 12V*Corrente*
        Profundidade de descarga]
378     N_BateriasLi = ceil(QuantidadeBLi); %arredonda o n mero de
        baterias para cima
379
380     Pot_fornecidaBLi(X) = N_BateriasLi(X)*100*Tensao*(X/100); %
        Potencia fornecidade a cada ciclo de descarga
381     Preco_minLi_Ideal(X) =(( Tarifas (2) *(Pot_fornecidaBLi(X)
        /1000) *(25*365) -1.05*PrecoInversor*0.5 ) /1.05;
382     Preco_BateriaLi_Ideal(X) =(Preco_minLi_Ideal(X) )/(
        N_BateriasLi(X)*TrocasBLi(X) );
383
384 end
385
386 %%%Calculo dos KW%%
387
388 PrecoMicrogrid = 1.05*(Preco_minP + PrecoInversor + Preco_minB);
389 PrecoMicrogrid2 = 1.05*(Preco_minP + PrecoInversor +

```

```

    Preco_minBDP);
390 PrecoMicrogrid3 = 1.05*(Preco_minP + (2/3)*PrecoInversor);
391 KWh_Painel = (1.05*Preco_minP+1.05*(1/2)*PrecoInversor)/((
    Pot_gerada/1000));
392 PrecoCiclo = (1.05*Preco_minB+1.05*(1/2)*PrecoInversor)/(Y(
    Profundidade)*TrocasB(Row));
393 KWh_Bateria = PrecoCiclo/(Pot_fornecida/1000);
394 PrecoCicloDP = (1.05*Preco_minBDP+1.05*(1/2)*PrecoInversor)/((
    YDP(ProfundidadeDP)*TrocasBDP(RowDP));
395 KWh_BateriaDP = PrecoCicloDP/(Pot_fornecidaDP/1000);
396
397 %Display%
398
399 fprintf('Para um gasto mensal de %d temos: \n',Consumo_mensal);
400 fprintf('\nKWh_Painel = R$ %.2f \n',KWh_Painel);
401 fprintf('KWh_Bateria Estacion ria = R$ %.2f \n',KWh_Bateria);
402 fprintf('KWh_Bateria Descarga Profunda = R$ %.2f \n',
    KWh_BateriaDP);
403 fprintf('\nPre o total dos Pain is R$ %.2f, com %d pain is
    gerando %2.2f KW por dia \n',Preco_minP,N_paineis(IndexP,1),
    Pot_gerada/(25*365*1000));
404 fprintf('Pre o total dos Inversores R$ %.2f, com %d inversores
    que ser o trocados %d \n',PrecoInversor,Inv,TrocaInversores)
    ;
405 fprintf('Pre o total das Baterias Estacion rias R$ %.2f.
    Banco composto por %d baterias trocadas %d vezes e
    descarregas %d%% \n', Preco_minB,N_Baterias(Row,Col),TrocasB(
    Col),Profundidade);
406 fprintf('Pre o total das Baterias Descarga Profunda R$ %.2f.
    Banco composto por %d baterias trocadas %d vezes e
    descarregas %d%% \n', Preco_minBDP,N_BateriasDP(RowDP,ColDP),
    TrocasBDP(ColDP),ProfundidadeDP);
407 fprintf('\nPre o dos Paineis e Inversores = R$ %.2f \n',
    PrecoMicrogrid3);
408 fprintf('Pre o dos Paineis, Inversores e Baterias
    Estacion rias = R$ %.2f \n',PrecoMicrogrid);
409 fprintf('Pre o dos Pain is, Inversores e Baterias de Descarga
    Profunda = R$ %.2f \n',PrecoMicrogrid2);
410 fprintf('\nPara o consumidor RESIDENCIAL temos:\n')

```

```

411 fprintf('\nPre o total SEM a tarifa branca = R$ %.2f \n',
        TotalSemTarifa);
412 fprintf('Pre o total COM a tarifa branca = R$ %.2f \n',
        TotalComTarifa);
413 fprintf('Pre o total com a tarifa branca COM uso de baterias =
        R$ %.2f \n',TotalComBateria);
414 fprintf('Pre o total com a tarifa branca SEM uso de baterias =
        R$ %.2f \n',TotalSemBateria);
415 fprintf('\nPara o consumidor COMERCIAL temos:\n')
416 fprintf('\nPre o total SEM a tarifa branca = R$ %.2f \n',
        TotalComercialSemTarifa);
417 fprintf('Pre o total COM a tarifa branca = R$ %.2f \n',
        TotalComercialComTarifa);
418 fprintf('Pre o total com a tarifa branca com uso dos paineis =
        R$ %.2f \n',TotalComercialComPainel);
419
420 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Figuras%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
421
422 figure (1);
423 axes('Xlim',[0,24], 'XTick',0:1:24, 'NextPlot', 'add');
424 grid on;
425 plot(Passo, Producao_Painel, Passo, Consumidor_Residencial);
426 legend('Energia gerada pelos Pain is Solares','Gasto de
        Energia pelo consumidor residencial');
427 xlabel('Horas');
428 ylabel('Watts');
429 title('Energia Gerada Pelos Pain is Solares x Consumo de
        Energia');
430
431 figure (2);
432 axes('Xlim',[0,24], 'XTick',0:1:24, 'NextPlot', 'add');
433 grid on;
434 plot(Passo, SobreSemBateria, Passo, ResidencialSemBaterias);
435 legend('Energia dos paineis ap s abastecer a resid ncia',
        'Gasto de Energia pelo consumidor residencial');
436 xlabel('Horas');
437 ylabel('Watts');
438 title('Energia Gerada Pelos Pain is Solares x Consumo de
        Energia sem o uso de baterias');

```

```
439
440 figure(3);
441 axes('Xlim',[0,24],'XTick',0:1:24,'NextPlot','add');
442 grid on;
443 plot(Passo,Sobra_Residencial,Passo,ResidencialComBaterias);
444 legend('Energia dos paineis ap s abastecer a resid ncia e
         baterias','Gasto de Energia pelo consumidor residencial');
445 xlabel('Horas');
446 ylabel('Watts');
447 title('Energia Gerada Pelos Pain is Solares x Consumo de
         Energia com o uso de baterias');
448
449 figure(4);
450 axes('Xlim',[0,24],'XTick',0:1:24,'NextPlot','add');
451 grid on;
452 plot(Passo,Producao_Painel,Passo,Consumidor_Comercial);
453 legend('Gera o de Energia pelos Pain is Solares','Gasto de
         Energia pelo consumidor comercial');
454 xlabel('Horas');
455 ylabel('Watts');
456 title('Energia Gerada Pelos Pain is Solares x Consumo de
         Energia');
457
458 figure(5);
459 axes('Xlim',[0,24],'XTick',0:1:24,'NextPlot','add');
460 grid on;
461 plot(Passo,Sobra_Comercial,Passo,ComercialSemBaterias);
462 legend('Gera o de Energia pelos Pain is Solares','Gasto de
         Energia pelo consumidor comercial');
463 xlabel('Horas');
464 ylabel('Watts');
465 title('Energia Gerada Pelos Pain is Solares x Consumo de
         Energia');
466
467 figure(6);
468 plot(10:80,Y(10:80),10:80,YDP(10:80),Profundidade,Y(Profundidade
         ),'-p',ProfundidadeDP,YDP(ProfundidadeDP),'-p');
469 legend('Bateria Estacion ria','Bateria Descarga Profunda');
470 xlabel('Porcentagem de descarga');
```

```
471 ylabel('Número de descargas');
472 title('Compara o entre os dois tipos de baterias encontrados'
473       ');
473 grid on;
474
475 figure(7);
476 plot(1:100,Preco_BateriaLi_Ideal);
477 legend('Bateria de Lítio');
478 xlabel('Porcentagem de descarga');
479 ylabel('Preço');
480 title('Preço Ideal da Bateria de Lítio');
481 grid on;
482
483 figure(8);
484 plot(10:100,Preco_BateriaDP_Ideal);
485 legend('Bateria de Descarga Profunda');
486 xlabel('Porcentagem de descarga');
487 ylabel('Preço');
488 title('Preço Ideal da Bateria de Descarga Profunda');
489 grid on;
490
491 figure(9);
492 plot(10:80,Preco_Bateria_Ideal);
493 legend('Bateria Estacionária');
494 xlabel('Porcentagem de descarga');
495 ylabel('Preço');
496 title('Preço Ideal da Bateria Estacionária');
497 grid on;
```