

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

VITOR TELES CORREIA

**MODELAGEM PLIM APLICADA AO ESTUDO DE VIABILIDADE DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA UTILIZANDO TARIFAÇÃO
BRANCA DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

VITOR TELES CORREIA

**MODELAGEM PLIM APLICADA AO ESTUDO DE VIABILIDADE DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA UTILIZANDO TARIFAÇÃO
BRANCA DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção de título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

VITOR TELES CORREIA

MODELAGEM PLIM APLICADA AO ESTUDO DE VIABILIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA UTILIZANDO TARIFAÇÃO BRANCA DE ENERGIA ELÉTRICA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 20 de novembro de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Automação Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
UTFPR

Prof. M.Sc Guilherme Alceu Schneider
UTFPR

Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel
Orientador - UTFPR

RESUMO

CORREIA, Vitor T. **Modelagem PLIM Aplicada ao Estudo de Viabilidade de Geração Fotovoltaica em uma Residência utilizando Tarifação Branca de Energia**. 2015. 46 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Os consumidores de energia elétrica estão cada vez mais buscando alternativas para suprir suas demandas por energia elétrica. Isto se deve principalmente ao crescente aumento do custo da energia elétrica aliado com a redução do custo da tecnologia de geração de energia fotovoltaica, bem como da melhoria das tecnologias acerca das células fotovoltaicas, melhorando principalmente o rendimento e a vida útil destas. Porém, muitos destes tem o receio de optar por uma geração independente pois não se sabe se financeiramente será vantajoso. Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma ferramenta para estas pessoas, utilizando conceitos de programação matemática, de forma a analisar se a instalação de uma geração de energia fotovoltaica é vantajosa levando em consideração o perfil de carga da unidade consumidora onde será feita a instalação. Para esta análise é considerado o sistema de créditos proposto pela ANEEL em sua Resolução Normativa 482/12 bem como o sistema de tarifação branca de energia elétrica. Para resolução do modelo matemático foi utilizado conceitos de pesquisa operacional, utilizando a técnica de programação linear inteira mista. O trabalho não tem como finalidade apresentar uma solução geral para qualquer tipo de residência, mas somente demonstrar o modelo matemático utilizado para análise realizada na residência em estudo.

Palavras chave: Energia Solar. Pesquisa Operacional. PLIM. Sistema de Créditos ANEEL. Tarifação Branca.

ABSTRACT

CORREIA, Vitor T. **Modelagem PLIM Aplicada ao Estudo de Viabilidade de Geração Fotovoltaica em uma Residência utilizando Tarifação Branca de Energia**. 2015. 46 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Electricity consumers are increasingly seeking alternatives to meet their demands for electricity. This is mainly due to the rising electricity cost combined with a cost reduction of photovoltaic power generation as well as photovoltaic cells technologies improvement, especially improving its efficiency and lifetime. However, many of these consumers distrust opting for an independent generation because it is unknown whether it will be financially advantageous. This study has as main objective to present a tool for these people, using concepts of mathematical programming, in order to analyze whether an installation of a photovoltaic is viable, considering the load profile of its residence, where the installation will occur. Both electricity credit system proposed by ANEEL on his Normative Resolution 482/12 and the white tariff system are considered for this analysis. For the resolution of the mathematical model Operations Research concepts were used, using a mixed integer linear programming technique. The work is not intended to present a general solution for any residence, but only to demonstrate the mathematical model used in the analysis carried out at the residence in study.

Key words: Solar Energy. Operations Research. MILP. ANEEL energy credit system. White Tariff.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | TEMA..... | 11 |
| 1.2 | DELIMITAÇÃO DO ESTUDO | 12 |
| 1.3 | PROBLEMA..... | 12 |
| 1.4 | OBJETIVOS..... | 13 |
| 1.4.1 | Objetivo Geral..... | 13 |
| 1.4.2 | Objetivos Específicos..... | 13 |
| 1.5 | JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 1.6 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 14 |
| 1.7 | EMBASAMENTO TEÓRICO..... | 14 |
| 1.8 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA..... | 16 |
| 2.1.1 | Conceitos Básicos | 16 |
| 2.1.2 | Efeito Fotovoltaico | 17 |
| 2.1.3 | Células Fotovoltaicas..... | 18 |
| 2.1.4 | Módulos Fotovoltaicos | 22 |
| 2.2 | REGULAMENTAÇÕES ANEEL..... | 24 |
| 2.2.1 | Modalidade Tarifária Branca | 24 |
| 2.2.2 | Resolução Normativa nº 482/12..... | 25 |
| 2.3 | PESQUISA OPERACIONAL..... | 26 |
| 2.3.1 | A Natureza da Pesquisa Operacional | 27 |
| 2.3.2 | Modelagem Matemática..... | 27 |
| 2.3.3 | Programação Linear | 28 |
| 3 | COLETA E CÁLCULO DE DADOS..... | 29 |
| 3.1 | COLETA DE DADOS DE CONSUMO..... | 29 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR | 30 |
| 3.3 | DADOS DE ENERGIA GERADA COM PAINEL FOTOVOLTAICO | 31 |
| 4 | DESCRIÇÃO DO MODELO | 33 |
| 4.1 | DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO..... | 33 |
| 4.1.1 | Parâmetros de Consumo de Energia da Residência..... | 33 |
| 4.1.2 | Parâmetros de Geração de Energia Fotovoltaica..... | 33 |
| 4.1.3 | Parâmetros de custo da energia | 34 |
| 4.2 | DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO | 35 |
| 4.3 | FUNÇÃO OBJETIVO DO MODELO | 36 |
| 4.4 | RESTRIÇÕES DO MODELO | 36 |
| 4.4.1 | Custo de energia horário..... | 36 |
| 4.4.2 | Decisão para instalar ou não a geração fotovoltaica | 36 |
| 4.4.3 | Quantidade de energia devolvida à concessionária em forma de empréstimo gratuito | 37 |
| 4.4.4 | Balanco energético | 37 |
| 4.4.5 | Balanco entre empréstimos e créditos de energia | 37 |
| 5 | IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO..... | 38 |
| 5.1 | LIMITAÇÕES DO MODELO PROPOSTO | 40 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 41 |
| | REFERÊNCIAS | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Esquema de geração fotovoltaica em uma residência | 12 |
| Figura 2 – Ilustração do Efeito Fotovoltaico | 18 |
| Figura 3 – Estrutura de uma célula fotovoltaica. | 18 |
| Figura 4 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino. | 19 |
| Figura 5 – Célula fotovoltaica de silício policristalino. | 20 |
| Figura 6 – Célula Fotovoltaica de Filmes Finos. | 20 |
| Figura 7 – Exemplo de célula fotovoltaica híbrida (CIGS). | 21 |
| Figura 8 – Influência radiação solar na operação do módulo fotovoltaico. | 23 |
| Figura 9 – Distribuição Tarifária – Comparativo entre Modalidade Convencional e Branca | 25 |
| Figura 10 – Analisador de Potência MARH-21. | 29 |
| Figura 11 – Conexão dos alicates de tensão e corrente do MARH-21..... | 30 |
| Figura 12 – Conexão MARH-21 na Residência. | 30 |
| Figura 13 – Gráfico representativo da distribuição consumo/geração na residência..... | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparativo entre as tecnologias de produção de células fotovoltaicas..... | 22 |
| Tabela 2 – Valores de Irradiação Solar média horária em Curitiba no mês de setembro.. | 31 |
| Tabela 3- Valores de Irradiação Solar e Geração fotovoltaica por hora..... | 32 |
| Tabela 4 – Parâmetros de consumo de energia da residência | 33 |
| Tabela 5 – Parâmetros de geração de energia do painel fotovoltaico de 1kWp..... | 34 |
| Tabela 6 – Parâmetros dos postos tarifários e a relação entre eles..... | 35 |
| Tabela 7 - Variáveis utilizadas no modelo | 36 |
| Tabela 8 – Valores da distribuição ótima de consumo/geração | 38 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CC | Corrente Contínua |
| CA | Corrente Alternada |
| kWp | quilowatt pico |
| kWh | quilowatt-hora |
| PLIM | Programação Linear Inteira-Mista |
| <i>Prosumer</i> | Consumidor e Produtor de energia elétrica |
| RN | Resolução Normativa |

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados o tema, as delimitações do estudo, os problemas e premissas; bem como os objetivos, a justificativa e o procedimento metodológico utilizados no trabalho.

1.1 TEMA

As tradicionais fontes de energia elétrica ainda constituem a base da geração de energia ao redor do mundo, sendo elas as tradicionais usinas hidrelétricas, as termelétricas a carvão e petróleo e as usinas nucleares. Com a redução de possíveis locais para implantar grandes centrais de geração e o aumento acelerado da demanda de energia em todo mundo, a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes que não poluem têm levado à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade.

O uso de fontes alternativas vem crescendo muito em todo o mundo, embora estas sejam ainda tímidas e com participação muito reduzida na matriz energética mundial. Com a redução do custo da tecnologia e de implantação destes sistemas, o preço da energia gerada por fontes alternativas já se equipara ao da energia produzida por fontes tradicionais (VILLALVA, GAZOLLI, 2012).

Devido à redução de custo no investimento inicial de implantação de fontes alternativas, aliado aos crescentes aumentos impostos pelo governo brasileiro e pelas concessionárias de energia no custo de energia elétrica, a microgeração de energia em residências vem tornando-se cada vez mais uma solução viável para os pequenos consumidores.

Um exemplo de microgeração que pode ser citado é a geração fotovoltaica, através de painéis solares. A Figura 1 mostra um esquema utilizando este tipo de geração.

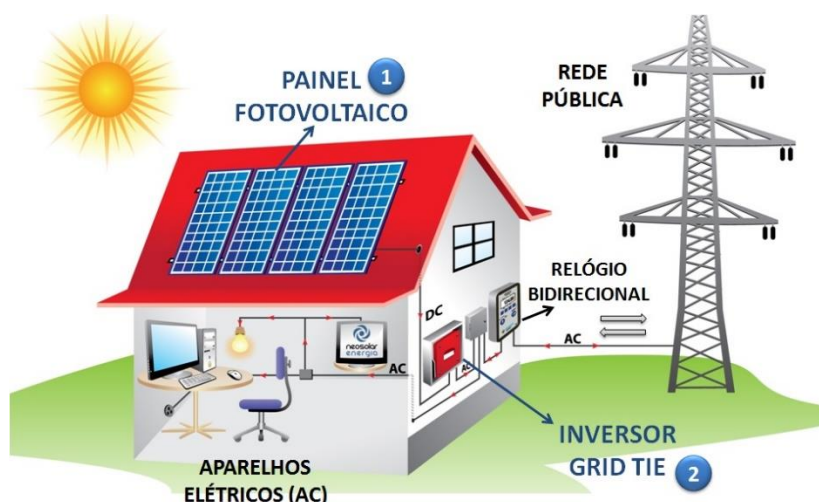


Figura 1 – Esquema de geração fotovoltaica em uma residência

Fonte: <http://www.perbianco.com/project/fotovoltaica-2/PROBLEMA> Acesso: 01/09/2015

Pode-se notar pelo esquema que o painel fotovoltaico pode fornecer energia diretamente para os equipamentos da residência como também pode injetar a energia na rede. Segundo a ANEEL, o consumidor que injetar energia na rede irá receber créditos de energia que poderão ser utilizados posteriormente pelo consumidor (ANEEL, 2012). O grande problema é que, se o consumidor tiver um excedente de créditos de energia, estes irão se acumular indefinidamente. Ou seja, o consumidor não irá vender a energia para a concessionária e sim estará “emprestando” para utilizá-la no futuro.

Importante ressaltar que se todos os dias o consumidor injetar mais energia na rede do que de fato está consumindo, este nunca terá um retorno financeiro do investimento que fez ao fazer a instalação dos painéis fotovoltaicos. Devido à esta limitação do sistema de crédito de energia regulamentado pela Resolução Normativa nº 482/12 (ANEEL, 2012), nem sempre será vantajoso à um consumidor instalar um sistema de microgeração em sua residência.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo pretende analisar a viabilidade de instalação de uma geração de energia fotovoltaica em uma residência, levando em consideração a Tarifação Branca de Energia e também o sistema de créditos de energia proposto pela RN nº 482/12.

1.3 PROBLEMA

Para análise desta situação, serão considerados os dados de consumo de energia coletados em uma residência localizada no município de Curitiba, durante um período de

24 horas no mês de setembro. Será considerada a modalidade tarifária branca de energia elétrica bem como o sistema de créditos de energia. Além disto, será utilizado como opção para microgeração um painel fotovoltaico de potência instalada de 1 kWp.

No contexto apresentado acima, este estudo pretende responder as seguintes perguntas: É vantajoso ao consumidor de energia elétrica produzir energia elétrica em sua residência? Qual é o valor mínimo da energia cobrado pela concessionária que se torna vantajoso a implementação de uma geração distribuída na residência?

A premissa norteadora do estudo é a utilização de conceitos de Programação Linear Inteira-Mista (PLIM) para minimizar os gastos com energia elétrica na residência em questão.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O intuito deste trabalho é analisar a viabilidade econômica de uma implementação de uma geração fotovoltaica em uma residência tendo como base o perfil de carga desta.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Coleta de dados de consumo de energia elétrica da residência;
- Estimar geração de energia de um painel fotovoltaico de 1 kWp de potência instalada;
- Elaborar um modelo matemático que represente o consumo de energia da residência;
- Análise da distribuição do consumo de energia elétrica da residência visando a minimização do custo de energia;
- Encontrar, de modo iterativo, o valor mínimo que seria vantajoso a geração de energia na residência em questão.

1.5 JUSTIFICATIVA

Como mencionado anteriormente, o crescente aumento do custo da energia vem fazendo com que consumidores queiram tornar-se produtores de energia elétrica, principalmente através de microgeração. Porém, por falta de conhecimento na área, muitos ignoram o tempo necessário para que haja retorno financeiro do investimento inicial ou até

mesmo se este retorno irá acontecer. Devido a este receio, muitos investimentos não são realizados.

O intuito deste trabalho é estabelecer uma ferramenta capaz de analisar os dados de consumo de um consumidor de energia elétrica e fazer um estudo de viabilidade para instalação de microgeração de energia solar fotovoltaica. Esta ferramenta pode vir a auxiliar os consumidores e futuros *prosumers* (consumidor e produtor de energia elétrica) a tomar a decisão sobre a instalação do painel solar.

Sob o aspecto da concessionária de energia, devido à possibilidade de “empréstimo” de energia por parte dos consumidores, a concessionária pode utilizar esta energia vinda por empréstimo para reduzir a utilização de energias não renováveis (termelétricas, por exemplo) que são mais custosas tanto econômica quanto ambientalmente.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa visa encontrar uma resposta para os problemas descritos no item 1.3 deste trabalho. Dito isto, em relação à natureza e a utilização de resultados, trata-se de uma pesquisa aplicada. Para a obtenção de dados, segundo Marconi e Lakatos (2010), tem-se um processo de observação direta extensiva utilizando a técnica de testes utilizando equipamentos de coleta de dados em uma residência. Quanto aos conhecimentos técnicos relativos ao trabalho, estes serão feitos através de pesquisa bibliográfica.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Em relação ao tema de energia fotovoltaica, Villalva e Gazoli (2012); sobre as regulamentações de tarifação e geração distribuída, ANEEL (2012), ANEEL (2010). Já no que se refere aos conceitos de pesquisa operacional, Taha (2008), Hillier e Lieberman (2013).

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será composto de sete capítulos. No capítulo 1, introdução deste trabalho, são estabelecidos o tema e suas delimitações, definido o problema e premissas, bem como os objetivos e justificativa. Também são abordados os procedimentos metodológicos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos utilizados neste trabalho, embasamentos acerca de geração de energia solar fotovoltaica, pesquisa operacional e algumas regulamentações da ANEEL.

O capítulo 3 apresenta como foi realizada a coleta de dados de consumo e também o cálculo dos dados de geração de energia fotovoltaica.

O capítulo 4 apresenta como foi desenvolvido o modelo matemático, citando as variáveis, parâmetros, restrições e função objetivo do mesmo.

O capítulo 5 mostra como foi feita a implementação do modelo descrito no item anterior e o que se esperava como retorno da programação.

O capítulo 6 trata da discussão dos resultados obtidos e o capítulo 7 faz as considerações finais e conclusões do estudo. Ao final são apresentadas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

O Sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. À rigor, qualquer fonte renovável de energia, de alguma forma, é proveniente da energia solar que chega ao planeta Terra, seja na forma de luz ou calor (Villalva e Gazoli, 2012). Em especial, existe a geração de energia fotovoltaica, que consiste na captação e conversão da energia solar em corrente elétrica e conseqüentemente a geração de energia elétrica.

2.1.1 Conceitos Básicos

São muitos os fatores que podem vir a implicar na quantidade de energia que é possível converter utilizando a energia fotovoltaica. Nos itens a seguir, serão relacionados aqueles que são pertinentes a este trabalho.

2.1.1.1 Energia Solar

A energia solar é o nome dado a energia proveniente do Sol em forma de luz e calor. Esta energia chega até o nosso planeta através de ondas eletromagnéticas, propagando-se pelo espaço na forma de radiação eletromagnética. A energia que esta onda pode transmitir está relacionada diretamente a sua frequência de oscilação. A relação de Planck (também chamada de equação Planck-Einstein) nos dá a relação entre a energia da onda e sua frequência, conforme a equação (1).

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

sendo E a energia da onda, f a frequência da mesma e h uma constante nomeada de constante de Planck. A diferença de frequência das ondas emitidas pelo sol pode variar de 10^{-14} a 10^2 Hertz.

As ondas eletromagnéticas provenientes do Sol podem produzir diversos efeitos nos objetos e seres vivos. Isto se deve a grande gama de valores possíveis para a radiação solar, chamado de espectro de radiação solar. Qualquer espectro da radiação solar, seja este de luz visível ao olho humano ou não, transporta uma certa quantidade de energia que pode ser captada na forma de calor ou captada para futura transformação em energia elétrica.

Para mensurar a quantidade de energia que chega no nosso planeta devido a radiação solar, tem-se a grandeza irradiância (também chamada de irradiação), expressa em W/m^2 (watt por metro quadrado). Trata-se de uma medida de potência por uma área. Sabe-se que a potência é a medida de variação de energia em um certo intervalo de tempo. Desta forma, quanto maior a radiação solar, maior é a variação de energia e conseqüentemente, maior será a irradiância.

2.1.2 Efeito Fotovoltaico

As células fotovoltaicas, utilizadas em sistemas de geração de energia, são fabricadas com materiais semicondutores, ou seja, possuem características intermediárias entre condutores e isolantes. Devido a sua abundância na natureza, o silício pode ser obtido a partir do quartzo, encontrado na areia da praia, e por isto é o material normalmente utilizado para produção destas células (Nascimento, 2004).

Através de procedimentos adequados, é obtido o silício na forma pura. Porém, este elemento químico não possui elétrons livres, o que o torna um péssimo condutor de energia. Para contornar este problema, é realizado um processo de dopagem, que consiste em combinar um cristal de silício à certas impurezas que possuem características atômicas diferentes do silício. Desta forma, é possível obter um material ou com excesso de elétrons livres, semicondutor tipo N, ou com um excesso de lacunas, semicondutor tipo P (Marques et al., 2012).

Separadamente, estes materiais são eletricamente neutros. Porém, ao unir uma camada de semicondutor tipo N com uma camada de semicondutor tipo P (Figura 2), forma-se um campo elétrico entre os elétrons livres da camada tipo N com as lacunas da camada P, de forma que acontece uma combinação entre os elétrons livres da camada tipo N com as lacunas em excesso na camada tipo P. Esta combinação de materiais semicondutores é o que dá origem a célula fotovoltaica.

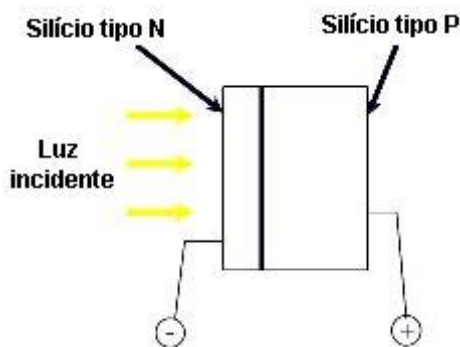


Figura 2 – Ilustração do Efeito Fotovoltaico

Fonte: http://paginas.fe.up.pt/~ee97234/efeito_fotovoltaico.htm. Acesso em 21/10/2015

Quando a energia proveniente da radiação solar incide sobre o material tipo N, os fótons chocam-se com os elétrons desta camada, fornecendo energia para estes, fazendo com que haja um fluxo mais intenso de elétrons. Por consequência disto, se conectarmos um terminal em cada uma das camadas, poderá ser observado um fluxo de corrente elétrica da camada tipo P para a camada tipo N, e conseqüentemente, haverá uma diferença de potencial entre os terminais (Villalva e Gazoli, 2012).

2.1.3 Células Fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica consiste na junção de materiais semicondutores, conforme explicado no item 2.1.2. A Figura 3 ilustra a estrutura de uma célula fotovoltaica comercial.

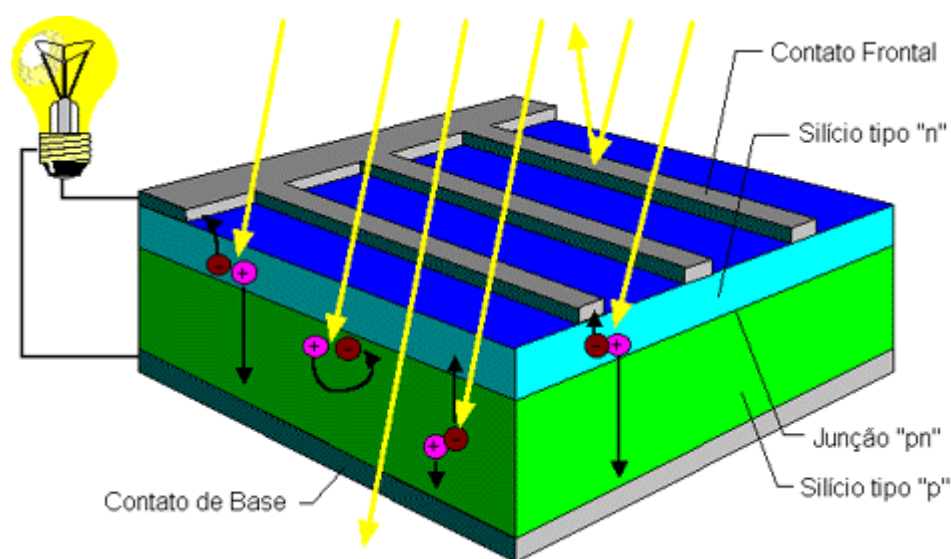


Figura 3 – Estrutura de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Blue Sol, 2015. Acesso em 23/10/2015.

Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células fotovoltaicas. A seguir, serão abordadas as tecnologias mais utilizadas mostrando suas principais características.

2.1.3.1 Célula de silício monocristalino

Para este tipo de tecnologia, blocos de silício ultrapuro são aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação do cristal de silício (Método de Czochralski) e tendo como produto final um lingote de silício monocristalino. Este lingote é serrado e fatiado na forma de pequenas bolachas ou *wafers*. Porém, estes não possuem a propriedade de uma célula fotovoltaica. Para tal, é feito o processo de dopagem em ambas as faces do *wafers*, formando as camadas do tipo N e P, constituindo a célula fotovoltaica. Por fim, a célula recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material antirreflexivo, para aumentar a absorção de luz pela célula. Desta forma, obtém-se como produto final a célula fotovoltaica monocristalina, conforme Figura 4. Estas células normalmente possuem um aspecto azulado, mas dependendo do tratamento antirreflexo, esta pode assumir outras colorações (Villalva e Gazoli, 2012).



*Figura 4 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino.
Fonte: Blue Sol, 2012. Acesso em 23/10/2015.*

Uma das desvantagens dessa célula é o seu alto custo de produção. Em contrapartida a isto, estas células são as mais eficientes encontradas no mercado, atingindo valores de rendimento entre 15 e 18% (Villalva e Gazoli, 2012).

2.1.3.2 Célula de silício policristalino

O processo de fabricação do silício policristalino difere do processo do silício monocristalino em sua fase inicial. O lingote de silício policristalino é formado por um

aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes. Após isto, este lingote é serrado produzindo os wafers e posteriormente passam pelo mesmo processo de dopagem e de acabamento final, como na célula de silício monocristalino (Villalva e Gazoli, 2012). A Figura 5 apresenta um exemplo de célula de silício policristalino.



*Figura 5 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.
Fonte: Portal Solar, 2011. Acesso em 23/10/2015.*

Estas células possuem uma eficácia comercial entre 13 e 15%, valor ligeiramente menor que as células de monocristalino. Porém o seu custo de fabricação é menor do que aquele, compensando a redução da eficiência (Villalva e Gazoli, 2012).

2.1.3.3 Células de filmes finos

Estas células são produzidas por uma tecnologia bem mais recente do que as duas descritas anteriormente. Diferentemente das células cristalinas, produzidas através de lingotes de silício, as células de filmes finos são produzidas através de uma deposição de finas camadas de materiais (silícios e impurezas) sobre uma base, que pode ser flexível ou rígida (Villalva e Gazoli, 2012). A Figura 6 apresenta um exemplo de célula de filmes finos.



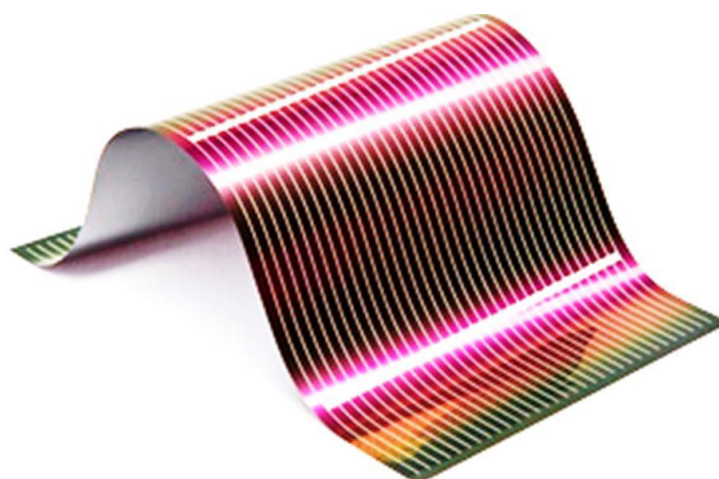
*Figura 6 – Célula Fotovoltaica de Filmes Finos.
Fonte: Portal Solar. Acesso em 23/10/2015.*

O processo de deposição permite que pequenas quantidades de matéria-prima sejam empregadas para fabricar o módulo, evitando desperdícios que ocorrem no processo de serragem dos lingotes de silício. Além disto, as temperaturas empregadas neste processo de fabricação (entre 200 e 500°C) são bem inferiores as utilizadas no processo de células cristalinas (1500°C aproximadamente). Desta forma, além de consumir menos matéria prima, este processo gasta menos energia na produção e conseqüentemente, tem o um custo de produção muito baixo (Villalva e Gazoli, 2012).

Estes dispositivos são produzidos em qualquer dimensão. A única limitação é a área da base onde será fabricada. Portanto, não existe a distinção entre célula e módulo, não existe quando esta tecnologia é utilizada, como será visto no item 2.1.4 deste trabalho.

2.1.3.4 Células híbridas

É uma célula resultante da combinação da célula cristalina convencional com a célula de filme fino, acrescida posteriormente de uma fina camada de silício sem impurezas. Comparada com as células solares cristalinas, apresenta uma maior produção de energia em elevadas temperaturas (Villalva e Gazoli, 2012). A Figura 7 apresenta um exemplo de célula híbrida.



*Figura 7 – Exemplo de célula fotovoltaica híbrida (CIGS).
Fonte: Blue Sol Educacional, 2012.*

2.1.3.5 Comparação entre as tecnologias

As diferentes tecnologias utilizadas para a produção das células levam a diferentes valores de eficiência para cada uma delas. Algumas tecnologias possuem eficiência maior,

porém isto acarreta em um maior custo da fabricação da mesma. Diante disto, a Tabela 1 faz um comparativo entre as diversas tecnologias e suas respectivas eficiências.

Tabela 1 – Comparativo entre as tecnologias de produção de células fotovoltaicas.

| Material da Célula Fotovoltaica | Eficiência da Célula em Laboratório | Eficiência da célula comercial | Eficiência dos módulos comerciais |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Silício monocristalino | 24,7% | 18,0% | 14,0% |
| Silício policristalino | 19,8% | 15,0% | 13,0% |
| Silício cristalino de filme fino | 19,2% | 9,5% | 7,9% |
| Célula solar híbrida | 20,1% | 17,3% | 15,2% |

Fonte: Adaptado Villalva e Gazoli, 2012.

2.1.4 Módulos Fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é um dispositivo fotovoltaico básico. A energia produzida por uma célula sozinha é pequena. Diante disto, é necessário que diversas células sejam agrupadas de forma a produzir, painéis, placas ou módulos fotovoltaicos.

Um módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de células, montadas em uma estrutura rígida, conectando eletricamente os terminais de uma célula com a outra. Usualmente, estas células são conectadas em série de modo a se obter um maior valor de tensão (Villalva e Gazoli, 2012). Os módulos fotovoltaicos encontrados no mercado podem ter potências variando desde 50 à 250 Watts, apresentam tensões de até 70 Volts e correntes elétrica de até 8 ampères. A tecnologia utilizada é o fator que faz com exista uma gama tão grande de valores disponíveis no mercado.

2.1.4.1 Influência da radiação solar

A corrente elétrica e, conseqüentemente, a energia que um módulo fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da radiação solar que incide sobre suas células. Com uma irradiância de 1000 W/m² o módulo é capaz de fornecer a sua corrente nominal (Villalva e Gazoli, 2012).

Como pode ser observado na Figura 8, a corrente máxima que o módulo pode fornecer varia proporcionalmente à radiação. Em outras palavras, se a radiação for reduzida, a capacidade de gerar energia é comprometida severamente.

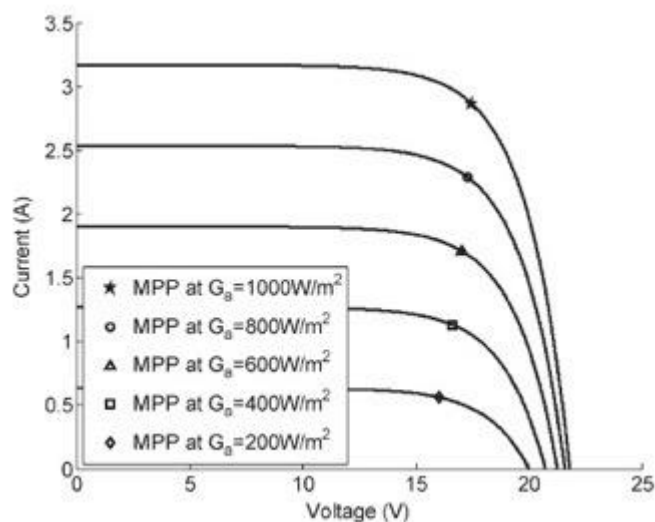


Figura 8 – Influência radiação solar na operação do módulo fotovoltaico.

Fonte: http://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html. Acesso: 23/10/2015.

2.1.4.2 Eficiência do Módulo Fotovoltaico

Segundo Villalva e Gazoli, 2012, a eficiência de um módulo fotovoltaico é dada pela razão entre a potência máxima gerada ou de pico do módulo ($P_{m\acute{a}x}$) pelo produto da área do módulo (A) e a irradiação solar (I), conforme equação (2).

$$n = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A \cdot I} \quad (2)$$

Rearranjando a equação, pode-se encontrar uma relação de quanto de potência é gerada pelo painel em função da radiação solar incidente, equação (3).

$$P = \frac{A \cdot n \cdot I}{1000} \quad [kW] \quad (3)$$

Ainda, em termos de energia gerada a cada hora, com o tempo considerado de 1 hora, conforme equações (4) e (5).

$$E = P \cdot t = \frac{A \cdot n \cdot I}{1000} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$P = \frac{A \cdot n \cdot I}{1000} \quad [kWh] \quad (5)$$

2.2 REGULAMENTAÇÕES ANEEL

2.2.1 Modalidade Tarifária Branca

No ano de 2011 foi aprovado pela ANEEL a Nota Técnica nº 362/10 que propunha uma alteração na distribuição tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia. A estrutura tarifária proposta consiste basicamente em duas modalidades, sendo elas:

- Modalidade convencional monômnia, com um preço da energia sem distinção horária, como é praticado atualmente;
- Modalidade branca monômnia, com três preços de energia de acordo com a hora e dia da semana.

Para melhor definir a modalidade tarifária branca, esta é basicamente dividida em três postos tarifários:

- Posto de Ponta: composto de três horas consecutivas a serem escolhidas pela concessionária de energia, levando em conta o horário de maior consumo na sua região de fornecimento;
- Posto Intermediário: consiste em um período de duas horas, sendo uma delas logo antes do Posto de Ponta e uma logo após o mesmo;
- Posto Fora de Ponta: consiste em todas as horas do dia que não forem contemplados pelos dois outros postos.

Durante os dias da semana, esta divisão entre postos tarifários acontece conforme descrito. Porém, nos finais de semana, não é aplicado os postos de Ponta e Intermediário, ou seja, qualquer consumo de energia no final de semana é enquadrado no posto Fora de Ponta.

Segundo a ANEEL, qualquer instalação com fornecimento em baixa tensão, poderá optar por aderir a Tarifação Branca. A modalidade tarifária branca não valerá para unidades consumidoras da classe iluminação pública ou àquelas com faturamento na modalidade de pré-pagamento, conforme a Figura 9.

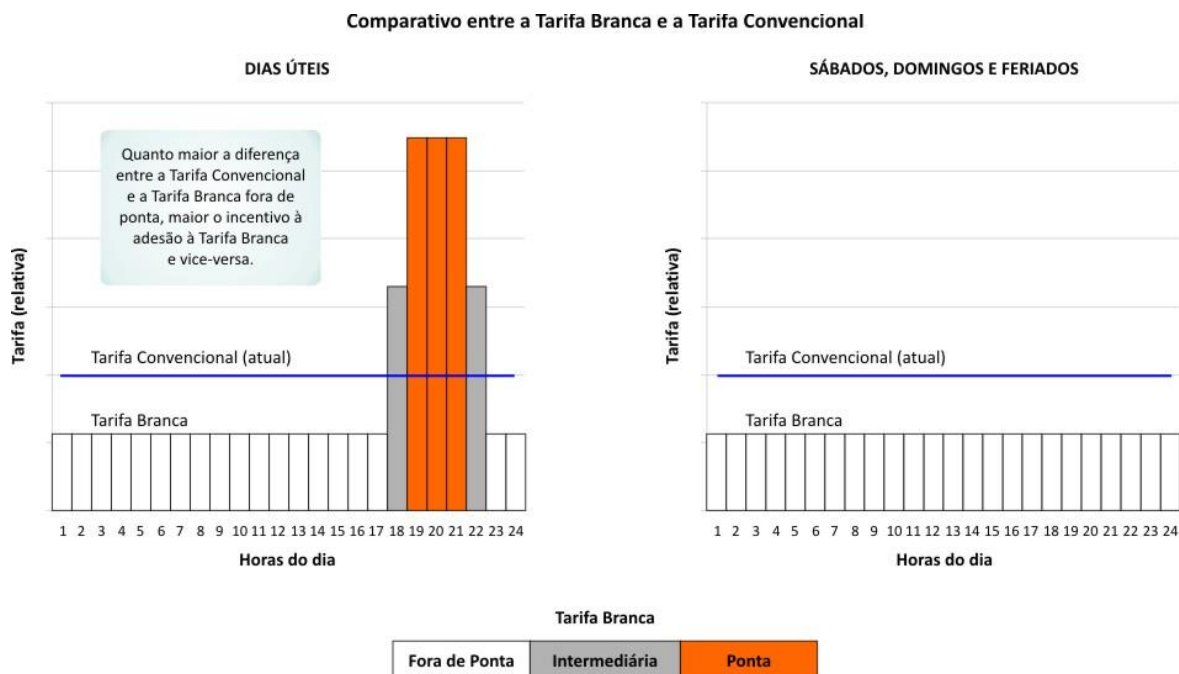


Figura 9 – Distribuição Tarifária – Comparativo entre Modalidade Convencional e Branca
 Fonte: ANEEL. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=781> >

Os valores de cada uma destas tarifas e postos tarifários a serem cobrados, bem como o horário específico das três horas consecutivas do Posto de Ponta, serão estabelecidos por cada concessionária de energia. Porém, para tal, faz-se necessário a regulamentação de fato por parte da ANEEL e a definição de alguns aspectos pelo INMETRO quanto ao novo medidor a ser implementado na unidade consumidora em caso de opção pela Tarifa Branca. A princípio, o valor a ser estabelecido segue os seguintes critérios:

- A tarifa no Posto Fora de Ponta deverá ser menor do que a tarifa Convencional;
- A tarifa no Posto Intermediário deverá custar três vezes mais do que a tarifa no Posto Fora de Ponta;
- A tarifa no Posto de Ponta deverá custar cinco vezes mais do que a tarifa no Posto Fora de Ponta.

2.2.2 Resolução Normativa nº 482/12

Em abril de 2012, a ANEEL aprovou uma resolução normativa que trata sobre o acesso de microgeração e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Nesta resolução é regulamentado o sistema de compensação de energia elétrica. Neste sistema, a energia ativa injetada por uma unidade consumidora com microgeração

ou minigeração distribuída é cedida por meio de empréstimo gratuito à concessionária de energia local. Posteriormente, esta mesma unidade consumidora ou uma outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora geradora dos créditos será compensada.

Em outras palavras, o consumo de energia elétrica ativa à ser faturado é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto tarifário, quando for o caso. Quando houver excedente (energia injetada maior que energia consumida), a distribuidora de energia deverá abater do consumo dos meses subsequentes.

Ainda, em cada unidade consumidora, a compensação dos créditos deve dar-se primeiramente no mesmo posto tarifário em que ocorreu a geração, e posteriormente nos demais postos tarifários. Porém, quando forem utilizados os créditos para compensar um posto tarifário diferente do da geração, a diferença entre as tarifas deve ser observada.

Tenha-se como exemplo uma situação da Tarifa Branca, na qual a tarifa no Posto Fora de Ponta é de R\$ 0,20 e a tarifa no Posto de Ponta de R\$ 1,00. Para que seja possível compensar uma demanda de 10 kWh no horário de pico, deve ser gerado e “emprestado” à distribuidora de energia uma energia total de 50 kWh.

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

Desde a Revolução Industrial, o mundo presencia um crescimento extraordinário no tamanho e complexidade das organizações. Um ponto crucial para essa mudança foi o aumento da divisão do trabalho e a segmentação das responsabilidades gerenciais nestas corporações. Porém, junto com o aspecto positivo deste crescimento surgem problemas de maior complexidade nestas organizações como, por exemplo, a alocação de recursos disponíveis para as diversas atividades de maneira mais eficiente para toda a organização. Este tipo de problema junto com a necessidade de encontrar uma melhor solução para resolvê-los criaram as condições necessária para o surgimento da pesquisa operacional (Hillier et al., 2013).

O início de estudos envolvendo conceitos de pesquisa operacional (PO) geralmente é atribuído às ações militares no início da Segunda Guerra Mundial. Devido à guerra, era necessário alocar de forma eficiente os escassos recursos disponíveis para as diversas atividades militares. Para isto, foram selecionados diversos cientistas que formaram os

primeiros grupos da história de pesquisa sobre operações (neste caso, operações militares) (Hillier et al., 2013).

Após o fim da guerra, o sucesso obtido na utilização de PO nas operações militares fez com que surgisse um interesse de outras organizações fora do ambiente militar. Com o crescimento exponencial na indústria no pós-guerra, novas técnicas de PO foram elaboradas, aprimorando os resultados e ampliando a aplicabilidade destas técnicas. Um exemplo essencial disto, foi o método simplex, utilizado para resolução de problemas de programação linear, desenvolvido por George Dantzig, em 1947 (Hillier et al., 2013).

2.3.1 A Natureza da Pesquisa Operacional

A pesquisa operacional resolve pesquisas sobre operações, como o próprio nome deixa implícito. Em outras palavras, a PO é aplicada a resolução de problemas que envolvem a condução e coordenação de operações de organizações. A área de aplicação deste estudo é bem abrangente, atuando desde a manufatura até problemas de telecomunicações. As técnicas utilizadas para encontrar uma solução são bem parecidas, porém, é necessário que seja feito um estudo sobre cada um dos assuntos para que sejam levados em consideração os aspectos primordiais de cada um destes (Hillier et al., 2013).

De forma geral, o estudo inicia-se observando-se e formulando-se cuidadosamente o problema que se deseja resolver, bem como levantando os dados pertinentes a questão. A próxima etapa é construir um modelo (tipicamente matemático) de forma a representar a essência do problema real. Diante disto, parte-se do pressuposto de que o modelo é uma representação suficiente das características essenciais do problema e de que futuras soluções obtidas pelo modelo também são válidas para o problema real. Por fim, são realizadas experimentações para testar a hipótese inicial e modificá-la se necessário. Esta última etapa é também chamada de validação do modelo (Hillier et al., 2013). Em termos gerais, pode-se simplificar este processo em 4 etapas: entendimento do problema, coleta de dados relevantes, modelagem e validação do modelo.

2.3.2 Modelagem Matemática

Para o estudo de um problema real, buscando a otimização através de conceitos de PO, é necessário primeiramente que exista um problema a ser resolvido. Para tal, é necessário que seja criado um modelo capaz de representar a realidade estudada e, com

ajuda deste, encontrar uma solução que explique como contornar o problema inicialmente proposto (Taha, 2008).

Este modelo matemático é composto basicamente de quatro tipos de elementos, sendo eles:

- Variáveis de decisão: são as variáveis do problema a ser resolvido. Serão os valores a serem retornados pelo modelo como uma solução para o problema inicialmente proposto. Estas podem ser variáveis contínuas ou binárias. As variáveis binárias usualmente são utilizadas como variáveis de decisão;
- Parâmetros: são valores fixos do problema, utilizados para representa-lo matematicamente;
- Restrições: funções que representam as limitações do sistema estudado. Pode ser do tipo linear ou não linear;
- Função objetivo: é uma função matemática que define o problema analisado em função das variáveis, bem como o objetivo do estudo. Assim como as restrições, pode ser linear ou não linear.

2.3.3 Programação Linear

Dentro da pesquisa operacional existem diversas técnicas matemáticas de modelagem de um problema de uma organização capazes de proporcionar soluções para estes. Dentre eles, está a de programação matemática, que visa obter uma solução ótima para o problema utilizando símbolos matemáticos para representar as variáveis do sistema real estudado (Taha, 2008).

Em PO, não existe uma única técnica para resolver todos os problemas na prática. O que irá definir a técnica a ser utilizada é a complexidade do modelo matemático proposto. A técnica mais utilizada em PO é a programação linear, na qual a função objetivo e as restrições são representadas matematicamente por funções lineares (Taha, 2008).

A programação linear, dependendo do tipo de solução pretendida, pode ser do tipo inteira ou inteira mista. A programação linear inteira é quando as variáveis do sistema assumem somente valores discretos (inteiros). Já a programação linear inteira mista permite que as variáveis assumam tantos valores discretos quanto contínuos.

3 COLETA E CÁLCULO DE DADOS

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados para coleta e/ou cálculo de dados necessários para a implementação deste estudo.

3.1 COLETA DE DADOS DE CONSUMO

Os dados relativos ao consumo de energia elétrica em uma residência são de fundamental importância para este estudo. Sem estes, não é possível quantificar a necessidade da unidade consumidora tampouco o custo da energia elétrica na residência ou a possível economia que a instalação de um painel fotovoltaico pode trazer.

Para esta coleta, foi utilizado um analisador de potência modelo MARH-21 (Figura 10). O analisador foi programado para coletar dados elétricos da instalação, como por exemplo tensão, corrente e potência ativa. Este analisador foi conectado ao quadro geral da residência através de alicates de corrente e de tensão. O analisador foi programado para gravar os dados a cada 5 minutos. As Figura 11 e Figura 12 apresentam como foi realizada a instalação do aparelho na residência.



Figura 10 – Analisador de Potência MARH-21.
Fonte: Autor

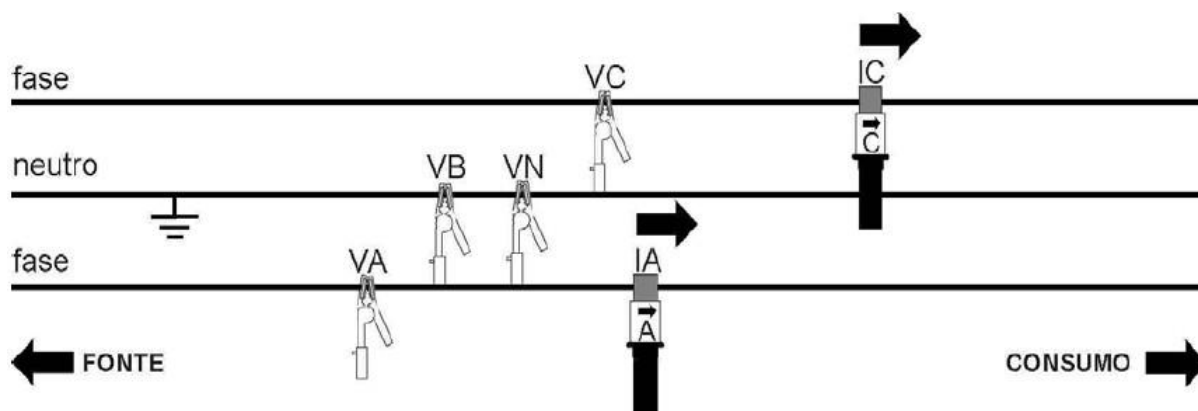


Figura 11 – Conexão dos alicates de tensão e corrente do MARH-21.
Fonte: Manual do Usuário MARH-21

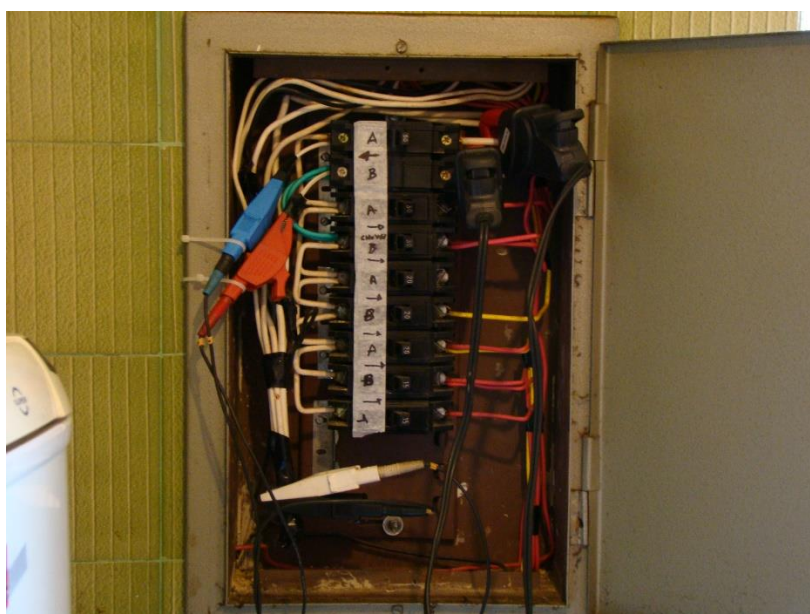


Figura 12 – Conexão MARH-21 na Residência.
Fonte: Autor

Os dados coletados foram extraídos do analisador utilizando o cabo RS-232/USB e posteriormente convertidos para um formato de arquivo de texto de fácil manipulação. Desta forma, foi possível selecionar os dados a serem utilizados neste estudo.

3.2 DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

No item 2.1.4.2 deste trabalho foi demonstrado que a energia gerada por um painel fotovoltaico é proporcional a irradiação solar que este recebe. Para ter valores de irradiação que fossem compatíveis com a residência analisada, foi utilizado o software Radasol 2.

Este software fornece valores médios de irradiação solar em um local a partir de um dado de entrada, seja o nome de uma cidade ou de coordenadas geográficas. Os valores

médios fornecidos para a cidade de Curitiba no mês de setembro são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de Irradiação Solar média horária em Curitiba no mês de setembro

| Horas | Irradiação (W/m ²) |
|-------|--------------------------------|
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |
| 6 | 40 |
| 7 | 151 |
| 8 | 290 |
| 9 | 399 |
| 10 | 453 |
| 11 | 577 |
| 12 | 533 |
| 13 | 525 |
| 14 | 420 |
| 15 | 274 |
| 16 | 162 |
| 17 | 43 |
| 18 | 0 |
| 19 | 0 |
| 20 | 0 |
| 21 | 0 |

Fonte: software Radiasol 2

3.3 DADOS DE ENERGIA GERADA COM PAINEL FOTOVOLTAICO

Com os valores de irradiação solar média, é possível calcular os valores de energia gerada utilizando um dado painel fotovoltaico. Para este cálculo, foi utilizado como um painel fotovoltaico de potência instalada de 1 kWp. Sabendo que este painel tem uma área estimada de 7 m² e considerando um rendimento das células fotovoltaicas de 20%, pode-se estimar o valor de energia gerada para cada hora utilizando a equação (6).

$$E = \frac{A \cdot n \cdot I}{1000} \text{ [kWh]} \quad (6)$$

Nesta equação, A é a área do painel, n é o rendimento das células fotovoltaicas e I a irradiação solar para cada hora. Para os valores de irradiação solar, foram considerados os valores médios para o mês de setembro em Curitiba.

A Tabela 3 mostra os valores considerados para a irradiação solar, bem como os valores de geração de energia para cada hora. Devido aos horários de irradiação solar, só foi considerado o período entre as 6 e às 18 horas.

Tabela 3- Valores de Irradiação Solar e Geração fotovoltaica por hora

| Hora | Irradiação (W/m²) | Geração Paine Fotovoltaico |
|--------------|---|---------------------------------------|
| 6 às 7 hrs | 40 | 0,056 |
| 7 às 8 hrs | 151 | 0,2114 |
| 8 às 9 hrs | 290 | 0,406 |
| 9 às 10 hrs | 399 | 0,5586 |
| 10 às 11 hrs | 453 | 0,6342 |
| 11 às 12 hrs | 577 | 0,8078 |
| 12 às 13 hrs | 533 | 0,7462 |
| 13 às 14 hrs | 525 | 0,735 |
| 14 às 15 hrs | 420 | 0,588 |
| 15 às 16 hrs | 274 | 0,3836 |
| 16 às 17 hrs | 162 | 0,2268 |
| 17 às 18 hrs | 43 | 0,0602 |

Fonte: Autor

4 DESCRIÇÃO DO MODELO

Neste capítulo são descritos os diversos parâmetros e variáveis utilizadas para elaboração do modelo.

4.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Foram utilizados como parâmetros do modelo os dados referentes ao consumo da residência e os de geração de energia pelo painel fotovoltaico. Estes estão descritos a seguir.

4.1.1 Parâmetros de Consumo de Energia da Residência

Para os dados referentes ao consumo, foram considerados intervalos de hora em hora. Como o intervalo de medição considerado é um dia completo, tem-se 24 parâmetros para representar estes valores.

Assim, existem 24 parâmetros da forma ConsXX, no qual XX são números que vão de 00 até 23, referente ao intervalo de consumo. Os parâmetros de consumo têm como unidade o quilowatt-hora (kWh).

Para melhor entendimento, o parâmetro Cons07, por exemplo, representa a demanda/consumo da residência no período compreendido entre as 07:00 às 08:00 horas do dia analisado. A Tabela 4 apresenta estes parâmetros, bem como o valor de cada um deles.

Tabela 4 – Parâmetros de consumo de energia da residência

| PARÂMETROS DE CONSUMO NA RESIDÊNCIA (Unidade: kWh) | | | | | |
|---|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| cons00 | 0,559 | cons01 | 0,199 | cons02 | 0,103 |
| cons03 | 0,093 | cons04 | 0,101 | cons05 | 0,089 |
| cons06 | 0,092 | cons07 | 0,848 | cons08 | 1,272 |
| cons09 | 0,069 | cons10 | 0,069 | cons11 | 0,073 |
| cons12 | 0,123 | cons13 | 0,129 | cons14 | 0,078 |
| cons15 | 0,078 | cons16 | 0,174 | cons17 | 0,201 |
| cons18 | 0,179 | cons19 | 0,736 | cons20 | 0,291 |
| cons21 | 0,207 | cons22 | 0,235 | cons23 | 1,121 |

Fonte: Autor

4.1.2 Parâmetros de Geração de Energia Fotovoltaica

Utilizando os valores calculados no item 3.3 deste trabalho, foram criados parâmetros com o formato FXX, no qual XX são números que vão de 00 até 23, referente

ao intervalo horário de geração de energia. Os parâmetros de geração têm como unidade o quilowatt-hora (kWh). A Tabela 5 apresenta os dados referentes a esta geração implementados no *solver*.

Tabela 5 – Parâmetros de geração de energia do painel fotovoltaico de 1kWp

| PARÂMETROS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA (Unidade: kWh) | | | | | |
|---|-------|------------|-------|------------|-------|
| F06 | 0,056 | F07 | 0,211 | F08 | 0,406 |
| F09 | 0,559 | F10 | 0,634 | F11 | 0,808 |
| F12 | 0,746 | F13 | 0,735 | F14 | 0,588 |
| F15 | 0,384 | F16 | 0,227 | F17 | 0,06 |

Fonte: Autor

4.1.3 Parâmetros de custo da energia

Para que seja possível a análise do problema, é preciso que sejam dados valores a cada energia que pode vir a suprir o consumo de energia da residência. Para estes, foram estabelecidos dois parâmetros: energia vinda da concessionária de energia local e a energia do painel fotovoltaico.

4.1.3.1 Parâmetro de custo da energia do painel fotovoltaico

Para poder precificar o valor da energia que está sendo gerada pelo painel fotovoltaico, foram considerados os seguintes fatores:

- Vida útil do painel fotovoltaico, sendo esta de 20 anos;
- Quantidade de energia que será gerada pelo painel fotovoltaico durante o período de sua vida útil;
- Custo inicial e instalação do painel fotovoltaico;
- Custo estimado de manutenção do sistema de geração durante sua vida útil.

Assim, chega-se a equação (7):

$$T_{PV} = \frac{(\text{Custo Inicial}) + (\text{Custo Manutenção})}{365 \cdot 20 \cdot (\text{Energia Diária Gerada})} \quad (7)$$

Sendo,

Custo Inicial: R\$ 15.000

Custo Manutenção: R\$ 6.000

Energia Diária Gerada: 5,41 kWh

Encontra-se então o valor do kWh para a energia fotovoltaica de R\$ 0,53 por kWh. Para representar este valor, foi criado um parâmetro com o nome de TPV que representa a “tarifa” da energia fotovoltaica.

4.1.3.2 Parâmetro de custo da energia vindo da concessionária

Para o custo da energia vindo da concessionária de energia, foi utilizada a modalidade tarifária branca, abordada no item 2.2.1 deste estudo. Como mencionado anteriormente, esta tarifação conta com três postos tarifários, que dependem do horário de utilização da energia elétrica. Para cada um dos postos tarifários foram criados parâmetros específicos. A questão de diferença do valor cobrado na energia nos postos tarifários é uma proporcionalidade ao posto tarifário fora de ponta. A Tabela 6 mostra o nome dado a cada um dos postos tarifários bem como a relação entre elas.

Tabela 6 – Parâmetros dos postos tarifários e a relação entre eles

| Posto Tarifário | Parâmetro | Valor |
|------------------------|------------------|--------------|
| Fora de Ponta | TFP | - |
| Intermediária | TIN | 3*TFP |
| Ponta | TPO | 5*TFP |

Fonte: Autor

Para estes parâmetros, a grandeza utilizada é reais por quilowatt-hora (R\$ / kWh).

4.2 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO

Para representar o “fluxo” de energia que vai existir neste caso, foram criadas algumas variáveis para representar como está sendo suprida a demanda da residência, bem como o que está acontecendo com a energia gerada, caso esta não seja aproveitada diretamente pela residência. Na Tabela 7 são mostradas as variáveis que foram criadas, bem como uma breve explicação sobre cada uma delas.

Tabela 7 - Variáveis utilizadas no modelo

| Formato da Variável | Tipo | Grandeza | Descrição |
|---------------------|----------|----------|--|
| GerXX | Contínua | kWh | Variáveis utilizadas para mostrar a quantidade de energia que está sendo gerada a cada hora |
| Foto | binária | | Variável para decisão se deve ser utilizado ou não o painel fotovoltaico |
| CCXX | Contínua | kWh | Variáveis utilizadas para mostrar a quantidade de energia que está sendo fornecida pela concessionária de energia |
| DevXX | Contínua | kWh | Variáveis utilizadas para mostrar a quantidade de energia que está sendo devolvida a concessionária, que serão contabilizadas como créditos de energia |
| EmpXX | Contínua | kWh | Variáveis utilizadas para mostrar a utilização dos créditos de energia pelo consumidor |
| CustoXX | Contínua | R\$ | Variáveis utilizadas para contabilizar o custo do consumidor com energia a cada hora do dia |

Fonte: Autor

4.3 FUNÇÃO OBJETIVO DO MODELO

O intuito do modelo implementado é a redução do custo de energia do consumidor. A função objetivo é de minimização do somatório das variáveis CustoXX. A equação (8) mostra como foi implementada a função objetivo no solver.

$$\min(Z) = \sum_i custoXX_i \quad (8)$$

4.4 RESTRIÇÕES DO MODELO

Nesta seção serão descritas as restrições do modelo.

4.4.1 Custo de energia horário

Cada hora tem alguma peculiaridade, porém basicamente consiste em o valor de energia que está vindo da concessionária multiplicado pelo valor da tarifa naquela hora somado com o custo da geração de energia a cada hora, quando aplicável. A restrição (9) apresenta o cálculo dos custos horários.

$$Custo(XX_i) = CC(XX_i) + Ger(XX_i), \{i \in z | 00 \leq i \leq 23\} \quad (9)$$

4.4.2 Decisão para instalar ou não a geração fotovoltaica

Como o custo da energia gerada pelo painel fotovoltaico é menor do que o custo da energia vindo da concessionária, seria fácil imaginar que sempre seria vantajoso a utilização desta geração. Porém, deve-se levar em consideração que, se existe uma “sobra” de energia gerada, esta energia é emprestada gratuitamente a distribuidora de energia, conforme abordado no item 2.2.2 deste estudo. Em outras palavras, esta energia de sobra não se transforma em retorno financeiro direto ao produtor de energia, podendo somente abater a diferença na conta de energia. Portanto, o modelo deve verificar se é vantajoso a instalação do painel fotovoltaico analisando esta questão.

Isso foi conseguido através de uma variável binária de decisão que se for igual a 0 (zero) a instalação não deve acontecer e caso seja 1 (um) a instalação do painel deve acontecer. Para tal, foi implementado no solver a restrição (10).

$$Ger(XX_i) = F(XX_i) \cdot Foto, \{i \in z \mid 06 \leq i \leq 17\} \quad (10)$$

4.4.3 Quantidade de energia devolvida à concessionária em forma de empréstimo gratuito

A restrição (11) $Dev(XX_i) \leq Ger(XX_i) - (Cons(XX_i) - CC(XX_i)), \{i \in z \mid 00 \leq i \leq 23\}$

(11) segue a lógica de que a quantidade de energia que será emprestada a concessionária é a diferença (se existir) entre a energia gerada e a diferença entre o consumo e o que foi fornecido pela concessionária. De forma matemática, pode-se dizer que:

$$Dev(XX_i) \leq Ger(XX_i) - (Cons(XX_i) - CC(XX_i)), \{i \in z \mid 00 \leq i \leq 23\} \quad (11)$$

4.4.4 Balanço energético

Para garantir uma consistência nos dados obtidos no modelo e que o consumo da residência seja atendido, é importante que haja uma restrição de balanço energético. Em outras palavras, todo tipo de energia que pode vir a suprir a demanda da residência tem que ser maior ou igual à demanda da mesma, conforme a restrição (12).

$$CC(XX_i) + Ger(XX_i) + Emp(XX_i) \geq Cons(XX_i), \{i \in z \mid 00 \leq i \leq 23\} \quad (12)$$

Dependendo de cada hora, sempre existirá pelo menos uma maneira na qual a demanda pode ser suprida.

4.4.5 Balanço entre empréstimos e créditos de energia

Para estar apto a utilizar os créditos, o consumidor deve primeiramente emprestar energia a concessionária para após utilizar os créditos referentes a este empréstimo. Diante disto, o somatório da energia devolvida tem que ser igual ao somatório dos créditos utilizados, conforme restrição (13).

$$\sum_i En. Devolvida_i = \sum_i Créditos Utilizados_i \quad (13)$$

5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO

O modelo em questão foi implementado no solver GLPK/GUSEK para que fosse possível obter uma resposta as questões levantadas. Para tal, foram declaradas as variáveis e implementadas as restrições descritas neste trabalho.

Como resposta da implementação, foi retornado ao usuário os dados referentes aos valores de custo de energia, tanto no caso de não ser utilizado o painel fotovoltaico como no caso da utilização do mesmo. Além disto, são retornados os valores de todas as variáveis referentes a geração e fornecimento de energia.

Após implementação do modelo, foram obtidos os seguintes dados, listados na Tabela 8:

Tabela 8 – Valores da distribuição ótima de consumo/geração

| | Demanda | CC | GFV | Devolvida | Créditos |
|--------|---------|-------|-------|-----------|----------|
| 0 hrs | 0,559 | 0,559 | 0 | 0 | 0 |
| 1 hrs | 0,199 | 0,199 | 0 | 0 | 0 |
| 2 hrs | 0,103 | 0,103 | 0 | 0 | 0 |
| 3 hrs | 0,093 | 0,093 | 0 | 0 | 0 |
| 4 hrs | 0,101 | 0,101 | 0 | 0 | 0 |
| 5 hrs | 0,089 | 0,089 | 0 | 0 | 0 |
| 6 hrs | 0,092 | 0,036 | 0,056 | 0 | 0 |
| 7 hrs | 0,848 | 0,637 | 0,211 | 0 | 0 |
| 8 hrs | 1,272 | 0,866 | 0,406 | 0 | 0 |
| 9 hrs | 0,069 | 0 | 0,559 | 0,49 | 0 |
| 10 hrs | 0,069 | 0 | 0,634 | 0,565 | 0 |
| 11 hrs | 0,073 | 0 | 0,808 | 0,735 | 0 |
| 12 hrs | 0,123 | 0 | 0,746 | 0,623 | 0 |
| 13 hrs | 0,129 | 0 | 0,735 | 0,606 | 0 |
| 14 hrs | 0,078 | 0 | 0,588 | 0,51 | 0 |
| 15 hrs | 0,078 | 0 | 0,384 | 0,306 | 0 |
| 16 hrs | 0,174 | 0 | 0,227 | 0,053 | 0 |
| 17 hrs | 0,201 | 0,141 | 0,06 | 0 | 0 |
| 18 hrs | 0,179 | 0 | 0 | 0 | 0,179 |
| 19 hrs | 0,736 | 0,137 | 0 | 0 | 0,599 |
| 20 hrs | 0,291 | 0,291 | 0 | 0 | 0 |
| 21 hrs | 0,207 | 0,207 | 0 | 0 | 0 |
| 22 hrs | 0,235 | 0,235 | 0 | 0 | 0 |
| 23 hrs | 1,121 | 1,121 | 0 | 0 | 0 |

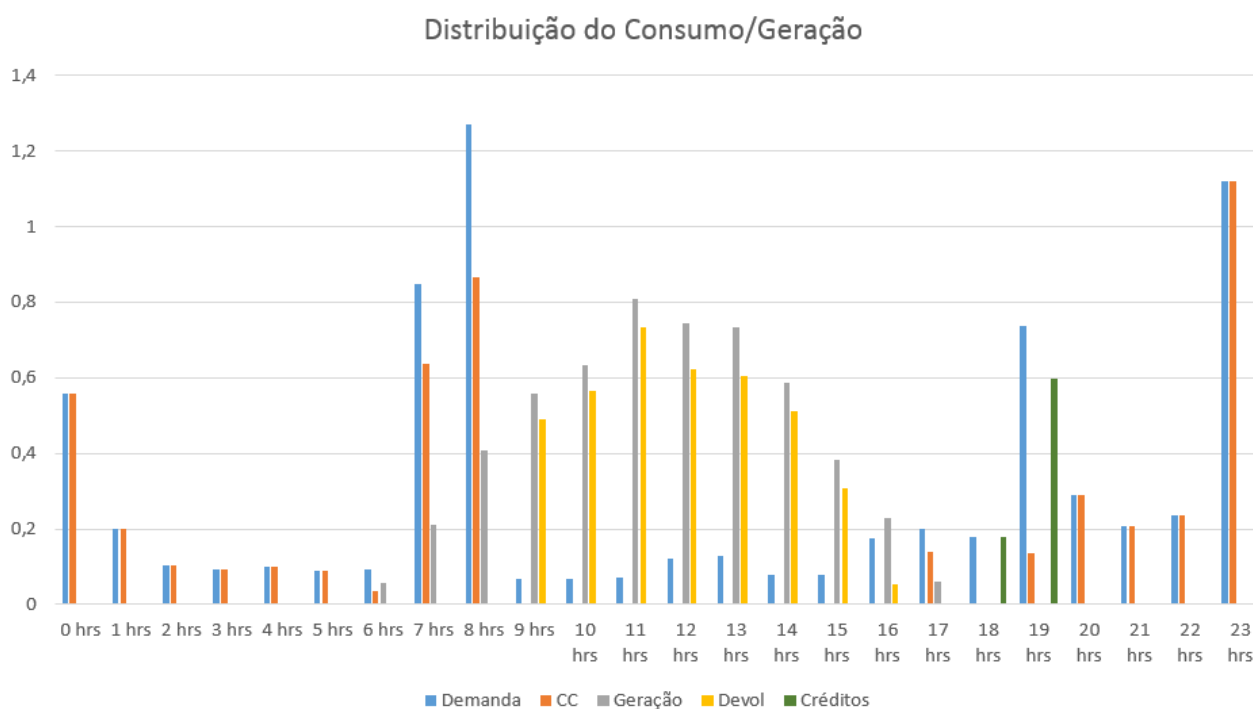
Fonte: Autor

Como pode ser observado, optou-se pela utilização da geração fotovoltaica, pois os valores de geração são diferentes de zero. Desta forma, é possível chegar à conclusão de

que é vantajoso a instalação de um painel fotovoltaico de 1 kWp de potência instalada, em caso de opção pela modalidade tarifária branca.

Um estudo sobre quando o investimento inicial da instalação da geração distribuída iria se pagar é desnecessário neste caso, pois o custo de instalação e manutenção da mesma durante sua vida útil foi considerado para compor o valor da energia gerada.

Com estes dados, é possível fazer um gráfico para representar a distribuição de consumo/geração na residência estudada.



*Figura 13 – Gráfico representativo da distribuição consumo/geração na residência.
Fonte: Autor*

Analisando os valores obtidos, pode-se ainda verificar uma redução no gasto com consumo de energia elétrica em R\$ 0,70 por dia, o que resultaria em uma redução de aproximadamente 9% no valor da conta de energia da residência.

Após a análise inicial dos valores retornados, foi sendo reduzido de forma iterativa o valor da tarifa de energia da concessionária com o intuito de encontrar o valor mínimo da tarifa fora de ponta para o qual é vantajoso para o consumidor a instalação do painel fotovoltaico. O valor encontrado foi de R\$ 0,52 por kWh de energia consumida fora de ponta.

5.1 LIMITAÇÕES DO MODELO PROPOSTO

Após a implementação do modelo e a análise do mesmo, foram constatadas algumas limitações que existem no modelo. Estas estão listadas a seguir:

- Para um diferente perfil de carga poderá haver uma resposta diferente para a mesma análise, pois dependendo de onde concentra-se a maior parte do consumo da residência, pode ser que não seja vantajosa a instalação;
- O horizonte de tempo analisado (24 horas) é muito curto. Caso este fosse ampliado, a resposta seria muito mais precisa quanto a decisão pela instalação da microgeração;
- Não existe a possibilidade de escolha da potência instalada do sistema de geração;
- O valor mínimo que é vantajoso a instalação da microgeração só pode ser obtido de modo iterativo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para este estudo, foi elaborado e implementado um modelo matemático que pudesse responder uma questão quanto a viabilidade da instalação de uma geração fotovoltaica em uma residência.

Levando em consideração os dados encontrados como resposta do modelo, pode-se dizer que a instalação é sim vantajosa em uma residência com o perfil de carga utilizado como base de dados. Além dos custos de implementação e manutenção da geração fotovoltaica serem pagos ao longo dos anos, esta representará uma economia de R\$ 21 por mês. Além disto, foi encontrado um valor mínimo a ser cobrado pela energia entregue pela concessionária ao consumidor, o que pode ser mais uma ferramenta que pode auxiliar na tomada de decisão.

Porém, este estudo tem certas limitações, como as levantadas neste estudo, que poderiam ser solucionadas e implementadas em trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 482/12**. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 07/09/2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 362/2010**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/120/documento/nota_tecnica_n%C2%BA_362_2010_sre-srd-aneel.pdf>. Acesso em 13/10/2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa Branca**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=781>>. Acesso em 10/10/2015.

Engenharia Compartilhada. **Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.engenhariacompartilhada.com.br/secoes.aspx?capitulo=30557>> Acesso em: setembro de 2015.

Blue-Sol Educacional. **Energia Solar**. 23/12/2011. <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>. Acesso em 23/10/2015.

Blue-Sol Educacional. **Energia Solar**. 27/01/2012. <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em 23/10/2015.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7ª Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES, A. E. B.; JÚNIOR, S. C.; CRUZ, E. C. A. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores**. 13 ed. São Paulo: Érica, 2012.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia)- Universidade Federal de Lavras, 2004.

Portal Energia. **Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares**. 28/11/2011. <http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituientes-de-paineis-solares/>. Acesso em 23/10/2015.

Portal Solar. **Tipos de Painéis Fotovoltaicos**. <http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em 23/10/2015.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8 ed. São Paulo: Pearson, 2008.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2013.