

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÁRCIO AZEVEDO DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO E RETORNO DE INVESTIMENTO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
LAGOA SANTA - MG

CURITIBA

2016

MÁRCIO AZEVEDO DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO E RETORNO DE INVESTIMENTO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
LAGOA SANTA - MG

Trabalho de Conclusão do Curso de
Especialização em Mudanças Climáticas,
Projetos Sustentáveis e Mercado de
Carbono do Programa de Educação
Continuada em Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Paraná.

Orientação: DsC. Dimas Agostinho da Silva
DsC. Cymara Regina Oshiro

CURITIBA

2016

RESUMO

No atual modelo de organização da sociedade humana a eletricidade desempenha um papel imprescindível para a vida e para o desenvolvimento socioeconômico mundial. No Brasil, a principal fonte de energia é a hidrelétrica, mas a energia solar também vem experimentando uma fase de crescimento nos últimos anos devido às condições favoráveis de radiação solar ao longo do ano. Além disso, a Resolução Normativa Nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabeleceu as condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, possibilitando-se obter uma central geradora de energia com a utilização de fontes renováveis conectadas à rede de distribuição por meio de instalações em unidades consumidoras, e ainda a compensação da energia excedente com o consumo de energia elétrica ativa. O presente estudo objetivou comparar o investimento entre a implantação de uma central geradora individualizada para uma unidade consumidora residencial que totalizou R\$ 22.922,00, sendo que as emissões evitadas foram estimadas em 2,0639 tCO₂, e um empreendimento com 04 (quatro) unidades consumidoras que foi calculado em R\$ 79.788,00 e as emissões evitadas foram estimadas em 8,2564 tCO₂. Verificou-se que as duas configurações de sistemas fotovoltaicos apresentam viabilidade econômica, sendo que a Taxa Interna de Retorno (TIR) para implantação do sistema dimensionado para uma unidade habitacional individualizada foi de 23% e para o condomínio residencial foi de 25%.

Palavras-Chave: Energias Renováveis. Energia Solar. Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

At present, the electricity plays an essential role in life and for the socioeconomic development of the world considering the way human society is organized. In Brazil, the main source of energy is the hydroelectric energy (EPE, 2016). However, solar energy has also been experiencing an upward development phase due to favorable solar radiation conditions throughout the year. In addition, Normative Resolution No. 482 of the National Agency of Electric Energy - ANEEL established the conditions for the access of microgeneration and distributed minigeration to the electric energy distribution systems and the electric energy compensation system, making it possible to generate electricity using renewable sources connected to the distribution network through installations in consumer units, as well as the compensation of surplus energy through a credit system. The present study aimed to compare the investment for implantation of a power station to supply an individual residential consumer unit that totaled R\$ 22.922,00, that also have avoided emissions estimated in 2,0639 tCO₂, and other one power station to supply a complex condominium with 4 (four) consumer units that was calculated as R\$ 79.788,00, that have avoided emissions estimated in 8,2564 tCO₂. It was shown that both photovoltaic systems presented economic viability, and the Internal Rate of Return (IRR) of the system for an individual residential unit was of 23% and for a condominium was of 25%.

Keywords: Renewable Energy. Solar Energy. Photovoltaic System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Energia Solar Fotovoltaica	7
2.2. Disponibilidade de irradiação solar no Brasil	8
2.3. Tecnologias Disponíveis	10
2.4. Sistemas Fotovoltaicos	10
2.5. Geração Distribuída	12
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo Geral	15
3.2. Objetivos Específicos	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1. Local de estudo	16
4.2. Irradiação solar	16
4.3. Dimensionamento do sistema fotovoltaico interligado à rede	17
4.4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico	18
4.5. Seleção do módulo e estimativa do número necessário de módulos	19
4.6. Cálculo da potência corrigida do sistema	19
4.7. Verificação da tensão dos módulos para diferentes condições de funcionamento	20
4.8. Cálculo da tensão para as temperaturas extremas do módulo (-10°C e 70°C)	20
4.9. Seleção do Inversor	21
4.10. Configuração do painel compatível como inversor	22
4.11. Viabilidade econômica do sistema	23
4.12. Metodologia de estimativa de redução de emissões	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1. Dados de Irradiação Solar	26
5.2. Dimensionamento do sistema fotovoltaico interligado à rede	27
5.3. Energia Gerada X Energia Consumida	28
5.4. Investimento	29

5.5	Estimativa das reduções das emissões de gases de efeito estufa	32
5.6	Viabilidade do sistema	33
5.7	Comparativo entre as configurações do sistema	35
6.	CONCLUSÕES	37
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global, resultante principalmente da redução das florestas e da queima de combustíveis fósseis, tem sido tema recorrente na mídia e em trabalhos técnicos, em função das consequências possíveis que o aumento da temperatura média da Terra possa causar à biodiversidade e à sobrevivência das espécies do planeta, incluindo o ser humano.

Embora a ciência alerte para a necessidade da redução do uso de combustíveis fósseis, a produção e o consumo mundial ainda são crescentes à taxas de 0,64% e 1,16%, respectivamente (ANP, 2014). Porém, a energia elétrica é fundamental para a sociedade atual. No atual modelo de organização social humana ela desempenha um papel imprescindível no desenvolvimento das forças produtivas, sendo indispensável para a vida e para o desenvolvimento socioeconômico de um país.

A energia hidrelétrica é a principal fonte de energia no Brasil, com participação de 64,0%, seguido pelo gás natural 12,9%, biomassa 8,0%, derivados do petróleo 4,8%, carvão e derivados 4,5%, eólica 3,5%, nuclear 2,4%, e solar 0,01% (BEN 2016).

De acordo com o Censo Demográfico de 2010 o serviço de energia elétrica atingiu 97,8% dos domicílios brasileiros, sendo que as áreas urbanas este percentual chega a 99,1% e na área rural atinge 89,7% (IBGE).

Mesmo sendo um serviço com percentual de atendimento alto, o nível desse atendimento varia de acordo com as características de cada região do Brasil. Apesar das disparidades regionais, o número de ligações e o consumo vêm crescendo alavancado por programas sociais e pelo desenvolvimento econômico do país (COELHO, 2014).

O Balanço Energético Nacional – BEN de 2016 apontou que o consumo final de eletricidade no Brasil em 2015 registrou uma queda de 1,8%, sendo que os setores que mais contribuíram para esta redução foram o residencial (-0,7%) e o industrial (-5,0%). Esta queda pode ser explicada pela crise econômica de 2015, o que afetou diretamente os volumes da produção industrial, a renda e hábitos de consumo da população em geral.

O BEN 2016 inicia a publicação com informações referentes à micro e minigeração distribuída de energia elétrica, cujo crescimento tem sido incentivado por recentes ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (*net metering*). Em 2015, a geração distribuída atingiu 34,9 GWh com uma potência instalada de 16,5 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 20,0 GWh e 13,3 MW de geração e potência instalada respectivamente (EPE, 2016).

Mesmo em um período de crise econômica, em 2015, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 140.858 MW, acréscimo de 6.945 MW em relação ao período anterior. Para esta expansão da capacidade instalada, as centrais hidráulicas contribuíram com 35,4%, enquanto as centrais térmicas responderam por 25,0% da capacidade adicionada e as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelos 39,6% restantes de aumento do grid nacional (EPE, 2016).

Apesar do cenário de queda no consumo final de eletricidade no Brasil em 2015 (EPE, 2016), no horizonte até 2021 as projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 indicam que haverá um incremento de 52% no consumo per capita no Brasil, sendo que haveria um acréscimo de 4,9% ao ano no consumo total de energia elétrica (EPE, 2012).

Para suprir essa demanda no fornecimento energético e evitar possíveis crises energéticas, com prejuízos para o desenvolvimento do país, será necessária a construção de novos empreendimentos e operação eficiente dos que já se encontram em funcionamento. Esse aumento, entretanto, de alguma forma produz impactos no meio ambiente, sendo que, o equacionamento dessas questões passa necessariamente pela implementação de políticas e programas de estímulo a geração da energia mais limpa, de forma mais eficiente e com qualidade ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, sendo uma das tecnologias renováveis que vem sendo cada vez mais utilizada nos países desenvolvidos (RUTHER, 2004). A unidade fundamental desse processo de conversão é a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor.

Apresenta como principais vantagens: 1) é obtida de forma estática e silenciosa, ou seja, não gera impactos ambientais na sua operação; 2) é essencialmente renovável; 3) em termos logísticos, a alternativa é excepcional, uma vez que este tipo de energia é facilmente adaptado à microgeração distribuída, ou seja, junto ao local de consumo, minimizando os custos com transmissão e distribuição da energia; 4) característica modular (desde mW até MW) e 5) curtos prazos de instalação, elevado grau de confiabilidade dos sistemas e baixa manutenção (TORRES, 2012).

O valor da irradiância que chega à Terra é de aproximadamente 1.000 W/m² ao meio-dia e denomina-se de Irradiação Global Anual a soma da quantidade total de radiação que incide na superfície terrestre durante o período de um ano (medida em kWh/m²), sendo que este parâmetro varia significativamente de acordo com as regiões do planeta. Dentre as diversas aplicações da energia solar, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico se apresenta como uma das mais nobres formas de gerar potência elétrica (RUTHER, 2004).

A fim de promover a produção de energias renováveis no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL aprovou a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012 estabelecendo as condições para o acesso à microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

Dessa forma, a nova política energética possibilitou a geração de energia por fontes renováveis com interligação à rede de distribuição e ainda a compensação da energia excedente com o consumo de energia elétrica ativa.

A microgeração distribuída corresponde à central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. A minigeração distribuída difere apenas na potência instalada, que deve ser superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para as mesmas fontes (ANEEL, 2012).

2.2. Disponibilidade de irradiação solar no Brasil

O Brasil tem a vantagem de estar localizado em zona intertropical, registrando altos índices de irradiação solar durante todo o ano, quando comparado com outros países que já fazem uso desta tecnologia (TORRES, 2012). A potência instantânea incidente na superfície terrestre pode atingir valores superiores a 1000 W/m^2 e a média anual de energia incidente na maior parte do Brasil varia entre $4 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ e $5 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ (CRESESB, s.d.).

O Sol transfere a nosso planeta a radiação eletromagnética, conhecida como radiação solar. Entretanto, apenas uma parcela mínima dessa radiação atinge a superfície terrestre, o que corresponde a aproximadamente 1×10^{18} kWh/ano, valor este que é calculado para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

O Atlas Brasileiro de Energia Solar é a referência em dados para a avaliação da disponibilidade de irradiação solar, existindo também outras instituições dedicadas ao fornecimento de informações e dados relacionados a irradiação solar como o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESESB por meio do Sun Data.

O CRESESB é um centro de referência que tem como objetivo promover o desenvolvimento das energias solar e eólica através da difusão de conhecimentos, da ampliação do diálogo entre as entidades envolvidas e do estímulo à implementação de estudos e projetos. E como ferramenta de fornecimento de dados de irradiação solar, o Sun Data é um programa que busca no banco de dados CENSOLAR valores de radiação média diária mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes. Para

saber a radiação solar global diária média mensal de uma localidade basta entrar com as coordenadas geográficas em graus decimais. Os dados são apresentados no seguinte formato:

Município:

Estado:

Latitude: **XX,XX**° N|S

Longitude: **XX,XX**° O

Distância do ponto de ref. (**XX,XX**° N|S; **XX,XX**° O): **XX,X** Km

		Irradiação diária média [kwh/m2.dia]													
Ângulo	Inclinação [°]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Ângulo igual a latitude	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior média anual	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior mínimo mensal	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx

TABELA 1 – MODELO DE APRESENTAÇÃO DOS DADOS IRRADIAÇÃO SOLAR
 FONTE: HOME PAGE CRESESB

No título da tabela é mostrado o nome da localidade, o Estado da Federação (ou o país a que pertence, se não for o Brasil), suas coordenadas geográficas, e a distância (km) em linha reta do ponto de interesse pesquisado. Os dados da tabela mostram a irradiação solar diária média mensal (kWh/m2.dia) para todos os meses do ano, a partir de janeiro. Adicionalmente, são mostrados o valor da menor irradiação diária média mensal (Mínimo), da maior irradiação diária média mensal (Máximo), da irradiação diária média anual (Média) e da diferença entre a máxima e a mínima (Delta).

O maior aproveitamento da energia solar é obtido pela inclinação de um módulo em ângulo igual à latitude local e orientado ao norte em virtude da inclinação do eixo terrestre em relação à órbita solar. Nesse sentido, o potencial de geração dos módulos fotovoltaicos é diretamente influenciado pela inclinação do mesmo, podendo acarretar em perdas. Por este motivo, é de suma importância que o projeto considere a posição mais favorável para o módulo em termos arquitetônicos e também de potencial de geração.

2.3. Tecnologias Disponíveis

As células fotovoltaicas são as unidades básicas do sistema de conversão da radiação solar em eletricidade, que são agrupadas e encapsuladas formando os módulos fotovoltaicos. Os módulos disponíveis no mercado apresentam variações quanto ao potencial de geração, área, fator de forma de apresentação, entre outras especificidades, de acordo com o tipo de tecnologia desenvolvida e aplicada pelos diferentes fabricantes a cada tipo de célula fotovoltaica. Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem de maturidade e utilização os seguintes compostos (RUTHER, 2004).

- a) Silício Cristalino (c-Si);
- b) Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si);
- c) Telureto de Cádmio (CdTe)
- d) Compostos de Disseleneto de Cobre (gálio) e Índio (CIS e CIGS)

Ruther (2004) também afirma que a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e que ainda hoje apresenta maior escala de produção é a de silício cristalino, tecnologia esta que se consolidou no mercado por sua extrema robustez e confiabilidade. A tecnologia de produção de eletricidade utilizando-se o efeito fotovoltaico pode separar o mercado em dois principais setores: o do silício cristalino e o do silício amorfo (PINHO, J. T. et al., p. 58). As células solares de silício cristalino podem se apresentar em dois tipos, as de Silício Monocristalino ou as de Silício Policristalino.

2.4. Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três tipos (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015):

- Sistemas isolados ou autônomos com e sem armazenamento;
 - Sistemas híbridos em conjugação com mais uma fonte de energia além da fotovoltaica;
 - Sistemas de ligação (interligados) à rede.

Os sistemas isolados se destinam, normalmente, a locais afastados tais como áreas rurais ou unidades habitacionais não atendidas pela rede pública de energia elétrica, e as principais aplicações geralmente são iluminação, refrigeração e pequenas cargas, podendo ainda ser utilizada em sistemas de telecomunicações ou bombeamento de água. Os sistemas isolados são formados por painéis fotovoltaicos, controlador de carga, uma ou mais baterias e um inversor.

Os sistemas híbridos são constituídos pela associação de sistemas fotovoltaicos a outras fontes de energia auxiliares que possam suprir a carga das baterias na ausência da radiação solar. Estas fontes de energia auxiliares podem ser a diesel, a gás ou até mesmo geradores eólicos. Os sistemas híbridos necessitam de sistemas de controle mais eficientes do que os sistemas isolados (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

Já os sistemas interligados à rede, como o próprio nome indica, são sistemas cujos módulos fotovoltaicos são conectados ao sistema elétrico convencional. Neste tipo de sistema a energia gerada e não consumida é enviada diretamente para o sistema de distribuição de energia elétrica e pode ser compensada com o consumo de energia elétrica ativa da edificação ou de outra unidade cadastrada (ANEEL, 2012).

Em um sistema interligado à rede elétrica convencional é necessário efetuar o controle da quantidade de energia gerada que, efetivamente, é enviada à rede de distribuição. Thomas & Grainer (1999) apresentam três modos de medição que podem ser utilizados:

1. Um medidor unidirecional: onde há só um medidor e um sentido único para a energia, assim só há medição da entrada de energia para a edificação quando o sistema fotovoltaico não é suficiente para o abastecimento total.
2. Dois medidores independentes: um para entrada da energia da rede elétrica convencional na edificação, e outro para saída da geração fotovoltaica para a rede.
3. Um medidor bidirecional: utilizado nos países onde o preço de compra e de geração é o mesmo, assim o mesmo medidor controla a saída da geração excedente e a entrada de energia nos momentos sem geração fotovoltaica.

Conforme apresentado na Figura 1, os principais equipamentos que compõem um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – SFCR são (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015):

1. Módulos Fotovoltaicos: são responsáveis pela geração de energia elétrica através da conversão da energia solar em eletricidade.

2. Inversor para conexão à rede: é o dispositivo para conexão direta à rede elétrica da concessionária que faz a conversão de um sinal elétrico CC (corrente contínua) em um sinal elétrico CA (corrente alternada) e opera com tensões de entrada elevadas e tensões de saída compatíveis com a rede local.

Além disso, compõem também um sistema fotovoltaico conectado à rede: quadro de distribuição de cargas (QDC), dispositivo de proteção contra surto (DPS) e medidor bidirecional.

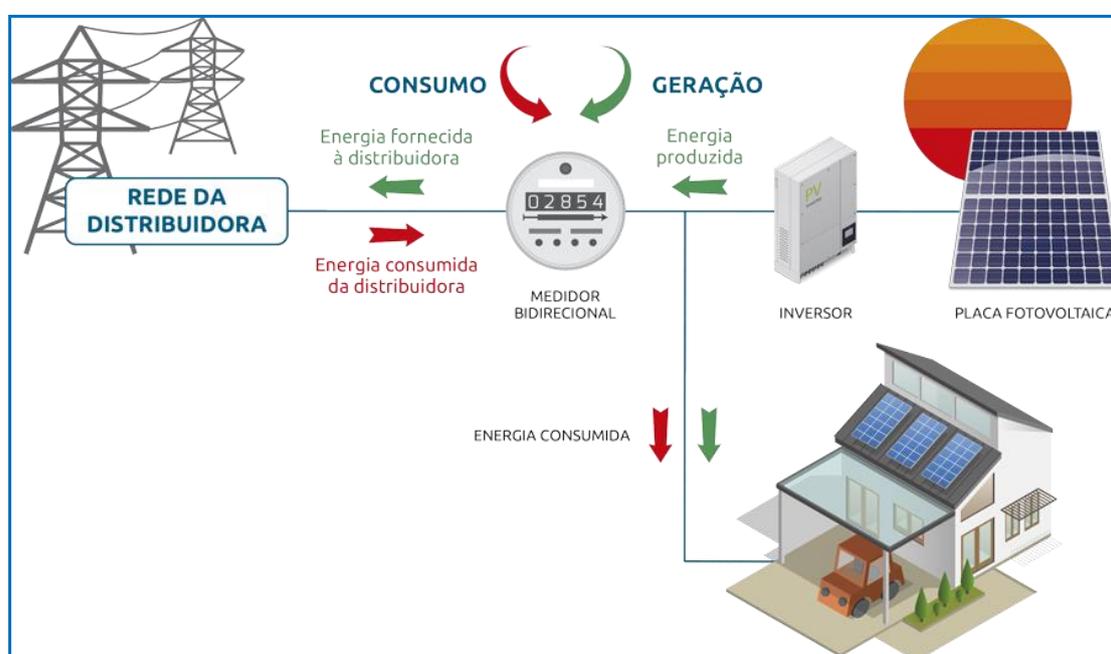


FIGURA 1 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

2.5. Geração Distribuída

Uma das maiores vantagens da implantação de um sistema de geração de energia elétrica por meio de tecnologia fotovoltaica é a possibilidade de instalação junto à própria edificação e ao ponto de consumo, dispensando desta forma a necessidade de extensas linhas de transmissão, como no caso da energia hidráulica em que as usinas hidrelétricas geralmente se localizam longe das unidades consumidoras. Com isso há uma redução nas perdas por

transmissão e nos custos de expansão das concessionárias, na medida em que a implantação de unidades de microgeração avançam.

A Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabeleceu as condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Possibilitou que uma central geradora de energia, com a utilização de fontes renováveis, seja conectada à rede de distribuição e ainda a compensação da energia excedente com o consumo de energia elétrica ativa.

Esta resolução define o Sistema de Compensação, também conhecido pelo termo em inglês *net metering*, onde o consumidor de energia elétrica seja produtor e consumidor em sua unidade (ex.: utilização de painéis solares fotovoltaicos ou pequenas turbinas eólicas). Quando a geração for maior que o consumo, o saldo positivo de energia poderá ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário, desde que pertença ao mesmo CPF do produtor ou CNPJ associado, ou em faturas subsequentes, com validade de 60 meses.

Ainda assim, a concessionária irá cobrar, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B (baixa tensão), ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A (alta tensão). E este custo, em moeda corrente, da disponibilidade do sistema elétrico, que incide sobre a fatura mensal de um consumidor do grupo B corresponde a:

- a) 30 kWh: monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores;
- b) 50 kWh: bifásico a 3 (três) condutores; ou
- c) 100 kWh: trifásico.

A Resolução Normativa Nº 482 limita a microgeração para a potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Já a minigeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia

elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Comparar a análise de investimento para implantação de microgeração de energia fotovoltaica entre a central geradora individualizada para uma unidade consumidora residencial e um empreendimento com 04 (quatro) unidades consumidoras (condomínio residencial).

3.2. Objetivos Específicos

a) Estimar e comparar o custo de implantação e o retorno dos investimentos propostos;

b) Estimar as reduções de emissões de gases de efeito estufa proporcionadas por cada um dos sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica analisados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Local de estudo

O presente estudo foi realizado no município de Lagoa Santa, no estado de Minas Gerais, em um condomínio residencial de alto padrão, que está localizado na cidade de Lagoa Santa, em Minas Gerais, no bairro Recanto da Lagoa, cujas coordenadas geográficas são:

- Latitude: 19° 37' 38" S
- Longitude: 43° 53' 23" W
- Altitude: 760m



FIGURA 2 – VISTA DO LOCAL DE ESTUDO
FONTE: ADAPTADO GOOGLE MAPS

4.2. Irradiação solar

Utilizou-se a base de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESEB que é disponibilizada para consulta através do sistema de base de dados Sun Data para obter os valores de irradiação solar, que serão usados nos cálculos de eficiência e energia gerada pelo sistema. O

programa Sun Data destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma tentativa do CRESESB de oferecer uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (CRESESB, s.d.).

Para este estudo foram utilizados os valores de irradiação solar diária média do banco de dados do CRESESB da região de Lagoa Santa – MG.

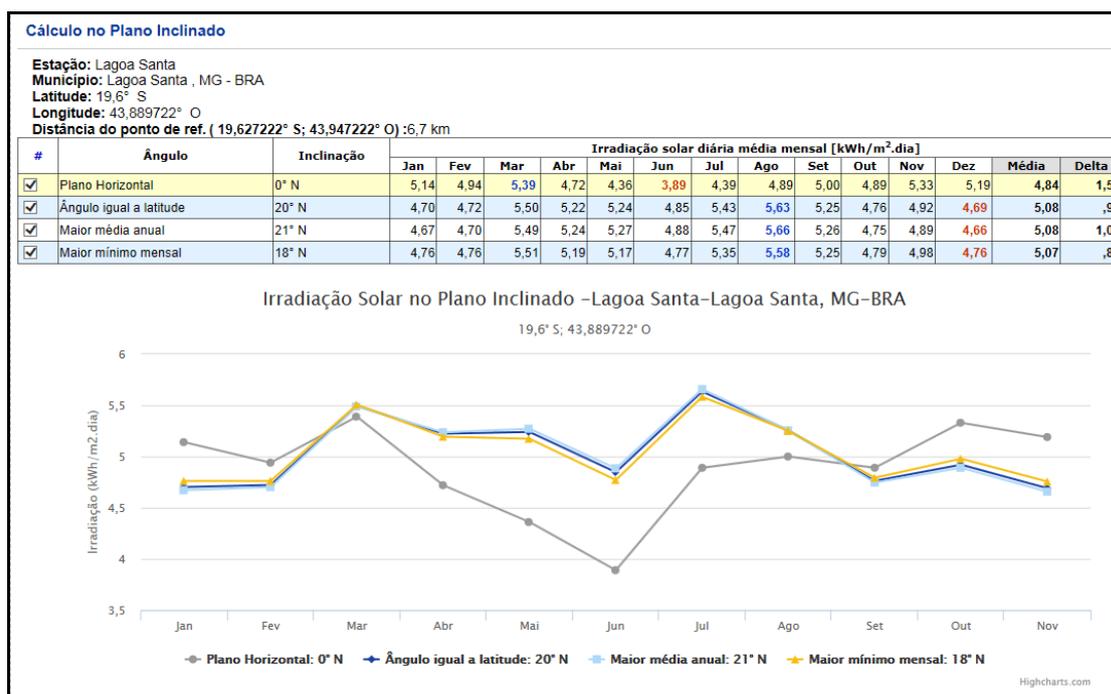


FIGURA 3 – DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR
FONTE: HOME PAGE CRESESB

4.3. Dimensionamento do sistema fotovoltaico interligado à rede

O projeto e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos interligados à rede dependem essencialmente das condições apresentadas a seguir:

- Área disponível;
- Orientação e ângulo de inclinação do local;
- Sombreamento;
- Tipo de instalação;
- Especificações técnicas dos módulos e do inversor;
- Localização geográfica, longitude e latitude;
- Incidência solar;

- Histórico de consumo e consumo médio.

O projeto do sistema fotovoltaico eleito considerou as seguintes etapas, conforme sugerido por Pinho e Galdino (2014):

- Estimativa inicial da potência instalada;
- Seleção do módulo solar;
- Seleção do inversor compatível ou de uma configuração de inversores compatível com o módulo;
- Estabelecimento da configuração ótima módulo-inversor;
- Levantamento da listagem dos componentes;
- Estimativa da energia produzida baseada nos dados da radiação solar do local.

Para o dimensionamento do gerador fotovoltaico eleito foi considerada a melhor tecnologia aplicável ao projeto, tendo em vista o custo da energia gerada pelo sistema e os benefícios em termos de características elétricas e arquitetônicas de cada tecnologia disponível.

A escolha do fabricante dos módulos fotovoltaicos levou em consideração a credibilidade da empresa no que diz respeito à garantia dos módulos (20 a 25 anos), e às características do produto em termos dos parâmetros elétricos e eficiência e pós-venda (PINHO; GALDINO, 2014). Dentre os diversos fabricantes, foram pesquisados módulos fotovoltaicos da Trina Solar, Canadian Solar, Yingli Green e SunPower Corp e para aplicação neste trabalho optou-se por trabalhar com módulos da Canadian Solar em virtude da qualidade do produto, garantia, capacidade de fornecimento e tradição da empresa no mercado.

4.4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico

A potência de um gerador fotovoltaico conectado à rede pode ser calculada pela Equação 1, onde se pode escolher uma fração da demanda de energia elétrica consumida que se pretende suprir (PINHO; GALDINO, 2014).

$$P_{FV}(Wp) = \frac{(E / TD)}{HSP_{MA}} \quad (1)$$

Onde:

P_{FV} (Wp) – Potência de pico do painel fotovoltaico;

E (Wh/dia) – Consumo diário médio anual da edificação ou fração deste (já descontado o valor da disponibilidade mínima de energia);

HSP_{MA} (h) – Média diária anual das horas de sol pleno (HSP) no plano do painel fotovoltaico;

TD (adimensional) – Taxa de desempenho.

A taxa de desempenho do sistema mensura a geração de energia elétrica de um sistema fotovoltaico, pois considera a potência real do sistema em operação e as perdas envolvidas (por queda de tensão devido à resistência do cabeamento e conectores, efeitos do sombreamento, eficiência e carga sobre o inversor, diferenças entre as potências máximas de módulos de mesmo modelo, temperatura operacional, etc). Para sistemas fotovoltaicos residenciais pode-se obter uma taxa de desempenho entre 70 e 80 % (PINHO; GALDINO, 2014).

4.5. Seleção do módulo e estimativa do número necessário de módulos

Após a seleção do módulo, determina-se uma estimativa inicial do número de módulos necessários seguindo a equação 2.

$$\text{Número de módulos} = \frac{P_{\text{pico do painel}}}{P_{\text{pico do módulo}}} \quad (2)$$

4.6. Cálculo da potência corrigida do sistema

O cálculo da potência corrigida é determinado pela equação 3:

$$\text{Potência corrigida do sistema} = \text{Número de módulos} \times P_{\text{pico do módulo}} \quad (3)$$

4.7. Verificação da tensão dos módulos para diferentes condições de funcionamento

O valor da tensão dos módulos é determinado considerando-se que a tensão atinge valores mais elevados nos períodos em que as temperaturas são mais baixas, sendo que nos meses mais quentes a tensão dos módulos apresenta valores mais baixos. Para determinação das tensões para as temperaturas mínima e máxima são necessários os seguintes parâmetros (FREITAS, 2008):

- Tensão e corrente correspondentes ao ponto de potência máxima do módulo, V_{PPM} e I_{PPM} ;
- Tensão de circuito aberto para baixas temperaturas (-10°C).

Os valores da tensão máxima, V_{PPM} , corrente máxima, I_{PPM} , e tensão em circuito aberto V_{ca} , são informados pelos fabricantes para as condições padrão de teste (STC) no plano do painel. A tensão de circuito aberto, V_{ca} , para a temperatura máxima e mínima é calculada utilizando o coeficiente de variação de temperatura, T_c , fornecido pelo fabricante.

O cálculo da tensão para as temperaturas extremas do módulo é efetuado considerando-se uma variação média anual da temperatura no plano do painel entre -10°C e 70°C . Desta forma, os desvios absolutos para uma temperatura de 25°C , corresponde às condições padrão de teste (STC) são de -35°C e 45°C respectivamente (FREITAS, 2008).

4.8. Cálculo da tensão para as temperaturas extremas do módulo (-10°C e 70°C)

$$V_{ca}(a - 10^{\circ}\text{C}) = V_{ca}(a 25^{\circ}\text{C}) + 35 \times T_c(V_{ca}) \quad (4)$$

$$V_{PPM}(a - 10^{\circ}\text{C}) = V_{PPM}(a 25^{\circ}\text{C}) + 35 \times T_c(V_{ca}) \quad (5)$$

$$V_{PPM}(a 70^{\circ}\text{C}) = V_{PPM}(a 25^{\circ}\text{C}) - 45 \times T_c(V_{ca}) \quad (6)$$

Em que:

V_{ca} (a -10°C) – tensão em circuito aberto a -10°C ;

V_{ca} (a 25°C) – tensão em circuito aberto a 25°C ;

$T_c(V_{ca})$ – valor de variação da tensão em função da temperatura;

V_{PPM} (a -10°C) – tensão máxima a -10°C ;

V_{PPM} (a 70°C) – tensão máxima a 70°C .

O valor mais elevado da tensão em circuito aberto corresponde à temperatura mais baixa (-10°C), da mesma forma que para o valor máximo da tensão.

4.9. Seleção do Inversor

O gerador fotovoltaico é dimensionado com potência nominal superior à do inversor em virtude do coeficiente de temperatura negativo das tecnologias fotovoltaicas. O Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI) corresponde à relação entre a potência nominal c.a. do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014), como mostra a Equação 7.

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV}(Wp)} \quad (7)$$

Onde:

FDI (adimensional) – Fator de dimensionamento do inversor;

P_{Nca} (W) – Potência nominal em corrente alternada do inversor;

P_{FV} (Wp) – Potência pico do painel fotovoltaico.

De acordo com a literatura os valores inferiores de FDI recomendados por fabricantes situam-se entre 0,75 a 0,85, (PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.).

Em seguida, a potência corrigida do sistema fotovoltaico, obtida através da Equação 3, deve ser comparada com a potência nominal do inversor e, caso a Potência corrigida do sistema seja maior que a Potência nominal do inversor, o número de inversores requerido é calculado pela Equação 8. Caso a Potência corrigida do sistema seja menor que a Potência nominal do inversor, o número de inversores é igual a um.

$$\text{Número de inversores} = \frac{\text{Potência corrigida do sistema}}{\text{Potência nominal do inversor}} \quad (8)$$

O número máximo e mínimo de módulos ligados em série deve ser calculado visando definir os limites de tensão da configuração do painel fotovoltaico, seguindo as equações 9 e 10 abaixo.

$$\text{Número máximo de módulos} = \frac{V_{PPM \text{ máx}}}{V_{PPM(-10^{\circ}\text{C})}} \quad (9)$$

$$\text{Número mínimo de módulos} = \frac{V_{PPM \text{ min}}}{V_{PPM(70^{\circ}\text{C})}} \quad (10)$$

Com o objetivo de assegurar que o valor máximo da tensão VCA de entrada do inversor não será excedido, e tendo que o valor máximo da tensão em circuito aberto ocorre à temperatura de -10°C no plano do painel se a fileira de módulos estiver em circuito aberto, deve-se calcular o número máximo de módulos por fileira seguindo a Equação 11.

$$\text{Número máximo de módulos} = \frac{V_{dc \text{ máx}}}{V_{ca(-10^{\circ}\text{C})}} \quad (11)$$

4.10. Configuração do painel compatível como inversor

Para assegurar a compatibilidade entre o painel fotovoltaico e o inversor é necessário calcular o valor da tensão para as condições extremas de temperatura através das Equações 12, 13 e 14 abaixo.

$$V_{PPM(a \ 70^{\circ}\text{C}) \text{ do painel}} = \text{Número de módulos por fileira} \times V_{PPM(a \ 70^{\circ}\text{C})} \quad (12)$$

$$V_{PPM(a \ -10^{\circ}\text{C}) \text{ do painel}} = \text{Número de módulos por fileira} \times V_{PPM(a \ -10^{\circ}\text{C})} \quad (13)$$

$$V_{ca(a \ -10^{\circ}\text{C}) \text{ do painel}} = \text{Número de módulos por fileira} \times V_{ca(a \ -10^{\circ}\text{C})} \quad (14)$$

É necessário calcular o número máximo de fileiras das séries fotovoltaicas, conectadas em paralelo através da Equação 15 para garantir que a corrente máxima se entrada do inversor fotovoltaico não seja ultrapassada.

$$N^{\circ} \text{ seriesFV_paralelo} = \frac{I_{i\max}}{I_{sc}} \quad (15)$$

Onde:

$N^{\circ} \text{ seriesFV_paralelo}$ – número de séries fotovoltaicas em paralelo (fileiras);
 $I_{i\max}$ (A) – Corrente máxima (CC) admitida na entrada do inversor;
 I_{sc} (A) – Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico nas STC.

É também necessário calcular o valor máximo da corrente fornecida pelo painel fotovoltaico através da equação 16.

$$I_{PPM} \text{ do painel} = \text{Número de fileiras} \times I_{PPM}(\text{a } 25^{\circ}\text{C}) \quad (16)$$

Em seguida, os valores obtidos das equações anteriores são comparados com os valores de tensão máxima e mínima e com o valor da corrente máxima do inversor. O painel fotovoltaico escolhido é compatível com o inversor se as seguintes condições técnicas forem confirmadas:

1. V_{PPM} (a 70°C) do painel $>$ V mínima do inversor;
2. V_{PPM} (a -10°C) do painel $<$ V máxima do inversor;
3. V_{ca} (a -10°C) do painel $<$ V_{cc} máxima do inversor;
4. I_{PPM} do painel $<$ I_{cc} máxima do inversor.

Se as quatro condições acima forem verificadas as configurações do sistema fotovoltaico estão tecnicamente definidas. Caso a compatibilidade entre o painel e o inversor não se confirme, então deve ser selecionado outro inversor ou, se for o caso, outro módulo fotovoltaico.

4.11. Viabilidade econômica do sistema

Para o cálculo do período de retorno do investimento foram utilizados os métodos de análise de investimento denominados *Payback* Descontado (PD) e a

Taxa Interna de Retorno. O *Payback* Descontado é calculado pela seguinte equação:

$$PD = \text{mínimo } \{j\}, \text{ tal que } \sum_{j=1}^N \frac{B_j}{(1+TMA)^j} \geq -FC_0 \quad (17)$$

Onde:

PD = *payback* descontado;
j = período;
B = investimento inicial;
N = número de períodos;
FC₀ = fluxo de caixa inicial;
TMA = taxa mínima de atratividade.

Foi calculada também a Taxa Interna de Retorno (TIR) tendo como parâmetro o Valor Presente Líquido (VPL) representado pela seguinte equação:

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{R_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (18)$$

Sendo:

R_j = Receita no j-ésimo período considerado;
C_j = Custo no j-ésimo período considerado;
n = horizonte de planejamento;
i = taxa mínima de atratividade.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada neste estudo foi de 5% e foi considerada uma Vida Útil do Sistema de 25 (vinte e cinco) anos para determinação da viabilidade econômica.

4.12. Metodologia de estimativa de redução de emissões

Para o cálculo de estimativa das reduções de emissões de gases de efeito estufa foi utilizado, conforme definido pela UNFCC para projetos de Geração de eletricidade renovável conectada à rede, a “Metodologia consolidada de linha de

base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis – ACM0002”.

Conforme orientação da metodologia aplicada, consideramos nulas as emissões pelo projeto, devido a energia renovável ser uma fonte neutra de emissão, como também serão nulas as fugas, pois a tecnologia de energia renovável utilizada não será transferida de outra atividade

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) são publicados dois tipos de fatores de emissões de CO₂ para energia elétrica: um deles é destinado a projetos de MDL e o outro tem seu uso destinado a inventários. Os fatores de emissões de CO₂ calculados de acordo com a ferramenta metodológica: “*Tool to calculate the emission factor for an electricity system*” aprovada pelo Conselho Executivo do MDL tem como objetivo estimar a contribuição, em termos de redução de emissões de CO₂ de um projeto de MDL que gere eletricidade para o sistema interligado de energia elétrica.

Neste trabalho, apenas para estimativa das reduções das emissões de gases de efeito estufa, utilizamos os fatores de emissões fornecidos pelo Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT referentes aos projetos de MDL tendo como base o ano de 2015.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados de Irradiação Solar

Conforme descrito no item 2.2, os dados de irradiação solar diária média da região de Lagoa Santa – MG foram obtidos do banco de dados do CRESESB e estão apresentados em valores médios, mês a mês, no período de janeiro até dezembro conforme gráfico abaixo.

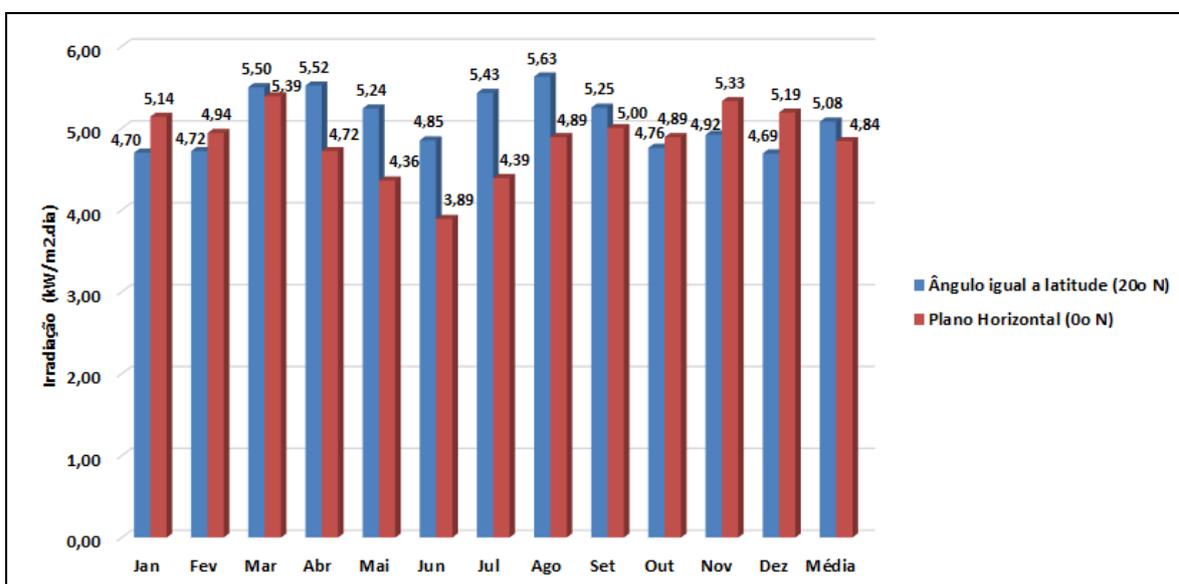


GRÁFICO 1 – IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL NO MUNICÍPIO DE LAGOA SANTA EM 2015

FONTE: AUTOR

Ao analisar os resultados de irradiação solar diária média mensal em plano horizontal, verifica-se que os valores mais baixos estão concentrados nos meses de maio, junho e julho, correspondentes ao final do período de outono e período de inverno na região de Lagoa Santa – MG. Por outro lado, quando se considera a irradiação solar diária média mensal em ângulo igual a latitude (20° N) identifica-se que os valores mais baixos ocorrem nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Para efeito de dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos considerados neste trabalho foi utilizado o valor médio anual da irradiação solar diária média em ângulo igual a latitude que é de 5,08 kWh/m².dia.

É importante ressaltar que nos meses de menor irradiação solar haverá uma menor energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, podendo a unidade habitacional estar consumindo mais energia do que aquela gerada pelo sistema.

5.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico interligado à rede

Para a escolha da quantidade de módulos solares foi avaliada a relação entre o consumo médio de energia elétrica dividido pela energia produzida pelo módulo. O consumo médio foi obtido a partir das contas de energia elétrica da residência durante o período de um ano, e, em seguida, realizou-se uma média simples mais um acréscimo de 15% e foi descontado o custo de disponibilidade do sistema elétrico aplicável ao faturamento mensal de consumidor responsável por unidade consumidora equivalente a 50 kWh em circuito bifásico a 3 (três) condutores. Apresentamos abaixo as especificações dos módulos fotovoltaicos:

Dados do Módulo Fotovoltaico	
Fabricante	Canadian
Modelo	CS6P-265P
Potência nominal de pico (Wp)	265
Tensão à potência nominal (V)	30,6
Tensão de circuito aberto (V)	37,7
Corrente à potência nominal (A)	8,66
Corrente de curto circuito (A)	9,23
Área (m ²)	1,61
Valor de variação da tensão em função da temperatura (0,31%/°C)	0,11687
Eficiência (%)	16,47

TABELA 2 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO
FONTE: CANADIAN SOLAR INC.

O dimensionamento de um inversor depende da potência do gerador fotovoltaico e da tecnologia e características elétricas do módulo escolhido para compor o gerador, características ambientais do local. Assim como na escolha do fabricante dos módulos fotovoltaicos, a seleção de um fabricante de inversores também deve levar em consideração a credibilidade da empresa no que diz respeito à garantia do equipamento, assim como capacidade de assistência técnica no território brasileiro.

O inversor foi dimensionado em função da máxima potência do módulo fotovoltaico e de forma a conseguir um fator de dimensionamento não superior 1,05. As especificações do inversor escolhido seguem abaixo:

Dados do Inversor	
Fabricante:	FRONIUS
Modelo:	GALVO 2.5-1
Potência DC máx. (W):	2650
Tensão CC máx (V)	550
Faixa de operação MPPT de Vdc (V):	165-440
Corrente máxima de entrada (A):	16,6
Número de strings:	3
Potência nominal de CA (W):	2500
Potência máxima de CA VA):	2500
Corrente máxima de saída (A):	12,1
Variação da tensão de saída - V_{PPMin}	165
Variação da tensão de saída - $V_{PPMáx}$	440
Frequencia de rede (Hz):	60
Eficiência máxima:	0,961

TABELA 3 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR
 FONTE: FRONIUS

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado através da aplicação das equações mencionadas no item anterior em uma planilha em excel e foram obtidos os seguintes resultados para unidade consumidora individualizada:

Número de módulos: 08 (oito)

Número de inversores: 01 (um).

5.3 Energia Gerada X Energia Consumida

Através de levantamento dos registros nas faturas de cobrança mensais de energia elétrica da unidade residencial de estudo foram obtidos os valores de energia elétrica consumida (consumo mensal) que está comparado à energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico projetado, conforme apresentado no gráfico abaixo, compreendido entre os meses de janeiro de 2015 a dezembro de

2015, obtendo uma média de consumo de 266 kWh para uma residência em que residem três pessoas.

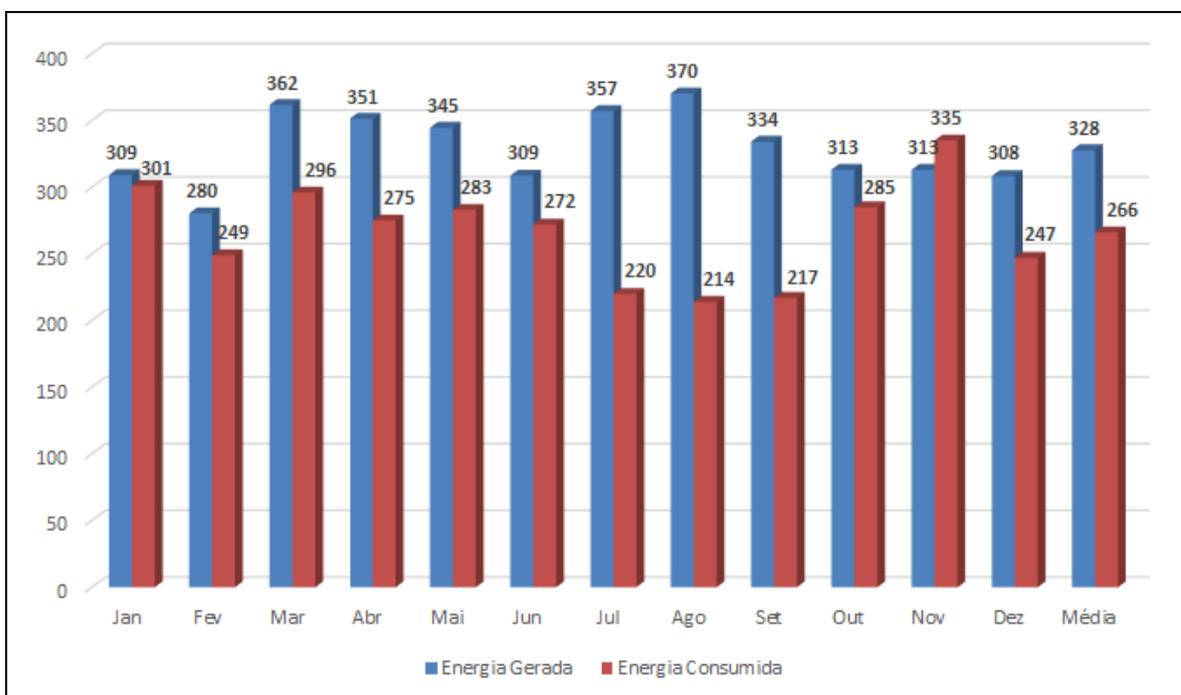


GRÁFICO 2 – ENERGIA ELÉTRICA GERADA E ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA (KWH/MÊS)
FONTE: AUTOR

A energia gerada pelo sistema fotovoltaico projetado foi obtida considerando a insolação diária obtida a partir dos mapas solarimétricos e a eficiência do módulo fornecida pelo fabricante. Dessa forma, a energia gerada pelo sistema dimensionado para uma unidade consumidora individualizada totalizou 4279 kWh por ano e média mensal de 328 kWh/mês.

5.4 Investimento

A) Investimento para uma unidade residencial

Para a implantação do sistema solar fotovoltaico são necessários: módulos solares, inversor, cabos, estruturas de fixação para os painéis e proteções elétricas.

Os custos por item para projeto e instalação do sistema fotovoltaico para uma unidade consumidora individualizada foram obtidos através do *site* da

Neosolar Energia e de informações de empresas especializadas em projeto e instalação e são apresentados na tabela abaixo:

Item	Descrição	Custo (R\$)
01	Fotovoltaicos	7.192,00
02	Inversor	8690,00
03	Estruturas, Cabeamento, String Box e Conectores	3.240,00
04	Projeto, Homologação e Acompanhamento junto a CEMIG	3.000,00
05	Instalação e Start-Up	800,00
TOTAL		22.922,00

TABELA 4 – INVESTIMENTO

FONTE: NEOSOLAR ENERGIA E EMPRESAS ESPECIALIZADAS

B) Investimento para 04 (quatro) unidades consumidoras (condomínio residencial)

Da mesma forma que para o dimensionamento do sistema por unidade consumidora individualizada, para a escolha da quantidade de módulos fotovoltaicos para um empreendimento com 04 unidades consumidoras foi efetuada uma relação entre o consumo médio de energia elétrica dividido pela energia produzida pelo módulo. O consumo médio foi obtido tendo como base as contas de energia elétrica de uma das residências durante o período de um ano, que foi considerado como padrão para as demais unidades consumidoras, e em seguida, realizou-se uma média simples mais um acréscimo de 15% e, de maneira similar, foi descontado o custo de disponibilidade do sistema elétrico aplicável ao faturamento mensal de cada consumidor responsável por unidade consumidora equivalente a 50 kWh em circuito bifásico a 3 (três) condutores, totalizando neste caso 200 kWh.

As especificações dos módulos fotovoltaicos e do inversor são exatamente as mesmas que aquelas mencionadas acima para o sistema por unidade consumidora individualizada.

No caso do empreendimento com 04 unidades consumidoras o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado dentro da mesma

sistemática descrita para o sistema por unidade consumidora individualizada e foram obtidos os seguintes resultados para unidade consumidora individualizada:

Número de módulos: 32 (trinta e dois)

Número de inversores: 04 (quatro)

Para determinar a energia elétrica consumida pelo condomínio residencial foi realizado o levantamento dos registros nas faturas de cobrança mensais de energia elétrica da unidade residencial de estudo multiplicado por 04 (quatro) unidades consumidoras e comparamos à energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico projetado conforme apresentado no gráfico abaixo.

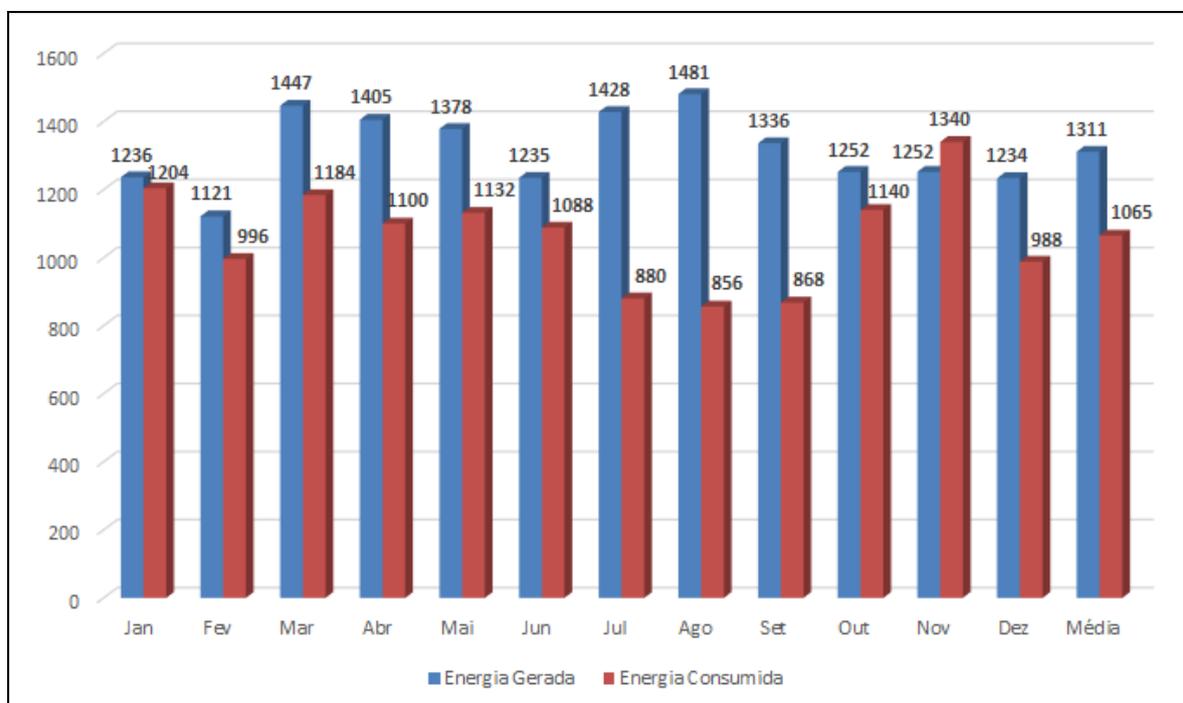


GRÁFICO 3 – ENERGIA ELÉTRICA GERADA E ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA (KWH/MÊS)
FONTE: AUTOR

A energia gerada pelo sistema fotovoltaico dimensionado para o condomínio residencial foi obtida considerando também a insolação diária obtida a partir dos mapas solarimétricos e a eficiência do módulo fornecida pelo fabricante. Assim, a energia gerada pelo sistema totalizou 17118 kW por ano e média mensal de 1311 kWh/mês.

Os custos por item para projeto e instalação do sistema fotovoltaico para o condomínio residencial foram obtidos através do *site* da Neosolar Energia e de

informações de empresas especializadas em projeto e instalação e são apresentados na tabela abaixo:

Item	Descrição	Custo (R\$)
01	Módulos Fotovoltaicos	28.768,00
02	Inversor	34.760,00
03	Estruturas, Cabeamento, String Box e Conectores	11.460,00
04	Projeto, Homologação e Acompanhamento junto a CEMIG	3.000,00
05	Instalação e Start-Up	1.800,00
TOTAL		79.788,00

TABELA 5 – INVESTIMENTO

FONTE: NEOSOLAR ENERGIA E EMPRESAS ESPECIALIZADAS

5.5 Estimativa das reduções das emissões de gases de efeito estufa

Neste trabalho, apenas para estimativa das reduções das emissões de gases de efeito estufa, utilizamos os fatores de emissões fornecidos pelo Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT referentes aos projetos de MDL tendo como base o ano de 2015, conforme indicado abaixo.

Margem de Construção												
Fator de emissão médio (tCO₂/MWh) – ANUAL												
0,2553												
Margem de Operação												
Fator de emissão médio (tCO₂/MWh) – mensal												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
0,5755	0,5784	0,5767	0,5465	0,5469	0,5785	0,5686	0,5545	0,5308	0,5434	0,5513	0,5450	0,5580

TABELA 6 – FATORES DE EMISSÃO DA MARGEM DE CONSTRUÇÃO E DA MARGEM DE OPERAÇÃO

FONTE: MCT, 2016

De acordo com a “Metodologia consolidada de linha de base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis – ACM0002”, o fator de emissão da linha de base é calculado como a média ponderada do fator de emissão da Margem de Operação e do fator de emissão da Margem de Construção, sendo que os pesos adotados para projetos de energia solar são 0,75 para a OM e 0,25 para a BM. Ainda de acordo com a metodologia

mencionada, para as atividades de projeto que não modifiquem ou façam retromodificação de uma usina existente de geração de eletricidade, o cenário da linha de base considera que a eletricidade fornecida à rede pelo projeto teria sido gerada, do contrário, por usinas de energia conectadas à rede e pelo acréscimo de novas fontes geradoras, e, dentre estas, incluem-se as fontes geradoras de eletricidade que provocam a emissão de gases de efeito estufa.

Através dos fatores de emissão da Margem de Construção e da Margem de Operação referentes ao ano-base 2015 obtidos no *site* do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) foi estimado um fator de emissão de CO₂ para energia elétrica de 0,48233 tCO₂/MWh. Apenas com o objetivo de verificar a variação deste fator de emissão estimado em relação à média dos últimos 4 (quatro) anos, tendo em vista o cenário de queda no consumo final de eletricidade no Brasil em 2015, foi calculado o valor médio do fator de emissão do período de 2012 a 2015, tendo sido obtido o resultado de 0,48630 tCO₂/MWh, o que demonstrou uma variação inferior a 1% em relação ao fator de emissão estimado para o ano de 2015.

Dessa forma, considerando a eletricidade anual gerada pelo sistema fotovoltaico para unidade consumidora individualizada e o fator de emissão, as emissões evitadas foram estimadas em 2,0639 tCO₂. Dentro deste contexto, as emissões evitadas pelo sistema fotovoltaico para o empreendimento com 04 (quatro) unidades consumidoras (condomínio residencial) foram estimadas em 8,2564 tCO₂.

5.6 Viabilidade do sistema

Para implantação do sistema fotovoltaico para uma unidade residencial individualizada o investimento final é de R\$ 22.922,00, estando considerados os custos com equipamentos, materiais e mão de obra (projeto e instalação).

Os módulos fotovoltaicos utilizados possuem 10 anos de garantia contra defeito de fabricação e 25 anos para perda de eficiência maior que 20%. O inversor possui 5 anos de garantia contra defeito de fabricação e uma vida útil estimada de 10 a 15 anos.

Consideramos o valor da tarifa de energia elétrica conforme informado na fatura de energia elétrica pela CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais e um reajuste tarifário anual de 11% (média histórica dos reajustes anuais dos últimos 10 anos), que acontece no mês de abril de cada ano.

O período de retorno do investimento de implantação do sistema fotovoltaico em 1 (uma) unidade consumidora individualizada foi calculado em 6 (seis) anos, 10 (dez) meses e 5 (cinco) dias considerando uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 5%. O gráfico 4 apresenta a evolução do fluxo de caixa acumulado para um período de 25 (vinte e cinco) anos.

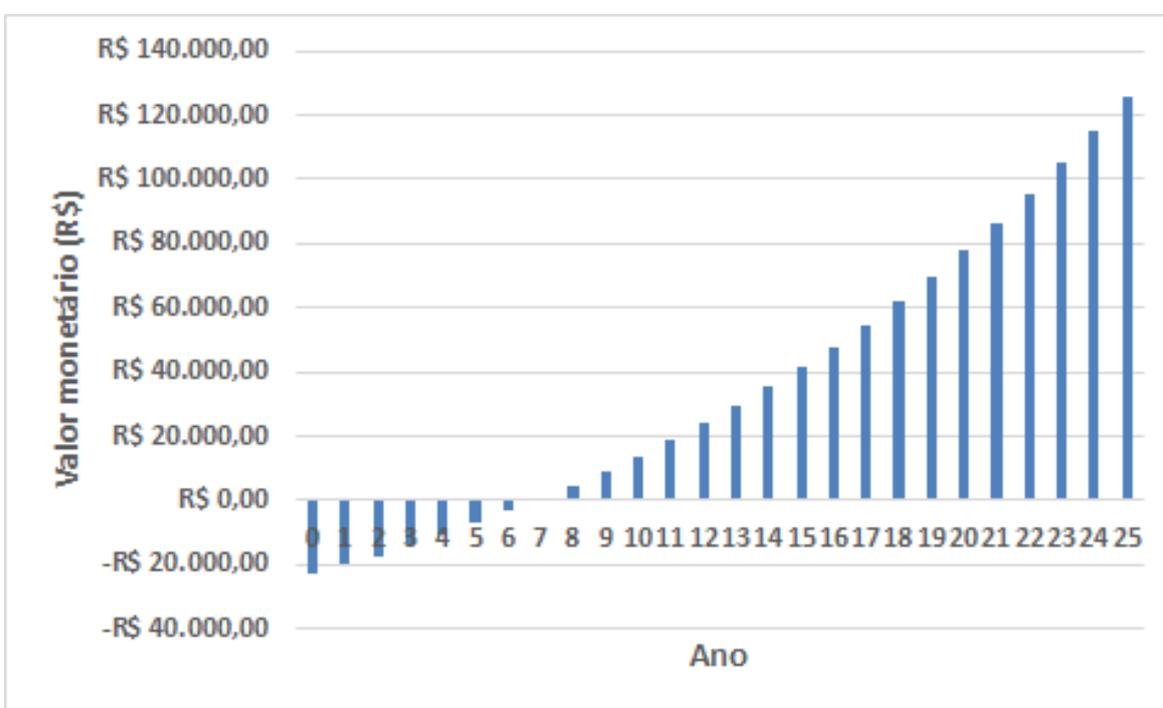


GRÁFICO 4 – FLUXO DE CAIXA ACUMULADO – SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UMA UNIDADE CONSUMIDORA
FONTE: AUTOR

Já para implantação do sistema fotovoltaico para o empreendimento com 04 (quatro) unidades consumidoras (condomínio residencial) o investimento final é de R\$ 79.788,00, estando também considerados os custos com equipamentos, materiais e mão de obra (projeto e instalação). Neste caso o período de retorno do investimento se dará em 6 (seis) anos, 1 (um) mês e 3 (três) dias tendo a mesma TMA. Da mesma forma, o gráfico 5 apresenta a evolução do fluxo de caixa acumulado para um período de 25 (vinte e cinco) anos.

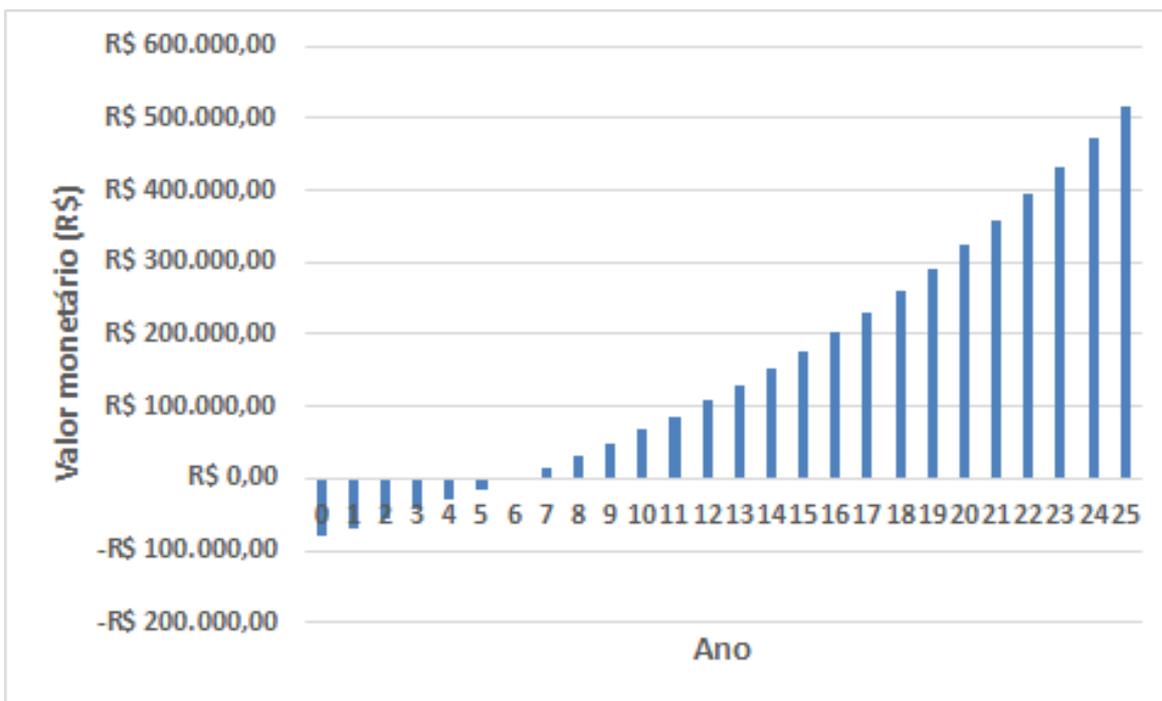


GRÁFICO 5 – FLUXO DE CAIXA ACUMULADO – SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA 4 (QUATRO) UNIDADES CONSUMIDORAS

FONTE: AUTOR

5.7 Comparativo entre as configurações do sistema

Inicialmente cabe ressaltar que ambos sistemas de energia solar fotovoltaica foram dimensionados para garantir que a energia gerada seja sempre igual ou superior à energia consumida durante todos os meses do ano, tendo como base a irradiação solar diária média mensal em ângulo igual a latitude (20° N) no município de Lagoa Santa.

O valor total do investimento para implantação do sistema fotovoltaico em uma unidade residencial individualizada foi avaliado em R\$ 22.922,00 e o valor total do investimento para implantação do sistema fotovoltaico em um empreendimento com 04 (quatro) unidades habitacionais foi de R\$ 79.788,00. Caso a implantação ocorra individualmente em cada uma das quatro unidades consumidoras o valor total do investimento será de R\$ 91.688,00, ou seja, R\$ 11.900,00 superior ao investimento para implantação do sistema no condomínio residencial, o que representa um aumento de 14,91%.

Em ambos os projetos, tanto a implantação do sistema fotovoltaico dimensionado para uma unidade habitacional individualizada quanto a

implantação do sistema fotovoltaico para o empreendimento residencial com 04 unidades habitacionais apresentam viabilidade econômica, sendo que para o primeiro caso a Taxa Interna de Retorno (TIR) é de 23% e no segundo caso a TIR é de 25%.

É importante destacar também que existe uma linha de crédito do Santander Financiamentos que é direcionada exclusivamente para incentivar o uso da energia solar fotovoltaica no país. Por meio deste tipo de financiamento o interessado pode parcelar em até 5 (cinco anos) a instalação de painéis solares e toda a estrutura necessária para a geração de energia em escritórios e residências. Desta forma, há uma maior facilidade em se viabilizar a obtenção do investimento inicial para implantação do sistema.

Dois pontos importantes a serem considerados na tomada de decisão em relação ao investimento na implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em determinado empreendimento são tanto a intenção de permanência no imóvel por um longo período quanto a provável margem de valorização do mesmo.

6. CONCLUSÕES

A análise de investimento demonstrou que o custo de implantação do sistema fotovoltaico para uma unidade consumidora é R\$ 22.922,00 com um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 126.092,32, e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 23%. Comparativamente, o custo de implantação para 4 unidades consumidoras em sistema de condomínio é R\$ 79.788,00, tendo sido demonstrado que neste caso o VPL é R\$ 516.350,00 e a TIR é 25%, considerando-se uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 5% ao ano. Tais valores referem-se ao custo de oportunidade da instalação do sistema fotovoltaico, visto que a energia gerada é consumida ou compensada, não podendo ser vendida com finalidade de retorno financeiro.

Cabe ainda comentar que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 5% foi escolhida em função da rentabilidade média de opções conservadoras de investimento tais como Caderneta de Poupança e determinados Fundos de Investimento, sem considerar os impactos da inflação sobre o capital. Entretanto, é importante salientar que foi avaliada a sensibilidade do VPL em função de variações da TMA e, de forma resumida, verificou-se que para o sistema em uma unidade consumidora, o VPL passa a ser de R\$ 74.419,98 e R\$ 52.445,61, caso a TMA seja de 8% ou 10% respectivamente. Da mesma forma, para o sistema em um condomínio residencial, o VPL será de R\$ 309.632,84 e R\$ 221.723,41 para as mesmas Taxas Mínimas de Atratividade informadas acima.

O sistema fotovoltaico dimensionado para um empreendimento residencial com 04 (quatro) unidades habitacionais apresentou maior viabilidade econômica visto que a implantação de forma individualizada em cada uma das quatro unidades consumidoras representará um custo 14,91% superior. Esta redução no investimento de implantação do sistema deve-se principalmente ao ganho de escala incidente sobre o custo de desenvolvimento do projeto. Além disso, o retorno do investimento se dará em 6 (seis) anos, 1 (um) mês e 3 (três) dias para o sistema dimensionado para o condomínio contra um prazo de retorno do investimento de 6 (seis) anos, 10 (dez) meses e 5 (cinco) dias para o sistema em uma única unidade habitacional individualizada.

Em relação à estimativa de emissões evitadas, o sistema fotovoltaico para uma unidade consumidora totalizou 2,0639 tCO₂, enquanto o empreendimento com 04 (quatro) unidades consumidoras atingiu 8,2564 tCO₂.

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se desenvolver uma análise sobre sistemas fotovoltaicos destinados à geração de energia elétrica para unidades habitacionais destinadas à população de baixa renda, o que, possivelmente, virá a demonstrar que, considerando o consumo médio mensal deste tipo de edificação, o sistema fotovoltaico para unidades consumidoras individualizadas se tornará economicamente inviável em detrimento à viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos destinados a empreendimentos formados por múltiplas unidades consumidoras, sendo este um ponto a ser considerado em políticas públicas e programas de incentivo e financiamento destinados a tal finalidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, V. F. C. F. **Potencialidades e viabilidade da utilização de painéis fotovoltaicos nos edifícios e na sua vizinhança urbana.** 201 f. Dissertação (Tese de Mestrado – Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2013.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica.** Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012. <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/faq_482_18-12-2012.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2016.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica.** Cadernos Temáticos ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, 2014. <<http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>. Acesso em 20 de agosto de 2016.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL 3ª EDIÇÃO. **Agência Nacional de Energia Elétrica.** Brasília, ANEEL, 2008.

BATISTA, F. R. S. **Estimação do valor incremental do mercado de carbono nos projetos de fontes renováveis de geração de energia elétrica no Brasil: Uma abordagem pela teoria das opções reais.** 199 f. Dissertação (Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

BRITO, et al. **Energia Fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade.** 7 f. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Tutorial Energia Solar: Princípios e Aplicações**. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 24 de maio de 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desenvolvimento conceitual de metodologia de medição e verificação de consumos de energéticos nas indústrias**. Brasília, 2012.

COELHO, S. O. **Avaliação das Emissões Atmosféricas das Principais Termelétricas Brasileiras a Gás Natural – Ano Base 2013**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Nota Técnica DEA 19/14. Série: Recursos Energéticos. Rio de Janeiro, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011**. Rio de Janeiro, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro, 2016.

FAEDO, A. **Viabilidade de um sistema de energia fotovoltaica residencial ligado a rede**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FARIAS et al. **Contabilidade Gerencial Aplicada à Gestão de Investimentos: Um Estudo de Caso na Empresa Tecnofrio**. In: 5º Congresso UFSC de Controladoria e Finanças & Iniciação Científica em Contabilidade, 2014, Florianópolis – SC.

FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**. 104f. Relatório de projecto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial – Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2008.

GNOATTO et al. **Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel**. 5 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2008.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>>. Acesso em 02 de setembro de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>. Acesso em 24 de setembro de 2016.

MARQUES et al. **Energia Solar Fotovoltaica em Unidades Residenciais: estudo de caso**. In: Congresso de Iniciação Científica do IFRN; Tecnologia e Inovação para o Semiárido, 2013, Currais Novos – RN. IX CONGIC, 2013.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Arquivos dos fatores de emissões**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/361017.html#ancora>>. Acesso em 24 de setembro de 2016.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na indústria de transformação**. Brasília, DF, 2013.

NEOSOLARENERGIA. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br>>. Acesso em 02 de setembro de 2016.

PEREIRA et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEREIRA, F. A. S.; OLIVEIRA, M. A. S. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica**. Publindústria Edições Técnicas, Porto, 2015.

PINHO, J. T. et al. **Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª. Ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

Resolução Normativa n° 482. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em 03 de setembro de 2015.

RUTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 114p.

RUTHER, R. **Pré-dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de caso do edifício-sede do CREA – SC**. In: Conferência Latino-americana de Construção Sustentável, 1.; Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10., 2004, São Paulo – SP. I CLACS; X ENTAC, 2009.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Disponível em: <<http://unfccc.int/2860.php>>. Acesso em 13 de agosto de 2016.

