

ASPECTOS DA MICROGERAÇÃO, CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO EM UMA RESIDÊNCIA NO SUL DA BAHIA

Ronaldo Lima Gomes – rlgomes@uesc.br

Universidade Estadual de Santa Cruz - Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais

Adriano Hoth Cerqueira – hoth@uesc.br

Universidade Estadual de Santa Cruz - Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas

Resumo: *Este trabalho tem o objetivo de entender a dinâmica de captação de energia solar, a sua conversão em energia elétrica, o seu consumo pela unidade geradora residencial e a sua parcela de injeção na rede pública. Para tanto, o método adotado se utilizará de dados coletados nos últimos 3 anos em uma unidade microgeradora residencial localizada na cidade de Ilhéus, Bahia. Inicialmente foram organizados os dados de produção de energia elétrica realizada pela microgeração solar, a partir de dados coletados no inversor do sistema. Estes dados foram úteis também para estimar a irradiância solar global que incide na área em estudo. Em seguida, a partir dos dados coletados nas contas de energia da residência, foi possível calcular o balanço entre o consumo mensal de energia elétrica proveniente da concessionária e da parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública. No período estudado, os painéis solares instalados foram responsáveis pela produção 8,5 MWh de energia elétrica. Nós mostramos que esta produção é compatível com um valor médio para a irradiação global diária que chega às superfícies inclinadas da unidade de 5,92 kWh/m²/dia. Mostramos também que os valores mensais de irradiação na superfície inclinada correlaciona-se com os valores mensais de irradiação global recebidos no plano horizontal. No período estudado, a demanda de energia elétrica da residência estudada foi de 11,2 MWh. Dessa forma, a diferença no balanço produção-consumo foi suprida pelo fornecimento de energia elétrica da rede pública que contabilizou 2,7 MWh. Mostramos que a utilização de energia elétrica da rede pública foi responsável por 24% da demanda total de energia elétrica da residência, o que proporcionou uma economia média de 63% no valor da fatura mensal de energia e uma taxa de amortização do investimento para a instalação e funcionamento deste sistema de microgeração da ordem de 14% ao ano.*

Palavras-chave: *Microgeração, Energia fotovoltaica, Ilhéus*

1. INTRODUÇÃO

O potencial de geração de energia elétrica solar vem se destacando como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis do mundo. No Brasil, passados sete anos da publicação da resolução normativa n. 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), que estabelece as condições para a instalação de micro e mini centrais geradoras de energia elétrica provenientes de fontes renováveis, a microgeração de energia solar vem se disseminado cada vez mais em virtude do declínio dos custos de instalação e aumento dos incentivos fiscais.

Atualmente o cadastro de geração distribuída de energia elétrica (ANEEL, 2018) indica a existência de 33.594 microgeradores, localizados nos diferentes estados brasileiros, com capacidade instalada de 407.654,43 kW. Os microgeradores que se utilizam da fonte solar através da utilização de painéis fotovoltaicos representam 99,4% do total cadastrado e quando analisados as unidades de microgeração localizadas em residências, estas perfazem 77% do total.

A respeito do cenário futuro, as projeções da Empresa de Pesquisa Energética para 2024 (EPE, 2017) indicam o aumento em 26 vezes no número de unidades consumidoras que estarão utilizando a microgeração de energia elétrica, sendo que 90% destas estarão instaladas em residências.

A microgeração solar em residências e em instalações comerciais e industriais representa fator de diminuição de custos de consumo da energia servida pela rede pública e, além disso, do ponto de vista ambiental global, representa a diminuição de emissão de gases de efeito estufa.

Em centros urbanos brasileiros ainda é relativamente incipiente o uso desta tecnologia de geração de energia elétrica em virtude, provavelmente, da falta de disseminação do tema na sociedade, incluindo ainda os custos e procedimentos de implantação.

A exemplo de outras regiões do País, na região sul do estado da Bahia, mais precisamente no município de Ilhéus, o comportamento do crescimento no número de unidades consumidoras cadastradas no sistema de microgeração de energia elétrica também foi notado. De acordo com a ANEEL (2018) são 23 registros de microgeração de energia elétrica fotovoltaica, sendo que destes 82% associam-se a instalações residenciais, totalizando 160,15 kW de capacidade instalada. Os dados indicam ainda que a adoção do sistema de microgeração em residências no município se iniciou em 2015, evoluindo para um expressivo crescimento de 50% do total das instalações a partir do ano de 2018.

Nesse contexto, em função do pouco tempo de instalação e funcionamento destas micro unidades geradoras localizadas em residências e da carência de publicações científicas que retratem o comportamento destas unidades em

funcionamento é que este trabalho tem o objetivo de entender a dinâmica de captação de energia solar, a sua conversão em energia elétrica, o seu consumo pela unidade geradora residencial e a sua parcela de injeção na rede pública. Para tanto, o método se utilizará de dados coletados nos últimos 3 anos em uma unidade microgeradora residencial localizada na cidade de Ilhéus, Bahia.

2. ASPECTOS GERAIS DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste item serão discutidos conceitos e apresentadas as diferentes fases envolvidas no processo de microgeração de energia elétrica fotovoltaica em unidades residenciais.

2.1 O Conhecimento da irradiação solar incidente na área em estudo

No topo da atmosfera da Terra a radiação solar que atinge o planeta varia em função da excentricidade da órbita da Terra e da declinação do sol com os dias do ano, além de outros efeitos locais, como a rotação da terra. A declinação solar é o ângulo que a uma linha imaginária Sol-Terra faz com o plano definido pelo equador terrestre. Em 21 de março e 21 de setembro (aproximadamente), este ângulo é zero porque a linha que une os centros do Sol e da Terra cruza a linha do equador. Já em 21 de dezembro (solstício de verão para o hemisfério Sul) o equador está inclinado com relação a esta linha imaginária de $-23,45^\circ$. Na posição oposta, em 21 de Junho (solstício de inverno para o hemisfério Sul), a declinação é de $+23,45^\circ$. Tal fato faz com que a potência da radiação solar diária, integrada ao longo do dia, por unidade de área, denominada de irradiação, no topo da atmosfera varie ao longo do ano e tenha um valor médio anual de $9,71 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ na latitude da cidade de Ilhéus, para uma superfície horizontal, conforme discutido em Cerqueira e Gomes (2019).

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar se decompõe nas denominadas radiação direta e difusa. A radiação direta é a que vem diretamente do disco solar. Já a difusa é fruto do espalhamento desta ocasionado pela atmosfera terrestre. Estas duas componentes, quando somadas, representam a denominada radiação solar global que incide sobre uma superfície horizontal. Em Ilhéus, o valor esperado médio para a irradiação, na superfície horizontal, é de $4,53 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ (Cerqueira e Gomes, 2019). Se a superfície receptora da radiação estiver inclinada com relação a horizontal, ainda há que se levar em consideração o albedo da região do entorno, que certamente contribuirá com um fluxo de energia na direção do receptor. Os mapas SWERA (Pereira *et al.*, 2006) estimam um valor médio, para a latitude de Ilhéus, de $5-5,20 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ para a irradiação no plano inclinado (ou seja, com inclinação com relação à horizontal igual ao ângulo definido pela latitude local; em Ilhéus, aproximadamente 15°).

Dessa forma, caso não houvesse interferência da atmosfera (incluindo aí as climáticas) na radiação solar que atingisse a superfície terrestre, poderíamos adotar o valor de $9,71 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ de irradiação (para a radiação global na superfície horizontal). Porém, não é bem isso que acontece. Características climáticas como cobertura de nuvens, presença de vapor de água e aerossóis, dentre outros, ocasionam a redução da irradiância solar que atinge a superfície terrestre. Na cidade de Ilhéus, por exemplo, esta redução pode variar de 30% (dias claros) a 90% (dias muito chuvosos/cobertos). Em trabalhos recentes, Pereira *et al.* (2017) e Cerqueira e Gomes (2019), a partir da análise de dados disponíveis em uma estação automática de coleta de dados (PCD) (INPE, 2018) situada em Ilhéus, obtiveram um valor médio para a irradiação global, na superfície horizontal, de $H_{HOR} = 4,53 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. Os autores mostraram também que o índice de claridade (e.g., Liu & Jordan, 1960), apesar de apresentar grande dispersão, com valores entre 0,1 e 0,8, possui um comportamento médio que varia pouco ao longo dos meses do ano quando considerado o período estudado de 2001 a 2016 (ver Cerqueira e Gomes, 2019), de modo que podemos considera-lo constante e igual a $K_T \sim 0,46$. Por outro lado, ao definir o índice de claridade, há que se considerar a inclinação da superfície receptora, pois ela altera a forma e quantidade como a irradiância solar irá se distribuir ao longo do dia na superfície. Neste caso, o parâmetro importante é a irradiação na superfície inclinada, H_{INC} , que possui a contribuição do albedo para o incremento da recepção de energia por uma superfície inclinada (quando comparada com a superfície horizontal; que não recebe a contribuição do albedo). Uma outra fonte de informação que utilizaremos ao longo deste trabalho são os dados publicados pela rede SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (INPE, 2016), onde observa-se que os valores encontrados de irradiação solar global para a cidade de Ilhéus variam de 3,68 a 6,24 $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$, com média de $5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$.

Neste trabalho nós apresentamos uma correlação possível entre a irradiação na superfície inclinada da unidade de microgeração e a irradiação no plano horizontal. Embora aplicável à unidade de microgeração em consideração, a metodologia pode ser facilmente estendida para qualquer outra unidade que se desejar. Também analisaremos em detalhes o perfil de produção, consumo e injeção de energia no sistema, e os impactos financeiros resultantes do balanço energético final.

2.2 A captação da irradiação solar pelos painéis solares

Tendo em vista a transformação da irradiância solar em energia elétrica, adota-se atualmente a tecnologia de painéis fotovoltaicos. Ressalta-se que, não é objetivo deste trabalho a análise técnica dos diferentes tipos tecnológicos

destes equipamentos e sim fazer uma breve abordagem dos conceitos de funcionamento da tecnologia mais utilizada atualmente.

Neste contexto, os painéis solares são compostos por células fotovoltaicas com dimensões aproximadas de 15cm x 15cm cada, confeccionadas com materiais semicondutores, e em escala industrial, com o silício policristalino. De forma geral, quando fótons de determinada energia atingem a junção semicondutora da placa, elétrons são disponibilizados pelo material e são então acelerados pelo campo elétrico da junção, dando origem, portanto, à corrente elétrica.

Atualmente a eficiência energética dos painéis solares gira em torno de 17,5%. Ou seja, dos 4,53 kWh/m²/dia de irradiação que incide na superfície terrestre na área em estudo (Cerqueira e Gomes, 2019), apenas 0,8 kWh/m²/dia será capturado pelas células fotovoltaicas presentes nos painéis solares (considerando que os mesmos estejam dispostos na horizontal; e sempre consideraremos a situação específica do município de Ilhéus), podendo chegar a 0,9 kWh/m²/dia se considerarmos o valor de 5,20 kWh/m²/dia indicado no mapa SWERA para o plano inclinado (ver Pereira *et al.* 2006). No mercado atual podem ser encontrados painéis solares de 330 W que recobrem uma área de 1,94 m² contendo 72 células fotovoltaicas em arranjo 6x12.

2.3 Quantidade e posicionamento de painéis solares

Em cada local de microgeração, os painéis solares possuem o seu posicionamento disposto de acordo com as características geométricas de incidência da radiação solar no local. De forma geral, no Brasil, os painéis devem ser orientados para o norte com ângulos de inclinação com relação à horizontal que variam com a latitude do local a ser instalado. No caso do município de Ilhéus, localizado na latitude 14°47'26''S, o ângulo de inclinação dos painéis deve ser de, aproximadamente, 15°. Tal configuração faz com que os painéis solares possam repousar nos telhados das residências na face voltada, preferencialmente, para o norte.

Com relação a quantidade de painéis a serem instalados, o perfil socioeconômico do microgerador, mais precisamente as suas características de consumo anual de energia elétrica, refletirá no dimensionamento do sistema, ou seja, na sua capacidade de produção de energia solar. De forma geral, a capacidade/potência dos painéis solares instalados é diretamente proporcional à produção de energia elétrica solar que se quer atingir. Dessa forma, pequenos consumidores de energia elétrica terão seus sistemas de microgeração solar de potência instalada compatível com a sua demanda de consumo.

Por outro lado, para microgeradores de maior consumo, um sistema de maior potência é requerido. Esse cenário pode ser balanceado, também, de acordo com a taxa que o usuário microgerador desejar atingir. Por exemplo, poderá dimensionar o seu sistema de geração solar para abastecer 100% ou 50% ou 25%, etc, de seu consumo de energia elétrica. Dessa forma, se a unidade residencial consome 10 kWh/dia de energia elétrica e deseja suprir com energia fotovoltaica 100% deste consumo, então torna-se necessário a instalação de 11,1 m² de painéis solares, considerando 0,9 kWh/m²/dia de irradiação coletada. Visto que os painéis atuais mais potentes e disponíveis no mercado possuem área de 1,94m² torna-se necessária a instalação de 6 unidades de 330W proporcionando a existência de uma usina de microgeração de 1,98 kW de potência.

2.4 O Balanço produção - consumo de energia elétrica na unidade microgeradora

A irradiação solar captada pelas células fotoelétricas dispostas nos painéis solares é transformada em corrente elétrica contínua que segue por fios condutores até o equipamento denominado Inversor. Este, por sua vez, é o responsável pelo gerenciamento de todo o sistema de microgeração.

A função primordial do inversor é converter a corrente elétrica contínua, proveniente dos painéis solares, em energia de corrente alternada a ser conectada no circuito elétrico da residência. Além disso, o inversor também é o responsável pela segurança do sistema, tendo em vista o controle da qualidade e características técnicas da energia gerada e da adoção do denominado controle anti-ilhamento. Este último evita que a rede pública, quando em falta de energia, seja abastecida pela energia elétrica proveniente de uma unidade de microgeração. Tal fato pode provocar a energização da rede pública, pondo em risco os procedimentos de manutenção e segurança. Dessa forma, quando da ocorrência de falta de energia na rede pública, o inversor do sistema de microgeração solar deixa de operar e, portanto, de gerar energia proveniente dos painéis solares.

É importante lembrar que os sistemas de geração de energia fotovoltaica podem ser divididos em dois grandes grupos: os sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede pública (*grid-tie*). Os sistemas isolados são aqueles que não se integram a rede elétrica pública e geralmente são utilizados em locais remotos ou onde o custo de acesso a rede é maior que o custo do próprio sistema. Normalmente estes sistemas utilizam bateria para armazenar a energia.

Já os sistemas conectados à rede (*grid-tie*), caso aqui estudado, são caracterizados por estarem integrados à rede elétrica que abastece a população. Diferente dos sistemas isolados que atendem a um propósito específico e local, estes sistemas também são capazes de abastecer a rede elétrica com energia que pode ser utilizada por qualquer consumidor da rede. Em residências e empresas estes sistemas também são chamados de sistemas fotovoltaicos de auto-consumo. Se o proprietário do sistema produzir mais energia do que consome, a energia produzida será contabilizada como crédito pela rede de distribuidora. Quando produzir menos do que consome, o medidor deverá contabilizar economia nos custos.

Ressalta-se que, a regulamentação para a conexão de microgeradores ao sistema de distribuição é definida pela Resolução Normativa da ANEEL N. 482 de 17/04/2012, que trata, também, do sistema de compensação de energia.

3. MÉTODO ADOTADO

Para se atingir aos objetivos traçados o método adotado foi subdividido em 4 etapas, conforme descritas a seguir.

Inicialmente, na etapa 1, foi feita a escolha da unidade residencial microgeradora de energia fotovoltaica localizadas no centro urbano do município de Ilhéus, estado da Bahia. O critério adotado foi a de que a unidade localiza-se em área de relevo plano sem a interferência de sombreamento causado por morros ou edificações, além da disponibilidade de acesso aos dados promovido pelo seu proprietário. Esta unidade de microgeração possui registro de n. GD.BA.000.001.963 no cadastro de unidades consumidoras com geração distribuída da ANEEL (ANEEL, 2018) e começou a operar em 07/07/2015. Possui potência de 1,5 kW sendo composta por 6 painéis solares de 250 W cada, que totalizam 8,76 m² de área, interligados a um aparelho inversor de 1500W de potência. A Fig. 1 apresenta o esquema ilustrativo da unidade de microgeração solar. Estes painéis estão dispostos da seguinte forma: 3 voltados para o norte, 3 voltados para o oeste. Em todos os casos, a inclinação com relação à horizontal é de aproximadamente 15°.

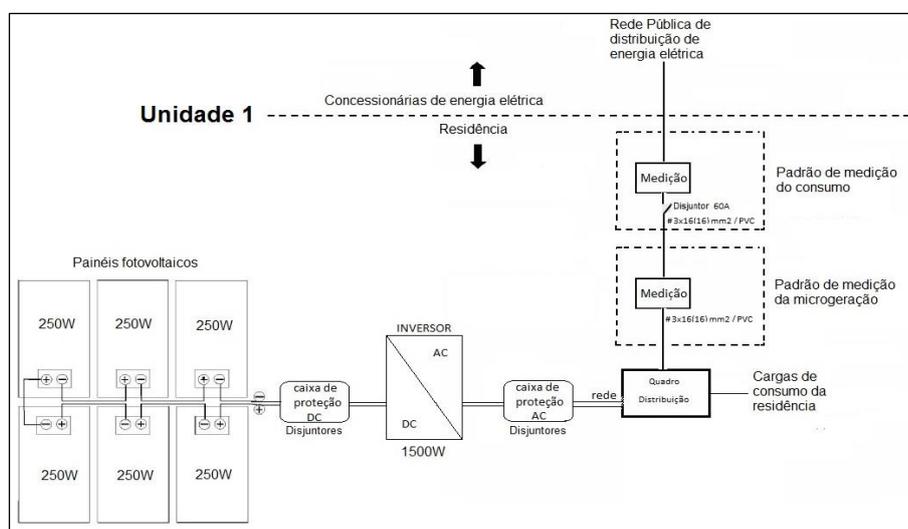


Figura 1 – Esquema ilustrativo do sistema de microgeração de energia fotovoltaica da unidade residencial estudada.

Na etapa 2 foram organizados e consolidados os dados de produção de energia elétrica realizada pelo sistema de microgeração solar. Para tanto, utilizou-se os dados quantificados pelo aparelho inversor que é capaz de apresentar, em tempo real, a sua produção de energia elétrica dada em kWh seja ela o acumulado diário ou mensal. O período de aquisição dos dados estudados situa-se entre 17/7/2015 e 17/7/2018.

A etapa 3 consiste da avaliação do balanço produção e consumo de energia elétrica na residência, partindo-se da premissa em que durante o dia a corrente elétrica oriunda do microgerador solar pode ser consumida em parte ou em sua totalidade por aparelhos e eletrodomésticos que estejam conectados a rede elétrica da casa. Ou seja, quando a energia elétrica gerada pelo microgerador supera o consumo, uma parcela desta é injetada na rede pública. Por outro lado, à noite, quando da desativação da microgeração solar, ou durante o dia quando o consumo da residência é superior ao da microgeração, a demanda de energia da residência é suprida pela energia proveniente da rede pública. Para o entendimento deste fluxo é necessário a sua medição.

Para a medição do fluxo de energia elétrica na unidade existem dois aparelhos. Um deles mede o consumo de energia elétrica proveniente da concessionária, enquanto o outro a parcela de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública.

Com os dados de produção mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar em conjunto com os dados de consumo mensal de energia elétrica proveniente da concessionária e da parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública, torna-se possível responder as seguintes perguntas: Qual a parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar utilizada na residência (auto consumo)?; Qual a demanda mensal de energia elétrica da unidade residencial?, e qual o balanço entre a energia elétrica injetada na rede pública com a consumida da unidade residencial?

Por sua vez, na etapa 4, a partir dos dados de produção mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar, da área dos painéis fotovoltaicos e da eficiência energética dos painéis será calculada a irradiação solar global que incide nos painéis inclinados da unidade de microgeração. Este valor será correlacionado com o valor estimado para a irradiação global incidente, na superfície horizontal e na cidade de Ilhéus, usando-se para isto resultados de análises históricas de medidas da radiação solar em Ilhéus (ver Cerqueira e Gomes, 2019). Com os dados da produção

energética, apresentaremos uma estimativa para a irradiação no plano inclinado da usina de microgeração. Por fim a Tab. 1 sintetiza os dados a serem utilizados nesta pesquisa e sua fonte.

Tabela 1 – Síntese dos dados utilizados e sua fonte de informação.

Etapa	Tipo de dado	Unidade	Fonte
1	Produção mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar.	kWh/mês	Base de dados do inversor instalado. A ser consultado no aplicativo do aparelho.
2	Consumo mensal de energia elétrica proveniente da concessionária.	kWh/mês	Leitura realizada no medidor pela concessionária de energia elétrica e disponível na conta de energia.
	Parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública.	kWh/mês	Leitura realizada no medidor pela concessionária de energia elétrica e disponível na conta de energia.
	Parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar utilizada na residência (auto consumo).	kWh/mês	Diferença entre a produção mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar e a parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública.
	Demanda mensal de energia elétrica da unidade residencial.	kWh/mês	Soma do consumo mensal de energia elétrica proveniente da concessionária com a parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar utilizada na residência (auto consumo).
3	Balanco entre a energia elétrica consumida na unidade residencial com a injetada na rede pública.	kWh/mês	Diferença entre o consumo mensal de energia elétrica proveniente da concessionária e a parcela mensal de energia elétrica proveniente da microgeração solar injetada na rede pública.
4	Área dos painéis fotovoltaicos	m ²	Disponível no manual técnico do painel.
	Eficiência energética dos painéis fotovoltaicos	%	Disponível no manual técnico do painel.
	Irradiância solar global (média diária anual).	kWh/m ² /dia	Calculada a partir da energia elétrica gerada pelo inversor, área dos painéis e sua eficiência energética.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Quanto a Produção de energia solar fotovoltaica e a irradiação solar global coletada.

A Fig. 2 apresenta as médias diária e mensal da produção de energia elétrica fotovoltaica, conhecidas a partir da análise dos dados gerados pelo inversor da unidade microgeradora. Depreende-se da análise dos dados que a produção média de energia elétrica fotovoltaica na unidade estudada é de 235,4 kWh/mês, que corresponde a 7,7 kWh/dia. O período entre os meses de abril e agosto, referente ao fim do outono e todo o inverno, possui produção abaixo da média mensal, com valor mínimo médio em junho de 179,4 kWh. Por outro lado, o período de setembro a março (primavera, verão e início do outono) apresenta valores acima da média, com o máximo de produção em janeiro de 280,5 kWh. Conforme esperado, este comportamento também é seguido pelas médias diárias.

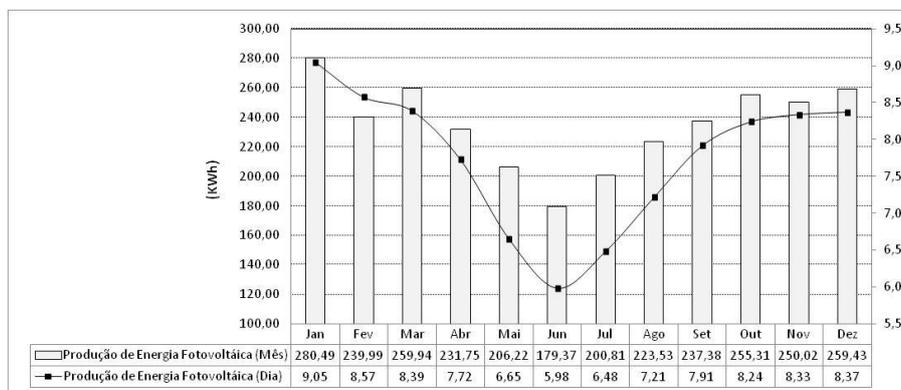


Figura 2 – Média mensal e diária de produção de energia elétrica fotovoltaica na unidade residencial estudada.

Quando normalizados os valores de produção exibidos na Fig.2, considerando a área dos painéis solares instalados de 8,76 m², conforme abordado nos itens 2.3 e 3, conclui-se que a produção de energia elétrica fotovoltaica na unidade estudada possui média de 0,88 kWh/m²/dia. Sua variação média mensal pode ser observada na Fig. 3.

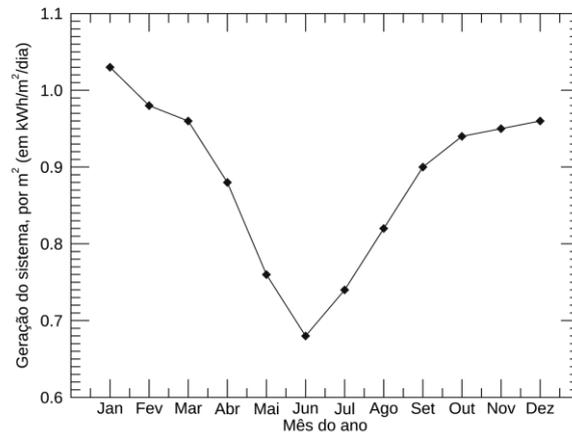


Figura 3 – Média mensal de produção diária de energia elétrica fotovoltaica em função da área dos painéis solares na unidade residencial estudada.

Já na Fig. 4 apresentamos a correlação entre a produção mensal (valores médios, por m², por dia) do sistema fotovoltaico da unidade geradora com os valores médios medidos da irradiação global no plano horizontal, em Ilhéus (ver Cerqueira e Gomes (2019) para detalhes sobre o tratamento dos dados da estação PCD). Neste gráfico, os pontos vermelhos são pares (x,y) = (H_{HOR}, P_q) (onde P_q, como vimos, é a produção do sistema e H_{HOR} é a irradiação global diária média recebida no plano horizontal), e a reta pontilhada é o ajuste (com R² = 0,98) obtido, dado pela Eq. 1:

$$Pq = 0,15 * H_{HOR} + 0,20 \tag{1}$$

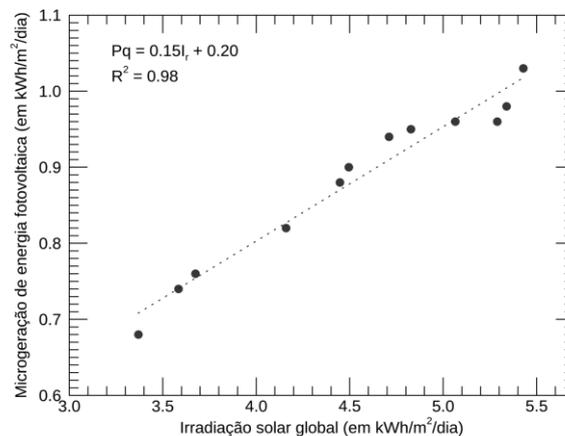


Figura 4 – Irradiação solar global recebida no plano horizontal versus microgeração de energia fotovoltaica.

Note que tanto P_q quanto H_{HOR} na Eq.1 foram medidos de forma independente (unidade de microgeração e estação PCD). Isto mostra que a produção do sistema de placas instalada em um determinado posicionamento (levaremos em consideração tanto sua inclinação quanto direção com relação ao norte, a seguir) correlaciona-se com a irradiação global média recebida, por m², por dia, em Ilhéus. Por outro lado, podemos assumir que a área de painéis solares do sistema instalado irá produzir uma quantidade de energia que é diretamente proporcional à energia média recebida (na superfície inclinada, ou H_{INC}):

$$Pq = e_f * H_{INC} = \sim 0,88 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} \tag{2}$$

Onde P_q é produção de energia fotovoltaica (já mencionada; medida na unidade microgeradora), diária, por área do painel solar (kWh/m²/dia), e_f = 0,15 é o produto entre a eficiência nominal das placas (15,4%) e a do inversor (97%), e H_{INC} a irradiação recebida na superfície inclinada das placas. Das equações (1) e (2), podemos obter um valor médio

para a irradiação recebida no plano horizontal (outra forma de obter este valor é graficamente, através da Fig. 4, simplesmente buscando no eixo x o valor correspondente a $y = 0,88 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$):

$$0,88 = 0,15 * H_{HOR} + 0,20 \Rightarrow H_{HOR} = (0,88 - 0,20)/0,15 = 4,53 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} \quad (3)$$

O valor médio inferido para a irradiação global em uma superfície horizontal (Eq. 3) é, portanto, exatamente o valor médio da irradiação média global obtida para Ilhéus (no período de 2001 a 2016) usando os dados da PCD (ver Cerqueira e Gomes, 2019). Este fato era esperado, pois partimos dos valores médios mensais de H_{HOR} para obter a correlação da Eq. 1, e estas variáveis correlacionam-se fortemente, como vimos ($R^2 = 0,98$). Por outro lado, a Eq. 3 também nos permite estimar o valor diário da energia, por m^2 , recebida pelas placas inclinadas da usina microgeradora. Assumindo uma eficiência de 15,4% para as placas e 97% para o inversor (usamos os dados fornecidos pelo fabricante, como eficiências máximas possíveis), obtemos:

$$H_{INC} = Pq/e_f \approx 5,92 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} \quad (4)$$

Assim, definimos um quociente entre este valor médio da irradiação e o valor da irradiação no topo da atmosfera ($H_{INC,0}$; calculado através de modelo; ver Cerqueira e Gomes, 2019), ambos no plano inclinado, como:

$$K_{TSI} = H_{INC}/H_{INC,0} = 5,92/9,71 = 0,60 \quad (5)$$

Com este *índice de claridade para superfícies inclinadas*, podemos simular ao longo de um ano os valores diários (e mensais) esperados para a irradiação em solo, dada a disposição real das placas na unidade de microgeração. A rigor este índice não é equivalente ao *índice de claridade*, comumente definido como a razão entre a irradiação que chega em solo e aquela calculada para o topo da atmosfera, ambas para uma superfície horizontal. No índice K_{TSI} , embutimos a contribuição do albedo terrestre ao inferir a irradiação responsável pela produção da unidade microgeradora (Eq. 4) que possui painéis inclinados. O albedo terrestre é importante, sobretudo, na região nordeste do país (Pereira *et al.* 2006), e é uma contribuição à radiação global que existe apenas no plano inclinado. A radiação difusa recebida por um plano inclinado é também distinta daquela da superfície horizontal. Este índice de claridade para superfícies inclinadas é útil, também, no caso de análise de unidades de microgeração distintas, mesmo que tenham diferentes inclinações de placas, desde que próximas uma da outra. Como o índice K_{TSI} remove a dependência angular (quanto a azimute e inclinação das placas; já que mimetiza-se a mesma geometria na ausência da atmosfera, no cálculo da componente extraterrestre), é mais apropriado para o estudo de sistemas fotovoltaicos. Engerer e Mills (2014) definiram um índice similar, mas normalizado pelas intensidades de “céu claro” (ao invés da componente extraterrestre), para também estimar a irradiação a partir de dados extraídos de sistemas fotovoltaicos. Eles mostraram que mesmo unidades microgeradoras distintas, para as mesmas condições de céu claro, possuem índice igual a 1 ao longo de todo o dia de céu claro (o índice, como dissemos, é normalizado a 1 para céu mais transparente possível), e qualquer desvio deste valor seria causado única e exclusivamente por sombreamento e/ou problemas/falhas no sistema de geração. Por este motivo usaremos o índice de claridade para a superfície inclinada (K_{TSI}), definido pela Eq. 5, ao invés do índice de claridade obtido (e conhecido, para Ilhéus) para a superfície plana (e.g., Cerqueira e Gomes, 2019).

Na Fig. 5 mostramos o resultado do modelo numérico (isto é, a partir do cálculo da irradiação no topo da atmosfera, com a geometria especificada de inclinação e azimute para as áreas receptoras, e *degradando* o resultado pelo índice de claridade para obter, finalmente, a previsão para o que recebemos em solo, conforme Cerqueira e Gomes (2019), para cada dia do ano, da irradiação nas placas voltadas para o norte, para o oeste, e para o sistema híbrido; isto é, metade das placas voltadas para o oeste, e metade para o norte; como na unidade em consideração). Os valores médios esperados estão também representados na Fig. 5. Note que o valor médio obtido para o sistema híbrido, de $5,90 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, é muito próximo do valor medido (ou inferido) dos dados da unidade de microgeração (Eq. 4). Isto mostra que modelos simples, baseados apenas no conhecimento da radiação que chega no topo da atmosfera, a geometria de disposição das placas e uma avaliação para o valor do índice de claridade médio, é capaz de produzir uma boa previsão do comportamento médio do sistema. Por outro lado, o mapa da irradiação no plano inclinado apresentado em Pereira *et al.* (2006), projeto SWERA, indica valores em torno de $H_{INC} = 5,5,20 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ para a região de Ilhéus. Para obtermos os valores médios de produção da unidade em consideração, teríamos que admitir uma alta eficiência de 17% a 19% para o sistema.

Na Fig. 6 apresentamos o valor médio para cada mês do ano de irradiação no plano inclinado obtido através dos dados do inversor, e usando a Eq. 4 para cada dia do mês em consideração, assim como os valores obtidos através do modelo numérico, que considera a média mensal do índice de claridade para a superfície inclinada (Eq. 5). Note que o modelo reproduz bem os dados medidos no período de agosto a dezembro, e diverge em aproximadamente 10% (máximo de divergência observada) dos valores em Janeiro e Junho.

Podemos avaliar, ainda, a energia elétrica fotovoltaica gerada por um sistema de microgeração na área em estudo através da relação da Eq.6:

$$Pd = (P_w * Pq) / M_p \quad (6)$$

Onde: P_d = produção de energia elétrica fotovoltaica diária (kWh/dia), P_w = potência da unidade de microgeração de energia elétrica fotovoltaica (W), P_q = produção de energia elétrica fotovoltaica diária por área de painel solar (kWh/m²/dia), M_p = potência por m² do painel solar a ser utilizado (W).

Por sua vez, tendo em vista o dimensionamento da potência da unidade de microgeração utilizamos a relação da Eq. 7:

$$P_w = (P_d * M_p) / P_q \quad (7)$$

Neste contexto, e com a utilização da Eq. 7, o gráfico da Fig. 7 sintetiza, com os dados da área em estudo, a relação entre a irradiância solar global na superfície horizontal e a produção de energia elétrica fotovoltaica em diferentes configurações de potência. Observa-se, ainda, as diferentes faixas de produção de energia em virtude da diferença de irradiância solar global nas 4 estações do ano.

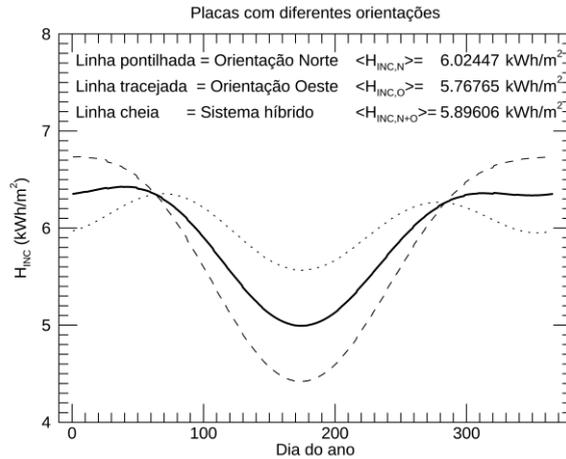


Figura 5 – Irradiação solar global recebida no plano inclinado, inferida a partir de modelos para diferentes orientações de placas, em função do dia do ano (1 = 31 de Janeiro; 365 = 31 de Dezembro).

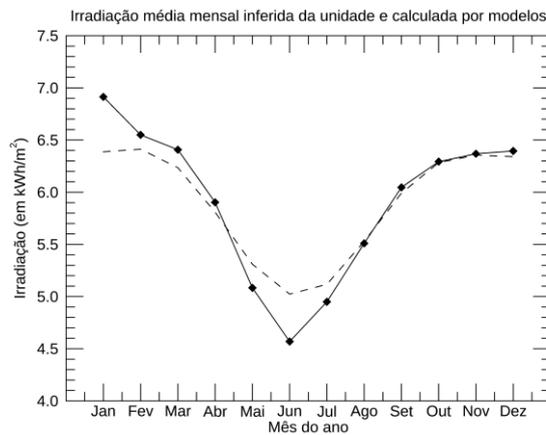


Figura 6 – Média mensal de irradiância no plano inclinado obtido através dos dados do inversor (linha cheia) e do modelo numérico adotado (linha pontilhada).

4.2 Quanto ao balanço produção, consumo e injeção na rede pública.

Para o entendimento do balanço produção consumo de energia elétrica na unidade residencial estudada torna-se importante o entendimento das características da demanda energética da unidade consumidora. Este consumo atende a demanda de uma carga instalada de 7.143 W, definida pela utilização de aparelhos e equipamentos eletroeletrônicos, conforme apresentados na Tab. 2.

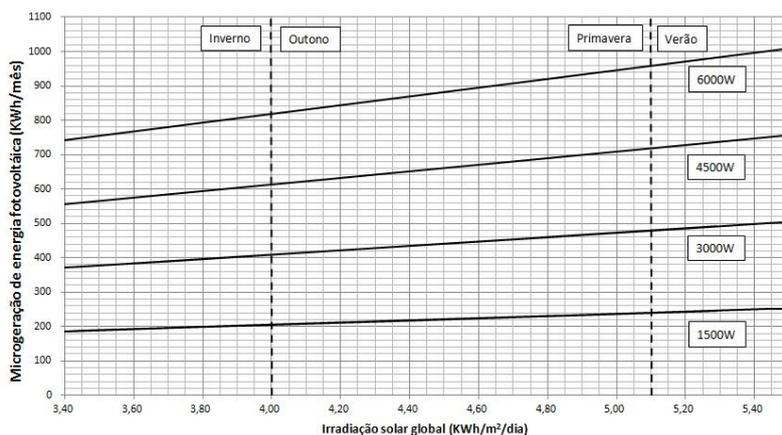


Figura 7 – Média mensal de produção diária de energia elétrica fotovoltaica em função da área dos painéis solares na unidade residencial estudada.

Tabela 2 – Síntese do consumo de aparelhos e equipamentos eletroeletrônicos na unidade residencial estudada.

Eletrodoméstico	Potência (W)	Quantidade	Potência Total (W)	Uso diurno (h/dia)	Uso noturno (h/dia)	Consumo diurno (KWh/mês)	Consumo noturno (KWh/mês)	Consumo total (KWh/mês)
Lâmpada fluorescente compacta	10	4	40	0	12	0	14,4	14,4
Lâmpada fluorescente compacta	10	6	60	0	6	0	10,8	10,8
Lâmpada fluorescente compacta	10	8	80	0	1	0	2,4	2,4
Boiler	1000	1	1000	1	0,5	30	15	45
Forno micro-ondas	1200	1	1200	0,1	0,1	3,6	3,6	7,2
Aspirador de pó residencial	750	1	750	0,02	0	0,45	0	0,45
Máquina de lavar	400	1	400	0,5	0	6	0	6
Liquidificador	320	1	320	0,02	0	0,192	0	0,192
Ferro de passar roupas	1000	1	1000	0,2	0	6	0	6
Fogão comum c/ acendedor elétrico	90	1	90	0,01	0,01	0,027	0,027	0,054
Geladeira frost-free	110	1	110	10	10	33	33	66
Torradeira elétrica	1000	1	1000	0,02	0,02	0,6	0,6	1,2
Televisor maior que 20 polegadas	120	1	120	1	6	3,6	21,6	25,2
Computador	60	1	60	1	1	1,8	1,8	3,6
Impressora Jato de Tinta	10	1	10	0,02	0	0,006	0	0,006
Rádio relógio	3	1	3	12	12	1,08	1,08	2,16
Ar condicionados tipo split de 9.000 BTU	900	1	900	1	6	27	162	189
Total			7143			113,35	266,30	379,66

Nesse sentido, conforme exposto no gráfico da Fig. 8, a média anual de consumo de energia elétrica foi de cerca de 310 kWh/mês, com os meses de novembro a abril apresentando valores de acima da média e o período de maio a outubro abaixo da média. Quando avaliamos a diferença média de consumo entre estes dois períodos tem-se o cenário em que os meses mais quentes consomem cerca de 100 kWh/mês a mais em média em virtude, principalmente, do uso de aparelhos de ar condicionado na unidade residencial estudada.

Conforme exposto nas Fig. 2 e 8, a produção média de energia elétrica fotovoltaica na unidade estudada é de cerca de 235 kWh/mês, o que atende e representa cerca de 76% da demanda de energia elétrica, que é de 310 kWh/mês.

Ressalta-se que, destes 235 kWh/mês em média gerados pelo sistema de microgeração fotovoltaica, cerca de 108 kWh/mês são consumidos na própria residência (autoconsumo) em virtude da utilização de aparelhos eletrodomésticos durante o dia, o que representa 46% da produção fotovoltaica. Tal valor é coerente com os dados da Tab. 2 em que se estima o consumo dos aparelhos durante o dia e a noite. Nota-se que 42% do consumo de energia elétrica da unidade residencial estudada ocorre no período diurno.

Nesse cenário, depreende-se ainda do gráfico da Fig. 8, que a média mensal de energia elétrica fotovoltaica que não foi consumida na residência e, portanto, injetada na rede pública, foi de 127 kWh/mês, o que representa 54% do total gerado pelo microgerador fotovoltaico.

Por sua vez, o consumo de energia elétrica proveniente da rede pública possui valor médio mensal de 200 kWh/mês, utilizado para o atendimento da demanda noturna de energia elétrica e para suprir os 24% de déficit entre a demanda total de energia elétrica da residência (310 kWh/mês) com o gerado pela microgeração (235 kWh/mês).

Do exposto, o balanço produção-consumo de energia elétrica da unidade residencial estudada, ou seja, o balanço entre o que foi consumido de energia elétrica proveniente da rede pública com o que foi injetado nela apresenta o cenário em que, apesar da instalação da unidade de microgeração, são utilizados em média 74 kWh/mês de energia elétrica da rede pública. Tal fato é esperado em virtude de que a unidade de microgeração não foi dimensionada para atender a 100% da demanda de energia elétrica. Por outro lado, estes 74 kWh/mês a serem consumidos com a utilização da rede pública representam apenas cerca de 24% da demanda total de energia elétrica da residência.

Com relação aos aspectos da quantidade de energia elétrica a ser cobrada e faturada pela concessionária de energia e, considerando que o sistema instalado na residência é do tipo trifásico, com consumo mínimo mensal de 100 kWh, tem-se o cenário em que quando analisado o comportamento do balanço entre a energia elétrica consumida na unidade residencial proveniente da rede pública com a injetada, nos 36 meses estudados (Fig. 9), em 1/3 dos meses estudados, meses de verão, a quantidade de energia a ser faturada superou a quantidade mínima de 100 kWh/mês.

Quando comparamos a demanda total de energia elétrica da unidade residencial com a quantidade a ser faturada da energia utilizada tem-se o cenário em que a economia exercida no valor da conta de luz a ser paga variou, nos 36 meses estudados, de 48 a 73%, com média de 63% (Fig. 10). Além disso, observa-se ainda na Fig. 10 que o aumento de consumo de energia elétrica é acompanhado pelo aumento de economia proporcionada pela microgeração até cerca de 360 kWh/mês. Além desse patamar de consumo a economia tende a diminuir em virtude da potência insuficiente do microgerador instalado, visto que, conforme descrito anteriormente, este foi dimensionado para o atendimento a 75% da demanda da unidade residencial.

Por fim, de forma geral e sem a pretensão de realizar estudos econômicos e financeiros detalhados a respeito da amortização do investimento realizado na implantação da unidade de microgeração, e considerando apenas os valores de R\$/kWh no período estudado, a Fig. 9 apresenta o acumulado em porcentagem da parcela amortizada, em virtude da economia de recursos quando do pagamento das contas de energia elétrica. Ou seja, a economia gerada nos 36 meses de funcionamento da unidade microgeradora proporcionou a amortização de 43% do investimento para sua implantação.

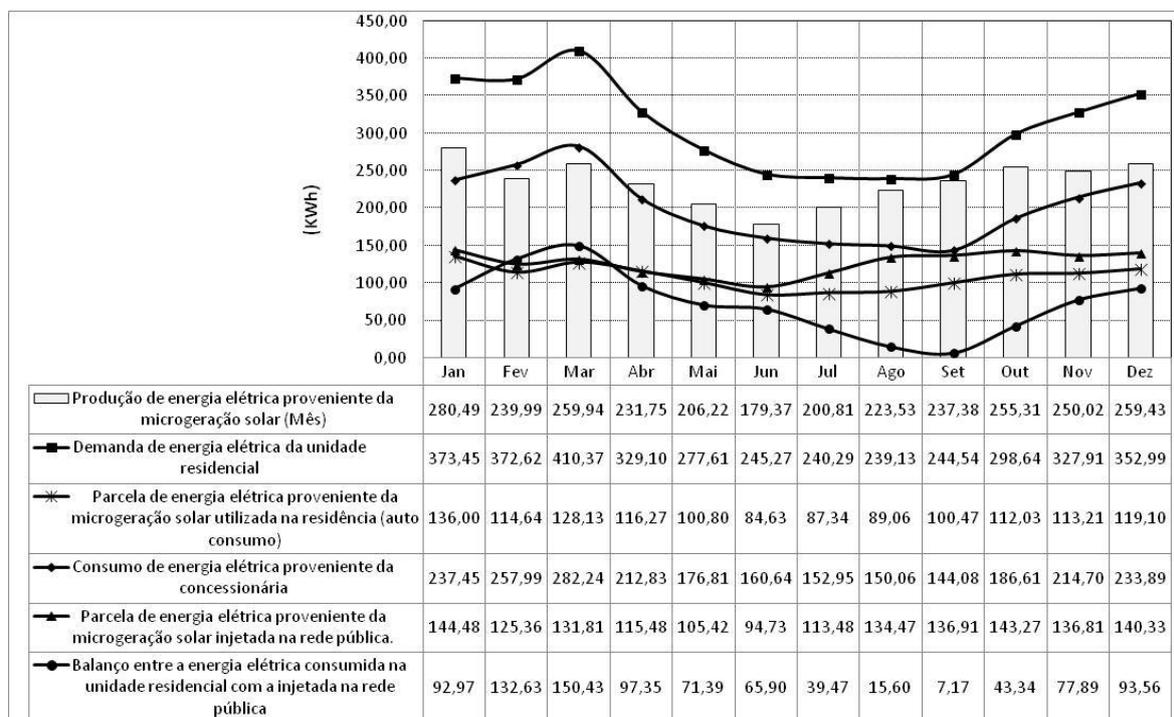


Figura 8 – Média mensal dos indicadores para o balanço produção-consumo de energia elétrica da unidade de microgeração estudada.

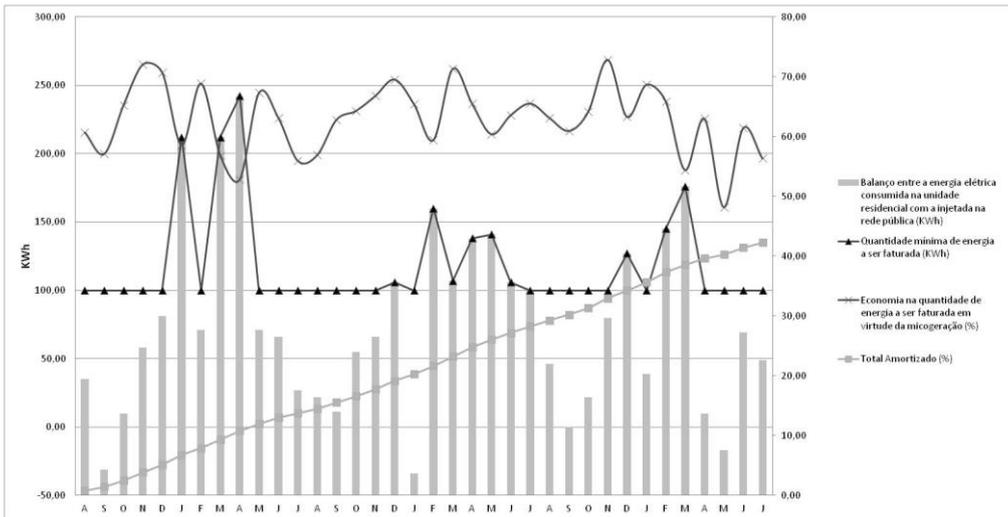


Figura 9 – Parcela de energia elétrica injetada na rede pública, a parcela faturada pela concessionária de energia e a economia proporcionada pelo sistema de microgeração instalado em seus 36 meses de funcionamento.

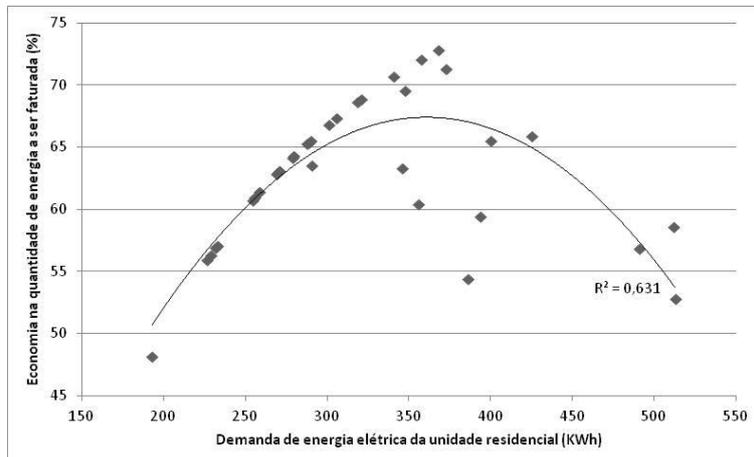


Figura 10 - Gráfico de comparação entre a demanda de consumo de energia elétrica da unidade residencial com a parcela de economia proporcionada pela microgeração na fatura de energia elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados avaliados neste trabalho referem-se ao período de três anos de funcionamento de uma unidade de microgeração de energia elétrica fotovoltaica instalada em uma residência localizada no Sul da Bahia.

De forma geral, na área em estudo incide irradiação solar global na superfície horizontal da ordem de 4,53 kWh/m²/dia e, para as inclinações envolvidas, da ordem de 5,92 kWh/m²/dia. Este montante é captado por 8,76m² de painéis solares com eficiência energética de 15,4%, e correlaciona-se muito bem com a irradiação global que atinge uma superfície horizontal (em Ilhéus). Esta configuração foi responsável, no período estudado, pela produção de 8,5 MWh de energia elétrica. No mesmo período, a demanda de energia elétrica da residência foi de 11,2 MWh. Dessa forma, a diferença no balanço produção-consumo foi suprida pelo fornecimento de energia elétrica da rede pública que contabilizou 2,7 MWh. Ou seja, neste período a utilização de energia elétrica da rede pública foi responsável apenas por 24% da demanda total de energia elétrica da residência.

Fato interessante notado e medido foi a parcela do autoconsumo de energia elétrica fotovoltaica promovido por aparelhos eletrodomésticos da residência durante o dia. Dessa forma, antes de ser injetada na rede pública, 46% da energia elétrica produzida pelo sistema de microgeração abasteceu a demanda da residência. Nesse contexto o autoconsumo e a injeção de energia elétrica na rede pública promoveram uma economia média de 63% no valor da fatura mensal de energia. Esta economia de recurso proporciona uma taxa de amortização do investimento para a instalação e funcionamento deste sistema de microgeração da ordem de 14% ao ano, sendo necessários, portanto, 7 anos para o retorno do investimento.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual de Santa Cruz pelo financiamento e apoio para execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren201248_2.pdf>. Acesso em: 01 dezembro 2016.
- Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp>. Acesso em: agosto de 2018.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos da demanda de energia - 2050: nota técnica DEA 13/15**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/>. Acesso em: 05 janeiro de 2017.
- Cerqueira, A.H., Gomes, R.L. Análise histórica da irradiação global no município de Ilhéus/Ba. *Revista Brasileira de Energia Solar, (no prelo)*. 2019.
- Engerer, N.A., Mills F.P. 2014, in K_{PV} : **A clear-sky index for photovoltaics**, *Solar Energy*, 105, pp. 679-693
- Inpe. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – **SINDA, Sistema Integrado de Dados Espaciais**. Disponível em: <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico>. Acesso em 01/10/2018.
- Inpe. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – **Rede SONDA, Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em 01/12/2016.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. 1960, in The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, **Solar Energy**, V 4(3), pp. 1-19
- Myers D R. Practical modeling for renewable energy applications. **Solar Radiation**; 2013; CRC Press.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., DE Abreu, S.L. E Ruther, R. 2006, in **Altas Brasileiro de Energia Solar**, INPE.
- Pereira, Y. C., Autor A, R. L., Autor B, A. H. Análise de dados históricos de radiação solar acumulada coletados pela PCD de Ilhéus-BA. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA E I CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA, 2017, Anais, Campinas.

ASPECTS OF MICROGENERATION, CONSUMPTION AND PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL ENERGY: CASE STUDY IN A RESIDENCE IN THE SOUTH OF BAHIA, BRAZIL

Abstract: *This work aims to understand the dynamics of solar energy capture, its conversion into electric energy, its consumption by the residential generating unit and its injection share in the public network. For this, the method adopted will be used data collected in the last 3 years in a residential microgenerator located in the Ilhéus city, State of Bahia, Brazil. Initially, the data of electric energy production carried out by the solar microgeneration were organized, from data collected in the system inverter. These data were also useful to calculate the global solar irradiance that affects the study area. Then, from the data collected in the residence energy bills, it was possible to calculate the balance between the monthly consumption of electricity from the utility and the monthly electric energy from the solar microgeneration injected into the public grid. The obtained results indicate the scenario where, in the study area, global solar irradiation of the order of 5.92 kWh / m² / day (in the tilted surface), which when captured by the installed solar panels was responsible, in the studied period, for the production of 8.5 MWh of electricity. In the same period, the electric energy demand of the residence studied was 11.2 MWh. In this way, the difference in the production-consumption balance was supplied by the electricity supply of the public grid, which accounted for 2.7 MWh. During this period, the use of electricity from the public network accounted for 24% of the total electric energy demand of the residence, which resulted in an average savings of 63% in the monthly energy bill and an amortization rate of the investment for the installation and operation of this microgeneration system of the order of 14% per year.*

Key-words: solar microgeneration, Photovoltaic power, Ilhéus