



Application of the Measurement and Verification Methodology for Photovoltaic Systems to a Real Brazilian Case

Denise Melo, Luan Barbosa, Leonardo Oliveira, Janaína Oliveira,
Ângelo Oliveira and Ricardo Gomes

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

November 9, 2023

Aplicação da Metodologia de Medição e Verificação de Sistemas Fotovoltaicos a um Caso Real Brasileiro

Denise Sanches Melo* Luan Almeida Barbosa**
Leonardo Willer de Oliveira*** Janaína Gonçalves de Oliveira***
Ângelo Rocha de Oliveira**** Ricardo Oliveira Gomes**

* Departamento de Engenharia, Deode Inovação e Eficiência em Energia Ltda, MG, (e-mail: denise@deodenergia.com).

** Departamento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, Deode Inovação e Eficiência em Energia Ltda, MG, (e-mail: luan.barbosa@deodenergia.com; ricardo@deodenergia.com)

*** Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: leonardo.willer@ufjf.br; janaina.oliveira@ufjf.br)

**** Departamento de Eletroeletrônica, CEFET-MG Campus Leopoldina, MG, (e-mail: angelo@cefetmg.br)

Abstract:

Measurement and Verification campaigns are essential to assess the actual benefits of energy efficiency projects. In projects involving solar generation, solar irradiation is a crucial variable that impacts energy production. In this context, a methodology utilizing linear regression was employed to establish a baseline, enabling the normalization of solar irradiation prediction. This is particularly significant for long-term projects. The evaluation of the applied method in photovoltaic projects yielded satisfactory results, offering a promising alternative.

Resumo:

As campanhas de medição e verificação são fundamentais para avaliar os benefícios reais de projetos de eficiência energética. Em projetos com geração solar, a irradiação solar é uma variável crucial que influencia a produção de energia. Nesse contexto, foi utilizada uma metodologia com aplicação de regressão linear para estabelecer uma linha de base, permitindo a normalização da previsão de irradiação solar. Isso é especialmente importante para projetos de longo prazo. A avaliação do método aplicado em projetos fotovoltaicos apresentou resultados satisfatórios, fornecendo uma alternativa promissora.

Keywords: Measurement and Verification; Solar Radiation Forecast; Solar Energy

Palavras-chaves: Medição e Verificação; Previsão de Radiação Solar; Energia Solar

1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos resultados energéticos de projetos de eficiência energética (EE) envolve a análise de diversas variáveis que influenciam o consumo de energia, tornando necessária a aplicação de um modelo matemático para estimar o consumo da instalação antiga após a intervenção. No caso de projetos com sistemas de energia solar, é fundamental medir a geração obtida. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) utiliza o Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance (PIMVP) como base para a avaliação dos resultados energéticos, que descreve as melhores práticas para medir e verificar os resultados de projetos de EE (ANEEL, 2020).

A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa competitiva no fornecimento de energia, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa e para os compromissos nacionais de redução de emissões. A previsão da variável independente do processo de medição e

verificação de projetos com sistemas fotovoltaicos (SFV), a irradiação solar, é fundamental para a indicação da variação da energia (ANEEL, 2020).

O artigo apresenta uma metodologia com aplicação de métodos estatísticos na previsão da irradiação solar em projetos com sistemas fotovoltaicos, com foco na economia e precisão para acompanhamento dos resultados (Vieira, 2020). A proposta é aplicada em um caso real, localizado no estado de Goiás, utilizando dados de medição da geração solar real de doze meses e dados medidos obtidos do banco de dados histórico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Justo, 2013). O estudo proposto pode contribuir para a redução dos custos e para a melhoria da precisão na avaliação dos resultados energéticos de projetos de eficiência energética com sistemas fotovoltaicos (Tsukamoto et al., 2018).

O artigo está organizado da seguinte maneira: Na seção 2, será apresentada a metodologia proposta para medição e verificação em projetos com SFV, utilizando métodos

estatísticos para a previsão da variável independente, a irradiação solar. Na seção 3, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da simulação com a aplicação da metodologia proposta. E por último, na seção 4, serão exibidos os resultados também provenientes da aplicação dessa metodologia.

2. METODOLOGIA

2.1 Cálculo da Geração no Período de Previsão

São utilizados seis meses de dados de geração e de irradiação solar medidos pelo INMET para a modelagem, e uma análise de regressão é aplicada para explicar a variação da energia resultante das alterações nas variáveis independentes individuais. A equação (1) expressa a geração solar a partir da variação da variável independente irradiação solar, considerando os dados de monitoramento de seis meses da usina (Pereira et al., 2017).

$$\text{Geração} \left(\frac{kWh}{mês} \right) = b + a \times \text{IRRADIAÇÃO} \quad (1)$$

Onde: a é o coeficiente angular da regressão (para a variável independente); b é o coeficiente linear da regressão; e, $IRRADIAÇÃO$ é a variável independente obtida dos seis meses de medição do banco de dados do INMET.

Através da equação (1), é viável projetar os próximos seis meses de geração solar, utilizando dados mensais de irradiação como variável independente. Dessa forma, é possível completar os doze meses de geração de energia solar em sistemas fotovoltaicos.

2.2 Normalização da Geração

O plano de medição e verificação estabelece como será medida a geração solar em um projeto, sendo comum a opção B¹ - Isolação da AEE: medição de todos os parâmetros - da Tabela PIMVP para projetos de sistemas fotovoltaicos. Modelos matemáticos são usados para calcular a economia de energia, com recomendação para utilizar a "economia normalizada" com padrões estabelecidos. Para sistemas com variáveis independentes, como a irradiação solar, a média mínima dos últimos 10 anos é usada para definir as condições padrão em um ano típico. Para obter a geração "normalizada", é usada a equação (1) com dados mensais de geração e irradiação (ANEEL, 2012).

2.3 Aplicação das Métricas de Avaliação

Na análise de medição e verificação para determinar a economia na geração solar, a primeira métrica de avaliação é o processo de amostragem, que deve ter uma precisão de 10%. A equação (2) é utilizada para calcular a precisão obtida e o coeficiente de variação (cv), com base no tamanho da amostra e uma confiabilidade de 95%². Se a precisão não estiver dentro do limite desejado, a amostra

¹ No contexto de projetos de sistemas fotovoltaicos, é comum optar pela opção B de acordo com as diretrizes da PIMVP Conceitos Básicos (EVO, 2017).

² Conforme a elaboração do Plano de Medição e Verificação (ANEEL, 2014)

deve ser ampliada. O coeficiente de variação será igual o desvio padrão S dividido pela média \bar{X} obtido, para uma confiabilidade de 95% ($z = 1,96$).

$$e = \frac{z \times cv}{\sqrt{n_0}} \quad (2)$$

Onde: e é a precisão obtida; z é o valor padrão da distribuição normal (confiabilidade de 95%) = 1,96; cv é o coeficiente de variação das medidas; e , n_0 é o tamanho da amostra.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (3)$$

Onde: \bar{X} é a média das amostras; X_i é a amostra i ; e , n é o número de amostras.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

Onde: S é o desvio padrão das amostras; X_i é a amostra i ; \bar{X} é a média das amostras; e , n é o número de amostras.

Mesmo que a primeira condição de precisão das amostras não seja atendida em projetos com variáveis independentes, as mesmas fórmulas e condições para validação de incertezas podem ser aplicadas no modelo de regressão com informações de erro padrão e número de amostras. Em seguida, o modelo de regressão é validado na presença da variável independente. Três testes comuns são usados para avaliar o quão bem o modelo explica a relação entre o uso de energia e as variáveis independentes.

O coeficiente de determinação (R^2) é usado para avaliar a precisão de um modelo de regressão, medindo o quanto da variação da energia é explicada pelas variáveis independentes (Chiode, 2021).

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

Onde: \hat{Y}_i é o valor da energia previsto pelo modelo em um ponto dado pela medição do valor da variável independente (ou seja, obtido pela inserção dos valores de X no modelo de regressão); \bar{Y} é a média dos n valores medidos da energia; e , Y_i é o valor real medido da energia.

O erro padrão da estimativa $EP_{\hat{Y}}$ é usado para medir a precisão da predição do modelo para um conjunto de variáveis independentes (Baba et al., 2014).

$$\hat{Y} \pm t \times EP_{\hat{Y}} \quad (6)$$

Onde: \hat{Y} é o valor da energia previsto pelo modelo em um ponto dado pela medição do valor da variável independente (ou seja, obtido pela inserção dos valores de X no modelo de regressão); t é o valor obtido da estatística t de Student; e , $EP_{\hat{Y}}$ é o erro padrão da estimativa (predição).

O erro padrão da estimativa $EP_{\hat{Y}}$ é frequentemente chamado de erro médio quadrático (EMQ). Dividindo o EMQ

pela média do consumo de energia, podemos obter o coeficiente de variação do EMQ, também conhecido como CV (EMQ).

$$\hat{Y} \pm t \times EP_{\hat{Y}} = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n - p - 1}} \quad (7)$$

Onde: p é o número de variáveis independentes na equação de regressão.

A estatística t é um teste estatístico para determinar se uma estimativa tem significado estatístico. Segundo (EVO, 2014), uma regra empírica estabelece que se o valor absoluto da estatística t for maior que 2, significa que o coeficiente estimado é significativo em relação ao erro padrão. Entretanto, uma estatística t perto de 2 significa que a precisão do valor do coeficiente está em torno de $\pm 100\%$, o que pode gerar desconfiância no valor calculado.

3. RESULTADOS

O projeto está localizado na cidade de Goiânia, no estado de Goiás, sendo a unidade consumidora um prédio público de ensino superior, com regime de funcionamento com três turnos de aulas. A instalação do sistema aconteceu no telhado da instituição no ano de 2019. O projeto inicia-se com a definida a “Linha de Base”, consolidando o plano de medição e verificação. E com a implementação do projeto, inicia-se o acompanhamento e monitoramento da geração e irradiação solar por um período de doze meses, necessários para o fechamento da “determinação da economia”, no caso, da geração solar obtida.

Para simular a geração solar mensal e anual do projeto, foi usado o software PVsyst com dados físicos do projeto e dados de irradiação solar do CRESESB. Os dados de irradiação solar de Goiânia foram obtidos na Figura 1. Os dados do CRESESB da cidade de Goiânia - GO, envolvendo a localização geográfica da cidade e a irradiação solar diária média, encontram-se na Figura 1, obtidos de http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_17365

Tabela 1. Dados de Irradiação Solar no Plano Horizontal (Ano padrão).

Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]															
Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
16,701°S	49,249°O	2,4	5,5	5,5	5,1	5	4,8	4,6	4,8	5,7	5,6	5,6	5,4	5,5	5,25

A Tabela 1 apresenta dados de irradiação solar em formato médio diário mensal. Para obter a irradiação mensal total, é necessário multiplicar a média diária pelo número de dias de cada mês, conforme mostrado na coluna “GlobHor” da Figura 3.

O sistema fotovoltaico tem capacidade instalada de 39,6 kWp, e os resultados do software PVsyst, incluindo as características do sistema e os resultados esperados, são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.

Os resultados de desempenho do SFV são mostrados nas Figuras 2 e 3, juntamente com a previsão de geração solar mensal e anual. O SFV foi projetado para alcançar uma

PV Array Characteristics			
PV module	Generic	Inverter	Generic
Manufacturer	GCL-P6/72H-330	Manufacturer	SUN2000-33KTL-A
Model		Model	
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	330 Wp	Unit Nom. Power	30.0 kWac
Number of PV modules	120 units	Number of inverters	4 * MPPT 25% 1 units
Nominal (STC)	39.6 kWp	Total power	30.0 kWac
Modules	6 Strings x 20 In series	Operating voltage	200-1000 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (m=40°C)	33.0 kWac
Pmpp	35.8 kWp	Pnom ratio (DC/AC)	1.32
U mpp	678 V		
I mpp	53 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	40 kWp	Total power	30 kWac
Total	120 modules	Nb. of inverters	1 Unit
Module area	238 m ²	Pnom ratio	1.32
Cell area	218 m ²		

Figura 1. Características do SFV.

PR de 73,76%, com uma irradiação solar global no plano horizontal anual de 1914,8 kWh/m² e geração solar anual prevista de 56,28 MWh.

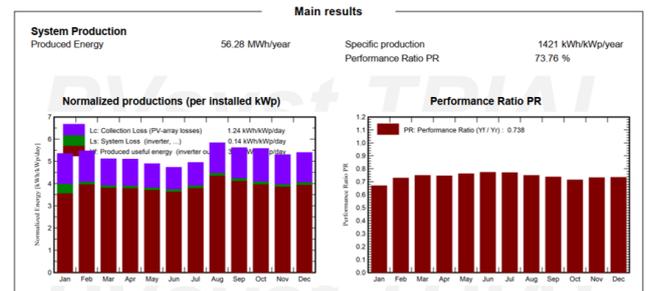


Figura 2. Resultado de desempenho – Linha de Base.

Balances and main results								
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	169.0	82.03	25.15	166.0	154.4	4.923	4.399	0.669
February	154.6	74.84	24.57	153.3	143.1	4.554	4.419	0.728
March	158.7	79.67	24.43	158.5	147.7	4.840	4.698	0.748
April	150.6	55.59	24.12	153.1	143.1	4.659	4.521	0.746
May	147.3	48.53	23.23	151.7	141.8	4.712	4.573	0.761
June	136.8	40.24	21.61	141.9	132.2	4.470	4.340	0.772
July	148.2	42.39	20.88	153.5	143.2	4.826	4.686	0.771
August	176.1	45.44	23.90	180.9	169.3	5.524	5.366	0.749
September	167.1	71.03	27.37	168.5	157.5	5.059	4.913	0.736
October	173.9	70.31	26.75	173.1	161.0	5.045	4.895	0.714
November	161.7	83.11	25.49	159.1	146.9	4.744	4.607	0.731
December	170.8	86.06	24.80	167.4	154.9	5.007	4.861	0.733
Year	1914.8	779.21	24.35	1926.9	1795.0	58.363	56.280	0.738

Figura 3. Resultado de irradiação e geração – Linha de Base.

No “Período de Linha de Base”, a irradiação solar foi identificada como a variável independente através da análise de regressão. Os resultados foram validados seguindo os critérios estabelecidos, embora o R² tenha sido inferior a 0,75. Apesar disso, a sugestão é continuar com a validação da regressão para o “período de determinação da economia”.

Tabela 2. Regressão linear (geração estimada PVsyst x irradiação solar).

Coefficiente angular da regressão (a)	16,33	m ² /mês
Coefficiente linear da regressão (b)	2.083,72	kWh/mês
Estatística t	3.08	
Coefficiente de determinação (R ²)	49%	
Coefficiente de Variação do Erro Médio Quadrático (CV (EMQ))	4.60%	
Incertezas	9,02%	

Foi determinada uma incerteza de 9,02%, atingindo a meta de 10% de precisão com 95% de confiabilidade. Isso

significa que a faixa definida por $\pm 10\%$ em torno da média contém o valor verdadeiro com probabilidade de 95%.

A entrada de energia da concessionária foi considerada como fronteira de medição para os períodos da linha de base, juntamente com a irradiação solar mês. Para o período de determinação da economia, foi considerado o uso de medições dos inversores do sistema e de um sistema de monitoramento com memória de massa. Os medidores de energia instalados junto aos inversores são equipamentos CCK4400ME (Silva et al., 2009). Os possíveis efeitos interativos com o sistema fotovoltaico foram ignorados na avaliação dos benefícios, mas foram monitorados após a implementação do projeto.

Possíveis efeitos estáticos, como sombreamento nos painéis e mudanças no perfil de utilização, foram avaliados e monitorados durante as medições do projeto. Também foi observado que a concessionária de energia deve manter o fornecimento de energia para que haja geração fotovoltaica, já que os inversores só operam com o sistema energizado. O monitoramento da geração de energia começou logo após a instalação do SFV em setembro de 2020 e durou um ano. Os dados foram armazenados para determinar a quantidade de energia injetada na rede. A quantidade de energia gerada foi baseada na irradiação solar do CRESESB.

Os dados de geração e irradiação solar extraídos do SFV e do INMET, respectivamente, estão na Tabela 3. Comparando com os dados estimados na linha de base na Figura 5.6, a geração solar foi 10,21% maior e a irradiação solar foi 4,39% maior.

Tabela 3. Registro da geração e irradiação.

Ano	Mês	Dados Medidos	
		kWh	Irradiação Solar ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mês}$)
2020	set	4.594,82	168,14
2020	out	4.039,13	156,21
2020	nov	4.761,57	176,44
2020	dez	4.648,02	170,43
2021	jan	4.714,59	166,07
2021	fev	3.859,75	134,56
2021	mar	4.400,10	144,80
2021	abr	4.013,19	150,42
2021	mai	3.918,85	138,88
2021	jun	3.590,09	124,20
2021	jul	3.924,16	141,98
2021	ago	4.069,44	158,72
Total		50.533,71	1.830,84

Para a irradiação solar medida, a base de dados utilizada foi extraída da base de dados do INMET da estação A225, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Dados da Estação Meteorológica.

Região:	CO
UF:	GO
Estação:	GOIÂNIA
Código(WMO):	A002
Latitude:	-16.642777777
Longitude:	-49.21999999
Altitude:	770
Data de Fundação	29/05/2001

A Figura 4 é o representativo dos dados da Tabela 3, com a irradiação e geração de acordo com os meses e anos.

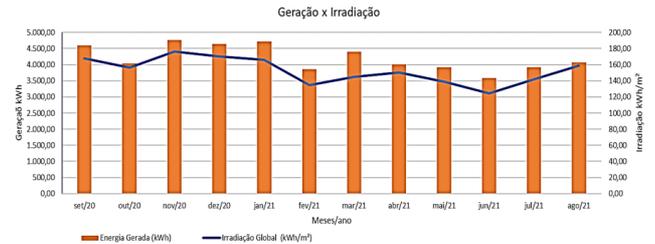


Figura 4. Regressão linear (geração x irradiação).

Para construir a linha de base, o projeto considerou uma variável independente baseada na regressão linear entre a geração simulada e a irradiação solar do CRESESB. Durante a fase de monitoramento, os dados reais foram usados para validar a correlação entre a geração medida e a irradiação solar registrada pelo INMET. Os resultados da validação mostraram que o R^2 foi de 80,7%, o CV(EMQ) foi de 4,98% e a estatística t foi de 6,46, indicando uma correlação forte. Esses resultados estão na Tabela 3.

Tabela 5. Regressão linear (geração medida x irradiação solar INMET).

Coefficiente angular da regressão (a)	21,75	$\text{m}^2/\text{mês}$
Coefficiente linear da regressão (b)	892,93	$\text{kWh}/\text{mês}$
Estatística t	6,27	
Coefficiente de determinação (R^2)	80%	
Coefficiente de Variação do Erro Médio Quadrático (CV (EMQ))	4.41%	
Incertezas	9,82%	

Com base na Tabela 5, foi possível construir a equação (1), que permite imputar valores de irradiação solar mensal para aproximar as condições de geração de energia durante um ano médio, em vez de se basear apenas nos dados de um único ano de monitoramento. Os dados do CRESESB foram usados para construir tanto a linha de base quanto as simulações finais do projeto.

O ano padrão para as condições de irradiação solar foi baseado nos dados do CRESESB, conforme aplicado em um caso anterior. A Tabela 6 apresenta a análise final dos resultados do projeto, mostrando que a energia gerada anual normalizada foi de 52.359,68 MWh/ano. A diferença entre a geração anual normalizada e a geração real foi de 3,49%, enquanto a diferença em relação às condições da linha de base foi de 6,97%.

Tabela 6. Determinação dos Resultados de Geração “Normalizada” .

Meses/Ano	Geração Solar (kWh) Normalizada
set/20	4.568,47
out/20	4.255,29
nov/20	4.344,46
dez/20	4.168,29
jan/21	4.096,52
fev/21	3.868,16
mar/21	4.116,10
abr/21	4.722,89
mai/21	4.527,15
jun/21	4.675,04
jul/21	4.409,70
ago/21	4.607,62
Soma	52.359,68

4. CONCLUSÃO

O artigo mostra que a utilização de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica requer um monitoramento cuidadoso e uma análise rigorosa dos dados gerados. É necessário estabelecer uma linha de base para a geração de energia e validar as correlações entre a geração de energia e a irradiação solar, a fim de determinar com precisão a quantidade de energia gerada em condições ideais. Além disso, é importante estabelecer um ano padrão para as condições de irradiação solar e utilizar esse padrão para avaliar a geração de energia ao longo do tempo.

Os resultados devem ser comparados com a geração real para determinar a precisão do sistema de monitoramento e validação. Com as informações corretas em mãos, os operadores do SFV podem fazer ajustes e melhorias para aumentar ainda mais a eficiência do sistema de geração de energia.

A avaliação final dos resultados apresenta uma produção anual normalizada de energia de 52.359,68 MWh/ano. A comparação com a produção real de 50.533,71 MWh/ano revela uma variação de apenas 3,49%, ou seja, obedecendo o valor de incertezas na faixa de $\pm 10\%$, indicando que tanto o período de referência quanto o de avaliação da geração solar foram mantidos em condições semelhantes. Adicionalmente, a diferença na produção anual chega a 6,97% em relação às condições da linha de base. Esses dados ressaltam a eficácia do estudo ao demonstrar um desvio mínimo em relação aos valores esperados e às condições base estabelecidas. Isso reforça a confiabilidade das análises realizadas no projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação e Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) pelo seu apoio técnico/financeiro.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2012). Aneel – agência nacional de energia elétrica - resolução normativa nº 482, de 17 de abril

de 2012. estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

ANEEL (2014). Aneel – agência nacional de energia elétrica – guia de m&v.

ANEEL (2020). Aneel – agência nacional de energia elétrica - procedimentos do programa de eficiência energética – propee. 10 Módulos.

Baba, R.K., Vaz, M.S.M.G., and Costa, J.d. (2014). Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 515–526.

Chiode, A.d.S. (2021). *Avaliação de propostas de coeficientes de determinação do tipo R^2 em modelos de regressão logística com resposta nominal*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.

EVO (2014). Evo – efficiency valuation organization. protocolo internacional de medição e verificação de performance – estatística e incerteza para o pmimvp - ev 10100 - 1:2014 (br). evo, junho de 2014.

EVO (2017). Evo - efficiency valuation organization. conceitos básicos - protocolo internacional de medição e verificação de performance - evo 10000 - 1:2016 (br). evo, setembro 2017.

Justo, R.E.d.B. (2013). *Implementação de um plano de medição e verificação de eficiência energética num edifício de serviços*. Ph.D. thesis.

Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.d., Rütther, R., Abreu, S.d., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., and Souza, J.d. (2017). Atlas brasileiro de energia solar. *São José dos Campos: Inpe*, 1.

Silva, G.M.d. et al. (2009). Sistemas de apoio à medição e verificação do desempenho energético.

Tsukamoto, D.B. et al. (2018). Projeto de microssina solar fotovoltaica a ser implantada na universidade federal de uberlândia no contexto do programa de eficiência energética das concessionárias de energia elétrica.

Vieira, D. (2020). A usina fotovoltaica como instrumento da eficiência energética.