



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**ARTHUR DE PAULA MELO**

**ESTUDO DO IMPACTO NO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO EM GERADORES  
FOTOVOLTAICAS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO MICROINVERSORES E  
INVERSORES *STRING***

Uberlândia

2019



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**ARTHUR DE PAULA MELO**

**ESTUDO DO IMPACTO NO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO EM  
GERADORES FOTOVOLTAICAS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO  
MICROINVERSORES E INVERSORES *STRING***

Trabalho apresentado no formato de artigo, como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica - Certificado de Estudos em Engenharia de Automação e Controle da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia

2019

**ARTHUR DE PAULA MELO**

**ESTUDO DO IMPACTO NO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO  
EM GERADORES FOTOVOTAICAS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO  
MICROINVERSORES E INVERSORES *STRING***

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica - Certificado de Estudos em Engenharia de Automação e Controle da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima  
Universidade Federal de Uberlândia

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por todo apoio que me deram durante todos esses anos, ao professor Dr. Luiz Carlos Gomes Freitas e a Juliana do Santos Ribeiro, ambos me motivaram e ajudaram, e agradeço também a oportunidade que a Universidade Federal de Uberlândia me propiciou de adquirir conhecimento, momentos únicos e amizades, muito obrigado a todos.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é discutir a utilização dos microinversores em geradores fotovoltaicos distribuídos, analisando sua performance em relação ao inversor *string* a fim de avaliar seu desempenho no que tange a produtividade energética e, por consequência, na redução de perdas descasamento ou *mismatch* de módulos fotovoltaicos. Os resultados reportados neste trabalho foram obtidos com base em simulações computacionais realizadas com o *software* PVsyst (versão TRIAL), os quais foram confrontados com os dados práticos de produtividade energética obtidos em instalações localizadas na cidade de Uberlândia. Os resultados obtidos demonstram que, conforme esperado, em instalações sujeitas a sombreamentos parciais, a aplicação dos microinversores se mostra mais indicada, entretanto, em locais que os módulos fotovoltaicos são instalados com o mesmo ângulo azimutal e ângulo de inclinação, e não estão sujeitos a sombreamentos parciais, o inversor *string* apresenta melhor desempenho.

Palavras-Chave - Microinversor, inversor string, produtividade energética.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to discuss the use of microinverters in distributed photovoltaic generators, analyzing their performance in relation to the string inverter in order to evaluate their performance with regard to energy productivity and, consequently, in the reduction of mismatch losses of photovoltaic modules. The results reported in this work were obtained based on computational simulations performed with PVsyst software (TRIAL version), which were compared with the practical energy productivity data obtained from facilities located in the city of Uberlândia. The results show that, as expected, in installations subjected to partial shading, the application of microinverters is better, however, in places where the photovoltaic modules are installed with the same azimuthal angle and tilt angle, and are not subject to partial shading, the string inverter has better performance.

Keywords - Microinverter, string inverter, yield energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de posicionamento e instalação dos módulos na UFV 1.....	15
Figura 2: Comparativo de desempenho das configurações apresentadas.....	20
Figura 3: Produção energética dos sistemas apresentados.....	20
Figura 4: Esquema de posicionamento e instalação dos módulos da UFV 2.....	21
Figura 5: Energia gerada no período de nove meses na UFV 2. ....	23
Figura 6: Fluxo de caixa da UFV 1, para sistema com inversor string e micro.....	26
Figura 7: Fluxo de caixa da UFV 2, para sistema com inversor string e micro.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de performance e energia gerada na UFV 1 .....	18
Tabela 2: Características do sistema UFV 1.....	16
Tabela 3: Irradiação recebida na UFV-1 em kWh/m <sup>2</sup> (Fonte: INPE/SWERA).....	17
Tabela 4: Simulações do sistema com aplicação de microinversores. ....	18
Tabela 5: Simulação do sistema com aplicação do inversor string.....	19
Tabela 6: Dados coletados no período de 2015 a 2018. ....	19
Tabela 7: Características do sistema UFV 2.....	22
Tabela 8: Simulação da UFV 2 com aplicação de microinversores. ....	24
Tabela 9: Simulação da UFV 2 com aplicação do inversor string.....	25
Tabela 10: Comparação dos índices de desempenho (PR) .....	23
Tabela 11: Simulações das UFVs no primeiro ano de operação. ....	25

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	OBJETIVOS.....	11
3.	METODOLOGIA .....	12
4.	ESTADO DA ARTE .....	13
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	15
6.	CONCLUSÕES .....	25
7.	REFERÊNCIAS .....	28

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através da resolução normativa nº 482/2012, regulamenta a conexão das usinas fotovoltaicas (UFVs) no sistema elétrico brasileiro. Essa resolução foi um marco importante para a expansão dos sistemas fotovoltaicos (FVs) no país. Graças a ela houve uma maior consistência na propagação de energia solar, com a abertura de linhas de créditos para a instalação de sistemas residenciais e comerciais, a possibilidade de ingresso em leilões de energia, juntamente com um barateamento dos módulos solares e inversores (ANEEL, 2012).

O relatório final de balanço energético de 2018, publicado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia), afirma que a geração de energia solar tem uma participação de menos de 1% de toda a geração energética interna brasileira, demonstrando que a utilização desta fonte energética no Brasil ainda tem grande espaço para crescimento (BRASIL, 2018).

É notável a possibilidade de crescimento dos sistemas FVs, sendo que há a expectativa de que se tenha uma maior potência instalada, e que eles sejam, por sua vez, cada vez mais eficientes. A eficiência dos sistemas FVs pode ser melhorada por meio de pesquisas que aumentem o rendimento da conversão da energia solar em elétrica, diminuindo perdas térmicas ou melhorando a eficiência dos inversores de potência, que são os responsáveis pela conversão da energia solar em energia solar gerada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). Os inversores são capazes de transformar uma onda CC, gerada pelo arranjo fotovoltaico, em uma onda CA, fazendo com que seja possível injetar a potência elétrica na rede de distribuição.

Atualmente, são largamente utilizadas duas opções de inversores: string (dividido em inversores centrais e inversores multi-strings) e microinversores. Os inversores string exigem que os módulos FV estejam conectados em série para atingir o nível mínimo de tensão para operação do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Essa configuração resulta em strings com altos níveis de tensão CC e sensíveis a efeitos de sombreamentos, pois, devido ao diodo de *by-pass*, a string perde parte da capacidade

de geração quando um módulo é sombreado, alterando o ponto de operação do MPPT e prejudicando seu desempenho como um todo (GODOI, 2018).

Já no caso do microinversor, os módulos são ligados individualmente em cada MPPT, já que ele opera com potência em níveis menores. Isso faz com que o sistema seja menos sensível a efeitos de sombreamento: quando o fenômeno ocorre, o diodo de *by-pass* atua sem atrapalhar o desempenho de outros módulos (GODOI, 2018).

Na literatura técnica especializada é possível encontrar alguns trabalhos reportando estudos de eficiência de vários tipos de inversores solares Famoso et al. (2015). O presente trabalho busca seguir a mesma linha de pesquisa com foco na análise da produtividade energética e seus impactos no tempo de retorno do investimento. Para tanto, o desempenho de dois geradores fotovoltaicos instalados na cidade de Uberlândia-MG foi analisado e os resultados obtidos são apresentados neste trabalho. Ambos são sistemas residenciais de baixa potência, sendo que o primeiro foi implementado com inversor *string* e o segundo foi implementado com microinversores.

## **2. OBJETIVOS**

Para alcançar os objetivos propostos, os dois sistemas foram modelados e analisados no Software PVSyst. Os dados de produtividade obtidos são confrontados com os dados práticos coletados através do sistema de monitoramento de cada inversor solar utilizado.

A utilização do software PVSyst se justifica pelo fato de tornar possível a comparação dos dados de desempenho dos sistemas caso uma diferente tecnologia de inversor solar fosse utilizada.

### 3. METODOLOGIA

Os trabalhos foram realizados executando as etapas descritas a seguir:

- Escolha de dois sistemas fotovoltaicos em operação que utilizam inversores string e microinversor. Foram selecionados dois sistemas, sendo um com um inversor *string* modelo ABB UNO 2.0, e outro com sete microinversores APSystems modelo YC1000-3-220.
- Simulações das operações dos sistemas selecionados utilizando o *software* PVsyst. As condições de instalação de cada sistema foram avaliadas e reproduzidas no *software* PVsyst a fim de tornar possível a avaliação da produtividade energética utilizando cada tipo de inversor solar.
- Comparação e análise dos resultados obtidos por simulação com os dados obtidos através do sistema de monitoramento dos inversores solares instalados. Os dados práticos obtidos serviram para comprovar a eficácia das simulações realizadas e, por fim, para avaliar o desempenho dos sistemas caso uma diferente tecnologia de inversor solar fosse utilizada.

#### 4. ESTADO DA ARTE

Para avaliação de desempenho dos geradores fotovoltaicos instalados na cidade de Uberlândia-MG, foram utilizados quatro indicadores, a saber: Taxa de Desempenho (*Performance Ratio* – PR), Produtividade Energética (*Array Yield* –  $Y_f$ ), Rendimento de Referência (*Reference Yield* –  $Y_r$ ) (FAMOSO et al., 2015) e Fator de Capacidade (FC) (ZILLES, 2002).

A produção energética ( $Y_f$ ) é a razão entre a energia elétrica gerada ( $E$ ), mensal ou anual, expressa em kWh, e a potência de pico instalada ( $P_o$ ), expressa em kWp, da Usina Fotovoltaica (UFV). Esse índice, dado em horas, serve para normalizar os dados de desempenho de geradores fotovoltaicos de diferentes potências.

$$Y_f = \frac{E \text{ [kWh]}}{P_o \text{ [kWp]}} \quad (1)$$

Já o Rendimento de Referência ( $Y_r$ ) é a razão entre a irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos ( $E_{GNI}$ ), expressa em kWh/m<sup>2</sup>, e a irradiância global incidente no plano horizontal (GNI), expressa em W/m<sup>2</sup> – igual a 1000W/m<sup>2</sup>. O  $Y_r$  é dado em horas e serve para normalizar a energia recebida geradores fotovoltaicos instalados em diferentes localidades, assim como diferentes condições climáticas e orientação em relação ao norte e inclinação.

$$Y_r = \frac{E_{GNI} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]}{GNI \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} \quad (2)$$

O indicador PR expressa o desempenho do sistema. É calculado dividindo a produtividade energética pelo rendimento de referência.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (3)$$

O fator de capacidade (FC) representa a capacidade de geração de energia elétrica de um sistema, considerando a produção nominal durante 24 horas em um determinado período de tempo (ZILLES, 2002). Em (GARCIA; RUIZ; CHENLO, 2005) a potência nominal ( $P_n$ ) utilizada para o cálculo do FC se refere à potência máxima dos inversores e ( $D$ ) ao número de dias referente ao período da amostra. Contudo, no presente trabalho, optou-se por adotar a  $P_n$  como sendo a potência de pico instalada dos módulos a fim de considerar os ganhos e perdas de produtividade decorrentes da utilização de inversores com potência maior ou menor que a potência total dos módulos fotovoltaicos a ele conectados. O fator de capacidade pode ser calculado pela equação (4).

$$FC (\%) = \frac{E}{P_n * 24 * (D)} * 100 \quad (4)$$

Quanto à nomenclatura empregada neste trabalho, adotou-se a letra “M” no final do nome das usinas fotovoltaicas para indicar uma simulação utilizando microinversores, e a letra “S”, utilizando inversor *string*. Como exemplo, a sigla UFV X-M indica que a configuração contém microinversores.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a metodologia proposta neste trabalho, os dois sistemas instalados na cidade de Uberlândia-MG foram modelados e analisados utilizando-se o programa PVSyst. Na Figura 1 é apresentado o modelo em 3D implementado no programa e utilizado para avaliar produtividade energética utilizando os modelos de inversores solares em foco neste trabalho. Observa-se que as edificações existentes nas imediações da residência foram reproduzidas de forma a tornar possível a avaliação das perdas decorrentes do sombreamento a que são submetidos os módulos fotovoltaicos durante a período da manhã. Este sistema foi denominado UFV 1 e os parâmetros de projeto e as especificações dos equipamentos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Figura 1: Modelagem 3D da UFV 1 na plataforma computacional PVSyst.

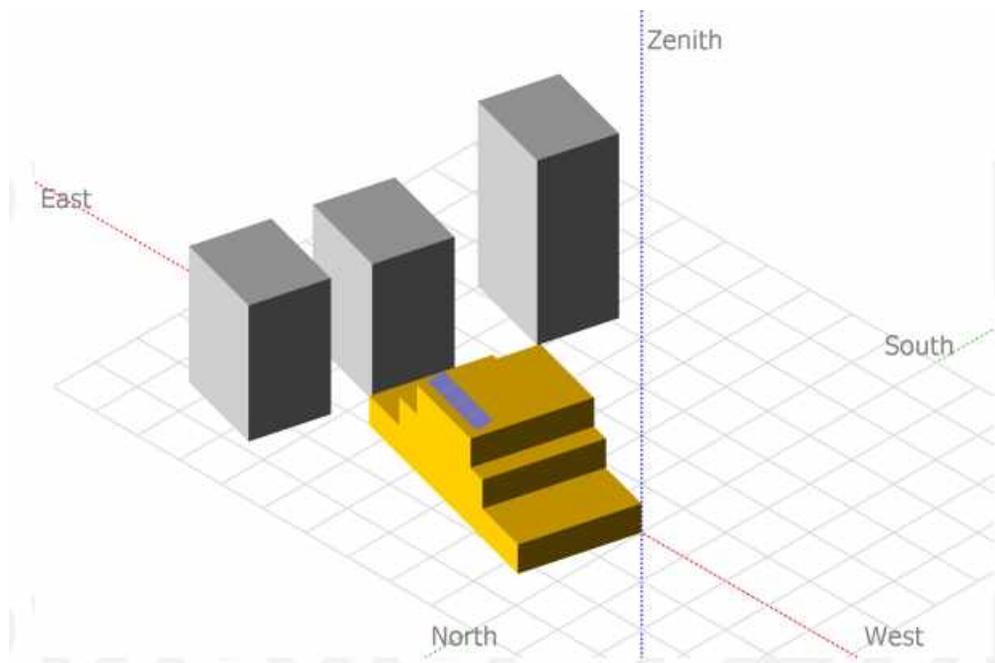


Tabela 1: Características do sistema UFV 1-S (com inversor string) e UFV 1-M (com microinversor).

<b>UFV 1-S</b>		<b>UFV 1-M</b>	
Inclinação	18°	Inclinação	18°
Azimute	-15°	Azimute	-15°
<b>INVERSOR</b>		<b>INVERSOR</b>	
1 x ABB PVI – 2000 -OUT -29b		4 X YC500 - NA	
Operação	90-250V	Operação	22-55V
MPPT	1	MPPT	2
Potência nominal	2000W	Potência nominal	500W
<b>MÓDULO FV</b>		<b>MÓDULO FV</b>	
Yingli Solar YL250P-29b		Canadian Solar CS3K - 280P	
Quant.	9	Quant.	8
Área ocupada	14,7m <sup>2</sup>	Área ocupada	13,2m <sup>2</sup>
Vmpp	258V	Vmpp	31.2V
Imp	8.4A	Imp	8.98A
N° string	01 MPPTs independentes	N° string	08 MPPTs independentes
Conexão	Série	Conexão	-
P. total	2250W	P. total	2240W
Eficiência	98,4%	Eficiência	95,5%
<b>PERDAS</b>		<b>PERDAS</b>	
Sujeira	3,2%	Sujeira	3,2%
<i>Mismatch</i>	5,4%	<i>Mismatch</i>	0%
Inversor	4,6%	Inversor	5,55%
Ôhmicas	0,7%	Ôhmicas	0,2%
Temperatura	8,7%	Temperatura	7,93%

Na tabela 2 são apresentados os dados irradiação solar incidente no plano horizontal, na cidade de Uberlândia-MG, fornecidos pelo INPE, e utilizados na análise computacional.

Tabela 2: Irradiação recebida na UFV-1 em kWh/m<sup>2</sup> (Fonte: INPE/SWERA).

<b>Mês</b>	<b>GlobHor (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Mês</b>	<b>GlobHor (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
JAN.	190,1	JUL.	166,6
FEV.	161,2	AGO.	171,7
MAR.	175,1	SET.	173,2
ABR.	169,9	OUT.	208
MAIO	146,6	NOV.	184,5
JUN.	100,7	DEZ.	186,6

Para que o comportamento simulado fosse o mais próximo possível da realidade, foram considerados, dentre outros detalhes técnicos, as quedas de tensões em cabos e diodos, as perdas por sombreamentos e sujeira, efeitos de circulação de ar na parte de trás dos módulos fotovoltaicos, e a degradação natural dos módulos (SILVA, 2018). Na implementação do sistema, como foi utilizado um inversor do tipo *string*, observa-se na Tabela 1 valores significativos de perdas por *mismatch* (GARCIA; RUIZ; CHENLO, 2005) como parte dos efeitos do sombreamento causado pelas edificações adjacentes. Este componente de perda não é observado na análise de desempenho do sistema utilizando-se de microinversores.

A UFV 1 entrou em operação no ano de 2015 utilizando um inversor *string*. Os dados de produtividade energética foram coletados entre os anos de 2015 e 2018, aqui denominados anos 1, 2, 3 e 4, e são apresentados na Tabela 3.

A fim de validar o modelo analisado na plataforma PVSyst, os indicadores descritos na seção anterior foram calculados e confrontados com os resultados obtidos pela simulação computacional. Observa-se que no ano 4 o desvio médio entre o valor medido (real) e o valor simulado foi maior que os demais anos, entretanto, o erro calculado neste mesmo ano é menor que 1,8%, e nos demais é menor que 1 %. O desvio ocorrido no ano 4 pode ser atribuído às circunstâncias climáticas que prejudicaram o desempenho do sistema. Vale ressaltar que, no período analisado, os módulos fotovoltaicos foram lavados apenas uma vez, em julho de 2017, após dois anos de

operação. Portanto, é possível concluir que os dados obtidos por simulação são confiáveis e podem ser utilizados para avaliar o retorno financeiro proporcionado pelo gerador fotovoltaico em questão, caso microinversores fossem utilizados.

Tabela 3: Relação de performance (PR) e energia gerada (E) na UFV 1 no período de 2015 a 2018 (dados práticos e simulados).

<b>Ano</b>	<b>PR Real</b>	<b>PR Simulada</b>	<b>E - Dado real (kWh)</b>	<b>E – Simulado (kWh)</b>
1	75,34%	76,62%	3597,7	3565,0
2	74,59%	76,00%	3561,96	3536,48
3	74,51%	75,39%	3558,0	3507,96
4	72,20%	74,78%	3447,58	3479,44

Analisando os dados apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, observa-se que, mesmo com uma eficiência menor no processo de conversão de energia em corrente contínua para corrente alternada, o sistema com microinversores, neste caso em particular, proporcionaria um aumento de produtividade (melhor desempenho) de aproximadamente 3%, gerando 153 kWh/ano a mais, em média.

Tabela 4: Simulações do sistema com aplicação de microinversores.

<b>UFV 1–M (Simulado com microinversor)</b>				
<b>Ano</b>	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
1	79,60%	3718,8	1660,17	18,95%
2	78,90%	3684,4	1646,16	18,79%
3	78,30%	3656	1632,14	18,63%
4	77,60%	3624,6	1618,12	18,47%

Tabela 5: Simulação do sistema com aplicação do inversor string.

<b>UFV 1-S (Simulado com inversor string)</b>				
<b>Ano</b>	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
1	76,62%	3565,00	1584,44	18,09%
2	76,00%	3536,48	1571,76	17,94%
3	75,39%	3507,96	1559,09	17,80%
4	74,78%	3479,44	1549,41	17,65%

Tabela 6: Dados coletados no período de 2015 a 2018.

<b>UFV 1 (Real com inversor <i>string</i>)</b>				
<b>Ano</b>	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
1	75,34%	3597,70	1598,978	18,25%
2	74,59%	3561,96	1583,093	18,07%
3	74,51%	3558,00	1581,333	18,05%
4	72,20%	3447,58	1532,258	17,49%

As Figuras 2 e 3 apresentam histogramas que proporcionam uma análise comparativa dos indicadores de desempenho calculados a partir de dados reais coletados e simulados. Ressalta-se o fato de que, para a UFV 1 com microinversores, os indicadores obtidos se referem apenas à análise computacional realizada. Os dados reais coletados do sistema com inversor *string* são indicados com a sigla DRC, os dados obtidos por simulação com inversor *string* são indicados com a sigla SIS e dados obtidos por simulação com microinversor são indicados com a sigla SM. A partir das simulações e dos dados práticos obtidos, os indicadores PR, Yf e FC foram determinados e também são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Figura 2: Comparativo de desempenho das configurações apresentadas.

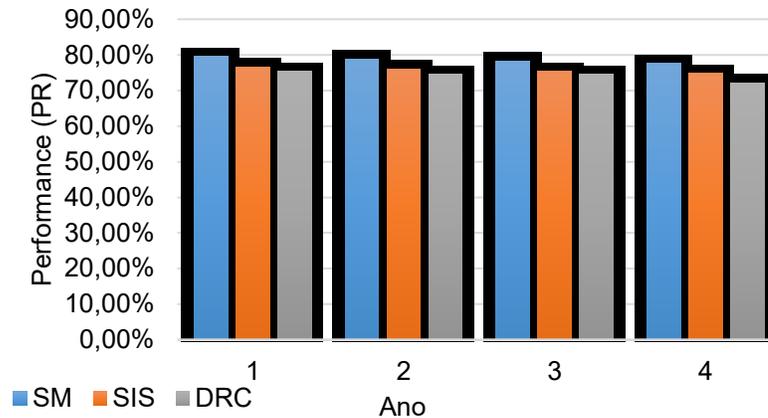
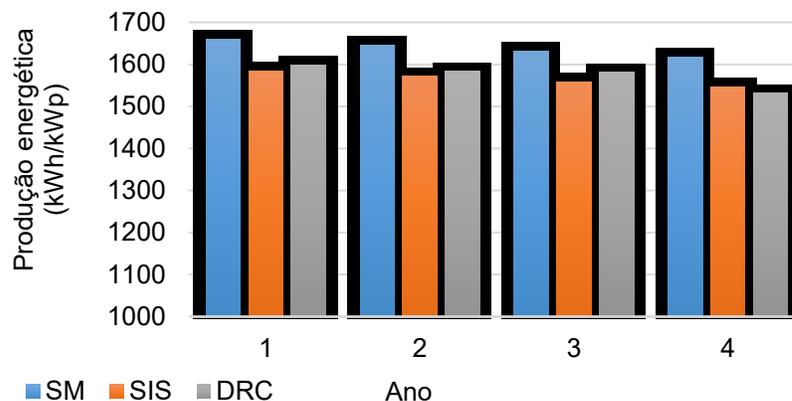


Figura 3: Produção energética dos sistemas apresentados.

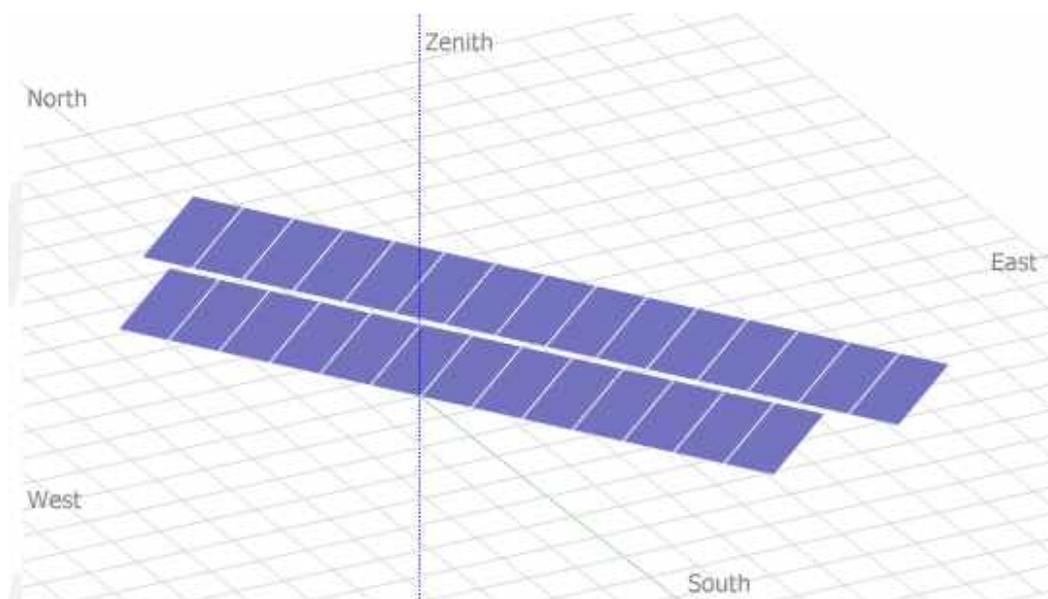


Procedimento análogo foi adotado para avaliar o projeto do segundo sistema analisado neste trabalho. Este foi denominado UFV 2 e, por se tratar de um sistema livre de interferências de edificações nas imediações do local de instalação dos módulos fotovoltaicos, o modelo computacional implementado na plataforma PVSyst teve como objetivo reproduzir apenas o desvio azimutal e o ângulo de inclinação dos módulos, conforme ilustrado na Figura 4.

Ao contrário da UFV-1, a UFV 2 foi implementada na prática utilizando-se microinversores APSsystems modelo YC1000-3-220, e está em operação desde setembro de 2018. Os indicadores de desempenho referente à utilização de um inversor *string* nas mesmas condições de instalação foram obtidos por simulação. Na Tabela 7 são apresentados os dados referentes a cada sistema analisado. Os dados práticos

apresentados na sequência compreendem o período entre setembro de 2018 a maio de 2019. Portanto, para a análise de desempenho do sistema num cenário de quatro anos foram utilizados apenas dados obtidos por simulação, os quais são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Figura 4: Modelagem 3D da UFV 2 na plataforma computacional PVSyst.



Para validar o modelo computacional adotado, os dados práticos obtidos no período supramencionado foram confrontados com os resultados obtidos por simulação. Estes são apresentados na Tabela 8. Analisando os dados apresentados, percebe-se que a taxa de desempenho (PR) determinada por simulação foi de apenas 1,11% superior ao valor determinado a partir dos dados reais coletados, evidenciando a eficácia do modelo computacional adotado.

Tabela 7: Características do sistema UFV 2-M (com microinversor) e UFV 2-S (com inversor string)

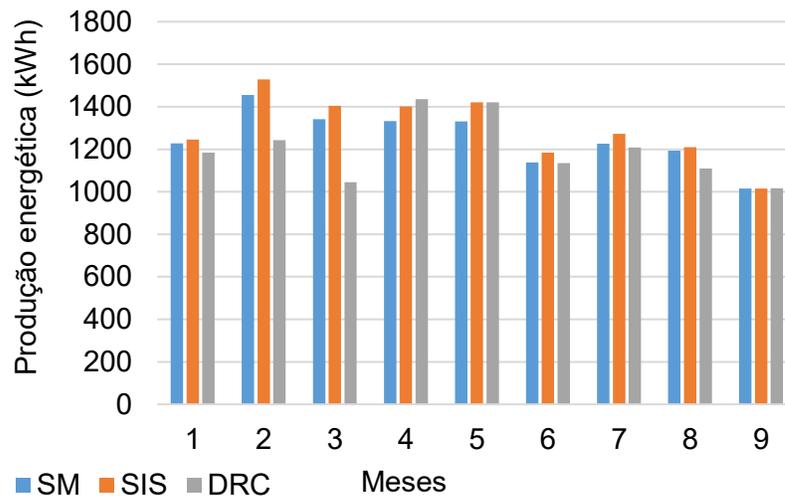
<b>UFV 2-M</b>		<b>UFV 2-S</b>	
Inclinação	12°	Inclinação	12°
Azimute	124°	Azimute	124°
<b>INVERSOR</b>		<b>INVERSOR</b>	
7 x YC1000-NA		1x Fronius Primo 8.2-1 / 208	
Operação	16-55V	Operação	80-800V
MPPT	4	MPPT	2
Potência nominal	900W	Potência nominal	8200W
<b>MÓDULO FV</b>		<b>MODULO FV</b>	
Canadian Solar CS3U - 345P		Canadian Solar CS3U - 345P	
Quant.	28	Quant.	28
Área ocupada	55,6m <sup>2</sup>	Área ocupada	55,6m <sup>2</sup>
Vmpp	36.6V	Vmpp	453/523V
Imp	8.94A	Imp	8.94A
N° <i>string</i>	28	N° <i>string</i>	2(14/14)
Conexão	28 MPPTs independentes	Conexão	02 MPPTs independentes
P. total	9660W	P. total	9660W
Eficiência	95%	Eficiência	98,1%
<b>PERDAS</b>		<b>PERDAS</b>	
Sujeira	3%	Sujeira	3%
<i>Mismatch</i>	0%	<i>Mismatch</i>	2,09%
Inversor	4,72%	Inversor	2,70%
Ôhmicas	1,8%	Ôhmicas	1,5%
Temperatura	7,2%	Temperatura	7,2%

Na Figura 5, os dados reais coletados do sistema com microinversor são indicados com a sigla DRC, os dados obtidos por simulação com inversor *string* são indicados com a sigla SIS e dados obtidos por simulação com microinversor são indicados com a sigla SM. Como pode ser observado, nos meses 2 (outubro de 2018) e 3 (novembro de 2018), a quantidade de energia elétrica gerada e medida foi menor que os valores obtidos por simulação. Tal fato deve ser atribuído ao volume de chuvas observado na cidade de Uberlândia nos referidos meses de 2018. Nos meses subsequentes, dezembro e janeiro, por consequência, observa-se que energia elétrica gerada foi maior que o esperado, compensando, de certa forma, as perdas observadas nos meses anteriores.

Tabela 8: Comparação dos indicadores de desempenho (PR), energia gerada (E) e fator de capacidade (FC) da UFV 2 no período de setembro de 2018 a maio de 2019.

	PR	E (kWh)	FC
<b>SM</b>	76,00%	11261	17,86%
<b>SIS</b>	78,60%	11683	18,53%
<b>DRC</b>	74,89%	10797	17,12%

Figura 4: Energia gerada no período de nove meses na UFV 2.



Uma vez validado o modelo computacional adotado, o desempenho do sistema em questão foi analisado num cenário de quatro anos e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 9 e 10. Todos os indicadores analisados determinam que, em condições de instalação em que os módulos fotovoltaicos não estão sujeitos a sombreamentos, a utilização de um inversor *string* seria a mais indicada.

Dentre os fatores que levaram o inversor *string* a apresentar um melhor desempenho quando comparado com o microinversor, ressalta-se primeiro a relação entre a potência nominal do inversor e a potência do painel fotovoltaico instalado. Para a operação com o microinversor são utilizados sete (07) microinversores YC1000-3-220, atingindo uma potência máxima de operação contínua de cerca de 6300 W (900W por

microinversor conforme dados do fabricante), enquanto que o sistema com o inversor *string* apresenta uma potência de operação contínua de cerca de 8200 W, ou seja, durante os momentos de pico de irradiação solar incidente nos módulos, a limitação na geração de energia elétrica observada no sistema com microinversores será maior. Na prática observou-se que potência máxima de operação contínua foi em torno de 6800 W (971W por microinversor).

Um segundo fator importante e que deve ser levado em consideração é a eficiência dos inversores *string*, no processo de conversão de energia em corrente contínua para alternada, que no caso em questão, é aproximadamente 3,0% maior.

Por fim, mesmo que no sistema com microinversor as perdas por *mismatch* possam ser desprezadas, por se tratar de um local sem sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos, tal percentual de perdas se mostra pouco significativo no caso dos inversores *string*.

Diante do exposto, é possível concluir que, na UFV 2, caso fosse utilizado um inversor *string*, poderia apresentar um desempenho superior em cerca de 2,8% em comparação com o desempenho obtido com microinversores, representando cerca de 400 kWh/ano, em média, a mais na produtividade energética do sistema.

Uma síntese dos resultados alcançados de ambas as simulações é apresentada na Tabela 11.

Tabela 9: Indicadores de desempenho da UFV 2 com microinversores.

<b>UFV 2–M (Simulado com microinversor)</b>				
<b>Ano</b>	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
1	76,40%	14,0	1449,275	16,54%
2	76,00%	13,9	1438,923	16,43%
3	75,50%	13,8	1428,571	16,31%
4	75,00%	13,7	1418,219	16,19%

Tabela 10: Indicadores de desempenho da UFV 2 com inversor string.

<b>UFV 2-S (Simulado com inversor string)</b>				
<b>Ano</b>	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
1	78,80%	14,4	1490,683	17,02%
2	78,20%	14,3	1480,331	16,90%
3	77,60%	14,2	1469,979	16,78%
4	77,00%	14,1	1459,627	16,66%

Tabela 11: Simulações das UFVs no primeiro ano de operação.

<b>UFV 1</b>				
	<b>PR</b>	<b>E(kWh)</b>	<b>Yf</b>	<b>FC</b>
<b>Microinversor</b>	79,60%	3718,8	1660,179	18,95%
<b>Inversor <i>string</i></b>	76,62%	3565,00	1584,444	18,09%
<b>UFV 2</b>				
<b>Microinversor</b>	76,40%	14037	1449,275	16,54%
<b>Inversor <i>string</i></b>	78,80%	14425	1490,683	17,02%

## 6. CONCLUSÕES

De posse dos indicadores de desempenho dos sistemas analisados, optou-se por realizar a análise financeira do empreendimento tomando como referência o tempo do retorno do investimento. Para determinação do tempo médio necessário para se obter o retorno do investimento nos sistemas com microinversor e inversor, foram considerados, para o primeiro ano de operação, (I) os custos de manutenção dos sistemas - 3,00% do investimento - para limpeza dos módulos e vistoria da instalação elétrica; (II) custos de troca do inversor solar (nas instalações com microinversores – 40% do capital investido - a troca poderá ser feita ao atingir-se 15 anos de operação, e para os sistemas com inversores *string* – 25% do capital investido - a troca poderá ser feita com dez anos e

vingte anos de operação); (III) a tarifa média de energia elétrica em vigor no ano de 2019 (R\$0,97 por kWh) para consumidor residencial; (IV) o reajuste médio anual a tarifa de energia elétrica (7%); (V) inflação anual sobre os preços de produtos e serviços (10%) e (VI) o custo do capital investido (4,55% - juros de poupança). Cabe ressaltar ainda que foram considerados o pagamento do custo de disponibilidade (100 kWh/mês) e os custos com a taxa de iluminação pública (R\$25,00 por mês).

Neste cenário, conforme ilustrado nas Figuras 6 e 7, no caso da UFV 1, a instalação com microinversor o investimento se paga em torno de 9,5 anos, enquanto a instalação com inversor *string* isso acontece por volta de 8,5 anos – considerando o valor inicial de investimento da instalação com microinversores de R\$18.200,0 e com inversor *string* de R\$16.000,0 (Julho de 2019). Contudo, ao final de 25 anos de operação, o capital acumulado e equivalente à economia na conta de energia elétrica foi estimado em cerca de apenas 4,2% menor quando comparado com o valor obtido caso um inversor *string* fosse utilizado. Já para a UFV 2, na instalação do sistema usando inversores *string* o investimento se paga em torno de 4,5 anos - considerando R\$38.500,00 no sistema com inversor *string* e R\$42.500,00 como valor inicial do investimento no sistema com microinversores. Ao final de 25 anos de operação, o capital acumulado e equivalente à economia na conta de energia elétrica foi estimado em cerca de apenas 10% maior com inversor *string* quando comparado com o valor obtido caso um microinversor.

Figura 5: Fluxo de caixa da UFV 1, para sistema com inversor *string* e microinversor.

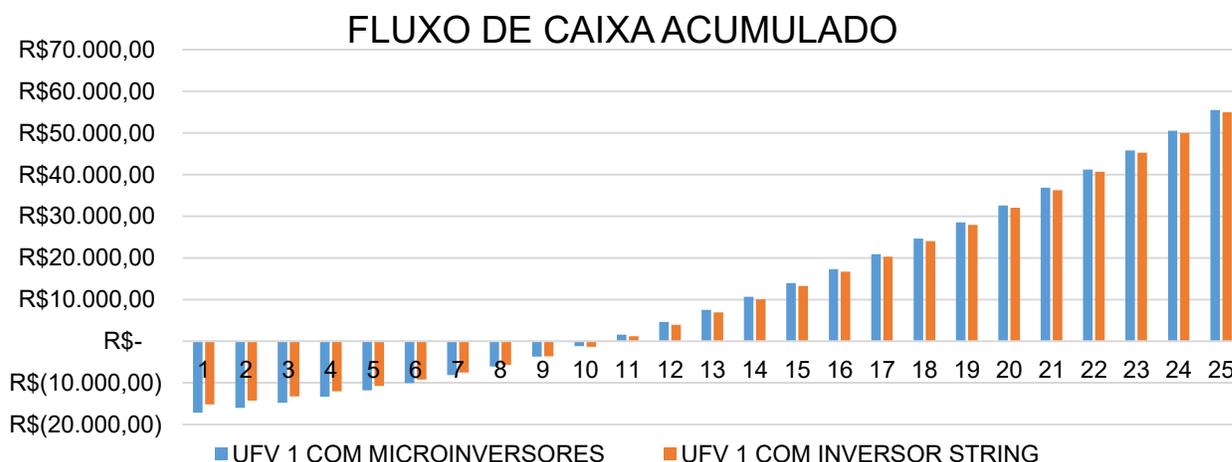
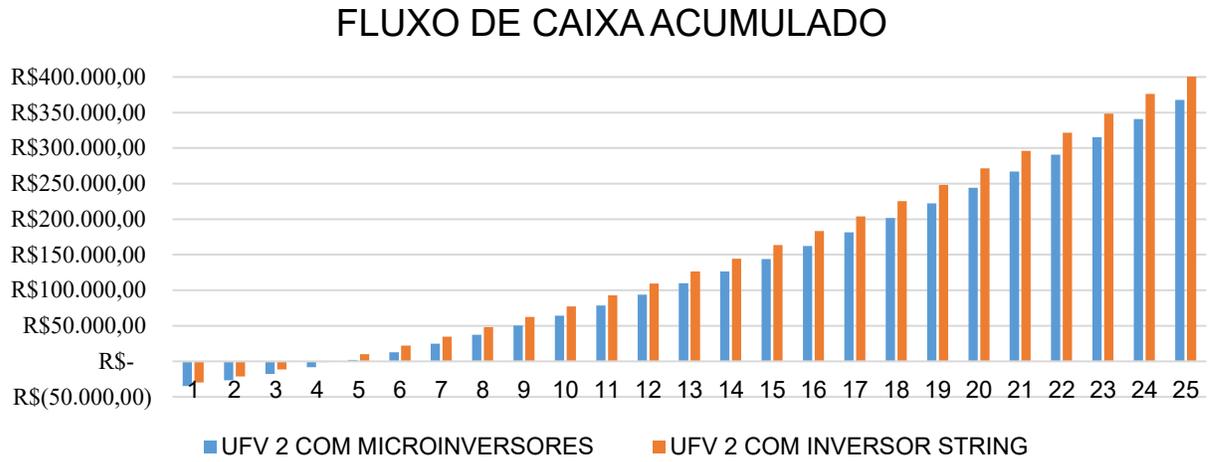


Figura 6: Fluxo de caixa da UFV 2, para sistema com inversor string e microinversores.



## 7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482, 2012.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia (Org.). BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2018. Epe., p. 113. 2018.

FAMOSO, Fabio et al. Performance comparison between micro-inverter and string-inverter Photovoltaic Systems: 69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014. Energy Procedia 81. Italy, p. 526-539. dez. 2015

GARCIA, M C Alonso; RUIZ, J M; CHENLO, F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic modul: Solar Energy Materials & Solar Cells. Sciencedirect, Madrid, p.329-340, 11 fev. 2005.

GODOI, Rodolfo Rodrigues de. Análise Comparativa de Desempenho de Inversor String e Microinversor. 2018. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, Aline Martins. Estudo e análise de desempenho de geradores fotovoltaicos distribuídos com vistas à avaliação de procedimentos para identificação de sinais de degradação e suas respectivas causas. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, NUPEP, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N; GALHARDO, M. A.B.; DE OLIVEIRA, S. H. F. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, Editora Oficina do texto, São Paulo. 2002