

## DESEMPENHO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

WALDEMAR RODRIGUES DE SOUZA NETO<sup>1</sup>, MARCELO ROCHA DOS SANTOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Setor de Agricultura, Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido, Instituto Federal Baiano Campus Guanambi. Zona Rural, Distrito de Ceraíma, S/N, CEP:46.430-000, CP: 009, Guanambi, Bahia, Brasil. e-mail: [wrneto.30@gmail.com](mailto:wrneto.30@gmail.com)

<sup>2</sup> Setor de Agricultura, Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido, Instituto Federal Baiano Campus Guanambi. Zona Rural, Distrito de Ceraíma, S/N, CEP:46.430-000, CP: 009, Guanambi, Bahia, Brasil. e-mail: [marcelo.rocha@ifbaiano.edu.br](mailto:marcelo.rocha@ifbaiano.edu.br)

**RESUMO:** A verificação da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação localizada, constitui-se em uma ferramenta que promove o seu dimensionamento adequado, de maneira a resultar no melhor rendimento das culturas. Objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho, pelos coeficientes de uniformidade, de um sistema de irrigação por gotejamento, com diferentes comprimentos de linhas laterais, operando sob energia solar fotovoltaica. O trabalho constou do dimensionamento hidráulico para encontrar os comprimentos ideais de linhas laterais que possibilitassem menor variação de vazão por variações de pressões entre 5 e 15 mca, seguido dos testes de uniformidade CUC, CUD e CUE em duas situações (com e sem calibração da pressão do sistema no início da área em 10 mca). Conclui-se que ao se calibrar a pressão de serviço no início da área em 10 mca, em qualquer período do dia observado, a uniformidade de aplicação de água ficou acima de 90%, o que classifica o equipamento como excelente para os comprimentos de linha lateral de 30 a 60 metros.

**Palavras-chave:** Energia renovável, uniformidade de distribuição de água, economia de energia elétrica.

## PERFORMANCE OF DRIP IRRIGATION SYSTEM WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY

**ABSTRACT:** The verification of the uniformity of water application in localized irrigation systems is a tool that promotes its proper dimensioning, in order to result in the best crop yield. The objective of this work was to evaluate the performance, through uniformity coefficients, of a dripping irrigation system, with different lengths of lateral lines, operating under photovoltaic solar energy. The work consisted of the hydraulic dimensioning to find the ideal lengths of lateral lines that would allow less variation in flow due to pressure variations between 5 and 15 mca, followed by uniformity tests CUC, CUD and CUE in two situations (with and without system pressure calibration at the beginning of the area at 10 mca). It is concluded that when calibrating the service pressure at the beginning of the area at 10 mca, at any time of the day observed, the uniformity of water application was above 90%, which classifies the equipment as excellent for the line lengths from 30 to 60 meters.

**Keywords:** Renewable energy, water distribution uniformity, electricity savings.

### 1 INTRODUÇÃO

O uso de energia solar como fonte energética teve seu início por volta de 1876, com o primeiro prospecto fotovoltaico construído. Mas somente no ano de 1956 começou uma produção industrial do setor, seguindo o desenvolvimento da microeletrônica. Contudo, o aproveitamento da

energia solar como fonte alternativa de energia elétrica começou em 1959 nos Estados Unidos, com o objetivo inicial de aproveitá-la como geradora de energia elétrica para satélites (Marques; Krauter; Lima, 2009).

No Brasil, o uso de energia solar fotovoltaica teve sua regulamentação através da Resolução Normativa nº 1.059, de 07 de fevereiro de 2023 (ANEEL, 2023), cuja oferta

de equipamentos passou a ser então cada vez mais intensificada. Um fator que inicialmente inviabiliza que produtores rurais adquiram equipamento fotovoltaico de geração de energia, é quanto ao custo para aquisição ser relativamente alto para a grande maioria da população brasileira, que, segundo Bruning *et al.* (2023), projetos de geração de energia fotovoltaica para irrigação os sistemas têm custos crescentes em função do aumento da potência.

O uso da energia solar fotovoltaica tem estado em constante ascensão no Brasil e no mundo, cujo nicho de mercado anteriormente dominado pelos japoneses, agora desponta a Alemanha como sua grande vitrine mundial para expansão dessa tecnologia (Lana *et al.*, 2016).

A pesquisa científica na área das ciências agrárias tem trazido estudos sobre essa temática de energias renováveis. Destarte, até para a irrigação de cultivos consorciados com energia advinda de um sistema fotovoltaico de geração de energia, constata-se que, para pequenas áreas, o sistema se mostra satisfatório, de forma que disponibiliza vazões e pressões suficientes para conferir um índice de germinação de até 95% nas culturas mútuas, bem como ser um sistema cuja viabilidade se comprova técnica e financeiramente (Fraidenaich; Bione; Vilela, 2006).

O entendimento de como um sistema de irrigação pode alcançar níveis ideais de uniformidade de aplicação hídrica utilizando-se energia solar, com a recomendação dos comprimentos ideais de linha lateral que proporcione maior eficiência de aplicação, é de fundamental importância para a sustentabilidade dos recursos hídricos, principalmente em região semiárida.

Outrossim, em condições de ausência de nebulosidade e franca insolação, o período diário entre as 12 e 15 horas demonstra ser o hiato do dia de maior produção energética de um sistema fotovoltaico de geração de energia, levando-se em conta que a radiação solar líquida nesse intervalo apresenta os maiores valores em relação aos outros momentos do dia, bem como o primeiro e quarto trimestre são as épocas do ano em que observam-se os maiores índices de conversão de energia frente às outras

janelas trimestrais de verificação (Silva; Vieira, 2016).

Outra ênfase que é dada ao se falar em irrigação por energia solar fotovoltaica, refere-se ao fato de que a propriedade rural que utiliza essa tecnologia torna-se um empreendimento sustentável, do ponto de vista energético. À vista disso, por não utilizar nem combustíveis fósseis e nem energia elétrica convencional, podem ser utilizados os mais diversos equipamentos eletroeletrônicos mesmo em locais onde não se dispõe de rede elétrica, até mesmo dispositivos necessários para a chamada Agricultura 4.0, tais como equipamentos robóticos, monitoramento e acionamento via internet e automação (Sant'anna *et al.*, 2021).

Um parâmetro importante para referendar o sucesso da irrigação por gotejamento diz respeito à eficiência de aplicação de água. Desta forma, existem algumas metodologias para verificação da uniformidade de aplicação água em sistemas de irrigação, dentre elas têm-se: o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC); o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD); e o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE). A observação conjunta desses coeficientes torna-se necessária para avaliar o desempenho de qualquer sistema de irrigação (Santos *et al.*, 2013). Em irrigação por gotejamento com energia solar fotovoltaica, valores de CUC e CUD considerados excelentes foram percebidos em condição de céu aberto (Zago *et al.*, 2022).

Devido à alta uniformidade e ao fato de manter contínua a umidade do solo próximo ao sistema radicular, a irrigação por gotejamento tem sido a mais utilizada, em detrimento de outros sistemas de irrigação, conseguindo-se obter valores de uniformidade acima de 90 % (Maia *et al.*, 2010).

Objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho, pelos coeficientes de uniformidade, de um sistema de irrigação por gotejamento, com diferentes comprimentos de linhas laterais, operando sob energia solar fotovoltaica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, situado no Perímetro Irrigado de Ceraíma, Zona Rural do município de Guanambi, região sudoeste da Bahia, com Latitude de  $14^{\circ} 13' S$ , Longitude de  $42^{\circ} 46' O$ , Altitude de 545 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima local é do tipo Aw (semiárido quente e seco), temperatura média em torno dos  $25,6^{\circ} C$  e precipitação média anual correspondente a 680 mm com período chuvoso entre os meses de novembro a março.

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Na etapa 1 ocorreu o dimensionamento hidráulico do sistema, para identificação dos comprimentos máximo e mínimo em suas respectivas pressões de serviço, de maneira a proporcionar menores variações de pressão na linha lateral. Na etapa 2, realizou-se a montagem dos equipamentos em campo e a realização dos testes de uniformidade de aplicação de água, através dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942), de Uniformidade de Distribuição (CUD) (Criddle *et al.*, 1956) e de Uniformidade Estatístico (CUE).

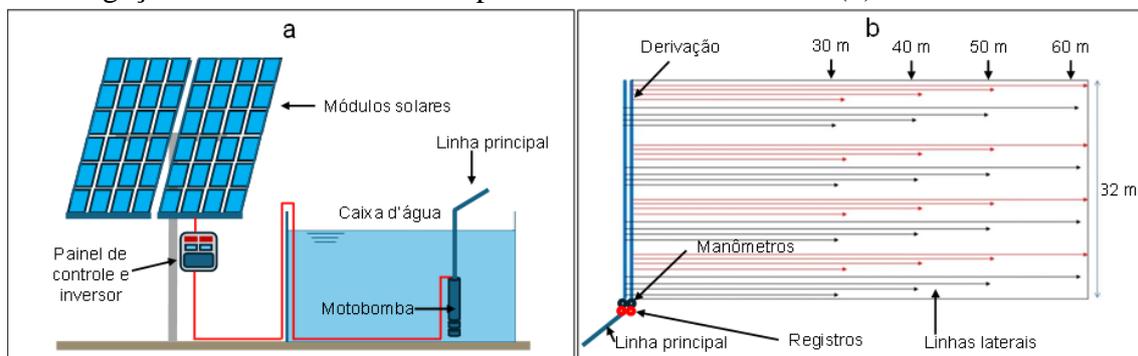
O sistema motobomba foi instalado em uma caixa d'água de fibra com capacidade de 2.000 litros instalada na superfície do solo, a qual era abastecida com água canalizada da

barragem, uma vez que a região de Ceraíma (localização do *Campus* onde foi conduzido o experimento), trata-se de um perímetro irrigado.

Portanto, para a condução das análises, liberava-se a água que abastecia o reservatório e o sistema solar fotovoltaico era ligado logo em seguida. Esse prospecto (Figura 1) teve o intuito de simular o uso do referido sistema na irrigação com água superficial, a exemplo de canais, lagos e barragens.

Usou-se uma motobomba submersa de 1 cv de potência, motor com corrente elétrica de 2,1 A, trifásico, tensão de 220/380 V, altura manométrica de até 100 mca e vazões entre 500 e 3.000 L h<sup>-1</sup>. O sistema (Figura 1) possuía 04 módulos solares do tipo policristalino, com capacidade cada placa de ofertar 335 W de potência, um painel de controle e inversor de 800 W m<sup>2</sup>, o que proporcionou uma corrente elétrica máxima de 8,7 A e tensão máxima de 34,8 V (características das placas para condição ambiental de  $20^{\circ} C$  e velocidade do vento de  $1 m s^{-1}$ ), em que, no local, apresentava-se baixo nível de sujeidade. O tubo gotejador tinha diâmetro interno e externo de 13,8 e 16 mm, respectivamente, cujos emissores estavam instalados internamente, no espaçamento de 25 cm, com vazão de 2,2 L h<sup>-1</sup>, para pressão de serviço de 101 KPa. Dessa forma, o sistema funcionava com a pressão de 101 KPa, com 6 linhas laterais de 60 m em funcionamento.

**Figura 1.** Esquemática do sistema de geração de energia e captação de água (a) e do sistema de irrigação com os diferentes comprimentos de linhas laterais (b) utilizados no ensaio



**Fonte:** elaborado pelos autores

Outra característica que buscou-se simular através da distância entre o reservatório e a área experimental, refere-se à perda de carga na tubulação da linha principal, a qual tinha um

comprimento total 144 metros da saída do reservatório até o início da área, de desnível desprezível, sendo considerada para efeito de dimensionamento uma perda de carga

aproximada de 80 KPa ao longo da linha principal.

A linha principal foi de PVC Rígido, DN 50, PN 40, com comprimento de 114 m, material comumente utilizado e que atendia a especificação do projeto. As linhas de derivação somadas correspondiam a 60 m (sendo uma de 32 m e outra de 28 m), com mesmo diâmetro e pressão de serviço da linha principal. Foram instalados quatro comprimentos de linhas laterais: 30, 40, 50 e 60 m, com oito repetições para cada comprimento, totalizando 1.440 metros. No início da linha de derivação foram instalados três manômetros de glicerina e um piezômetro, para verificação da pressão no início da área e um filtro de disco de 2". Para determinação da vazão, foram utilizados 128 recipientes plásticos, colocados nos pontos de coletas medidos previamente para recolhimento de água e uma proveta de 250 mL para aferição.

As pressões e os comprimentos das linhas laterais (30, 40, 50 e 60 m) foram dimensionadas previamente via cálculos hidráulicos, utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach e a equação de Colebrook-White para o fator de atrito,  $e$ , considerando os valores máximo de 10% e mínimo de 4% para variação de vazão ( $\Delta Q$ )

$$g = 9,8616 - (2,5928 \times \cos(2\varphi)) + (0,0069 \times (\cos(2\varphi))^2 - (0,3086 \times H)) \quad (3)$$

Em que,

$\varphi$  é a latitude, em graus; e  
H é a altitude, em Km.

$$f = \left( \frac{1}{-2 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon_{abs}}{3,71D} \right) + \left( \frac{2,51}{NR\sqrt{f}} \right) \right]} \right)^2 \quad (4)$$

Em que,

$f$  é o fator de atrito calculado, adimensional;

$\varepsilon_{abs}$  é a rugosidade absoluta, usou-se 0,001 mm, para polietileno (Azevedo Neto *et al.*, 1998);

NR é o número de Reynolds, adimensional.

Para estimativa dos comprimentos das linhas laterais e dimensionamento do referido sistema de irrigação, foram utilizadas as Equações 1, 2, 3, 4 e 5:

$$P_{in} = P_S + (0,75 \times hfL) \pm 0,5 \times \Delta NL \quad (1)$$

Em que,

$P_{in}$  é a pressão no início da linha lateral, em m;  
 $P_S$  é a pressão de serviço do emissor, em m;  
 $hfL$  é a perda de carga na linha lateral, em m; e  
 $\Delta NL$  é a variação do desnível na linha, em m.

$$hf = f \times \left( \frac{L}{D} \right) \times \left( \frac{V^2}{2g} \right) \times F \quad (2)$$

Em que,

$hf$  é a perda de carga localizada, em m;  
 $f$  é o fator de atrito, adimensional;  
 $L$  é o comprimento da tubulação, em m;  
 $D$  é o diâmetro da tubulação, em m;  
 $V$  é a velocidade da água, em  $m \cdot s^{-1}$ ;  
 $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m \cdot s^{-2}$ ;

e

$F$  é o fator de correção de perda de carga para condutos de múltiplas saídas, adimensional.

$$NR = \frac{(V \times D)}{\rho} \quad (5)$$

Em que,

$\rho$  é a viscosidade cinemática, em  $m^2 \cdot s^{-2}$  para temperatura da água de 20 °C.

Nas avaliações, etapa 2, utilizou-se a metodologia proposta por Keller e Karmelli (1975) para determinação da distribuição de água em um sistema de irrigação, que consiste na verificação da vazão dos seguintes emissores: primeiro emissor, 1/3 do comprimento, 2/3 do comprimento e do último emissor da linha lateral (LL). Esse procedimento foi efetuado na primeira linha de derivação (LD) do setor; na LL situada na

distância de 1/3 do comprimento total da LD; na LL localizada a 2/3 do comprimento total da LD; e na última LL, que está situada no final da LD.

Foram realizadas três determinações de vazão ao longo do dia, as quais foram feitas pela manhã, ao meio-dia e pela tarde, em diversos horários em cada série de observação. Desta forma, buscou-se fazer as avaliações do funcionamento do sistema nos seguintes horários: entre 7:00 e 9:30 h, no período da manhã; entre 11:30 e 13:00 h, no período do meio-dia; e entre 16:00 e 17:30 h, no período da tarde. Com isso, foi possível determinar uma curva de eficiência do sistema e, por conseguinte, referendar o manejo da irrigação a ser utilizado.

Para realização das avaliações, inicialmente, o sistema de irrigação era ligado por um período mínimo de 10 minutos, até que todas as linhas estivessem gotejando, bem como para verificação da pressão no início da área. Após essa verificação ser constatada, desligava-se o sistema de irrigação e colocavam-se todos os 128 coletores plásticos. Feito esse processo, ligava-se novamente o sistema por um período exato de 3 minutos e desligava-se em definitivo, para aferição do volume de água coletado.

Com o auxílio de uma proveta com capacidade de 250 mL, o volume de cada coletor foi verificado e imediatamente anotado em uma planilha de contenção dos dados obtidos. Foram executadas 768 coletas nos 3 períodos de observação, as quais geraram subsídios suficientes para avaliar a eficiência do sistema fotovoltaico de geração de energia, objeto deste trabalho.

Após o dimensionamento e montagem dos equipamentos em campo, passou-se para a etapa 2, com a realização das coletas de água nos emissores para aferição da vazão ao longo das linhas laterais do sistema, no intuito de verificar sua uniformidade de aplicação de água na irrigação por gotejamento com o uso de módulos solares fotovoltaicos para geração de energia.

Assim, mediante os valores de uniformidade que fossem encontrados, pudessem ser feitos, caso necessário, os ajustes

propositivos para que o sistema alcançasse a uniformidade de aplicação de água desejada.

Sendo assim, essas verificações foram feitas em duas situações: a primeira, com abertura de todas as linhas laterais, sem a calibração da pressão de serviço no início da área experimental, de maneira que fosse observado como o sistema se comporta mediante o dimensionamento prévio; e a segunda, fechando-se as saídas das linhas laterais e ajustando a pressão no início da área para 101 KPa. Os valores de pressão eram visualizados com o auxílio de 2 manômetros de glicerina instalados, um na saída da bomba e outro no início da área experimental.

A avaliação da uniformidade de distribuição de água foi feita conforme metodologia proposta por Keller e Karmelli (1975), utilizando-se os coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942), de Uniformidade de Distribuição (CUD) (Criddle *et al.*, 1956) e de Uniformidade Estatístico (CUE) (Wilcox; Swales, 1947), equação 6, 7 e 8, respectivamente.

$$CUC = 100 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q|}{nQ} \right) \quad (6)$$

Em que,  
CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);  
 $Q_i$  é a vazão de cada emissor ( $L h^{-1}$ );  
 $Q$  é a média das vazões coletadas de cada gotejador ( $L h^{-1}$ ); e  
 $n$  é o número de coletas.

$$CUD = \left( \frac{q_{25\%}}{q_m} \right) \times 100 \quad (7)$$

Em que,  
CUD é o coeficiente de uniformidade de distribuição (%);  
 $q_{25\%}$  é a média do menor quartil entre as vazões coletadas ( $L h^{-1}$ ); e  
 $q_m$  é a vazão média entre todos os emissores ( $L h^{-1}$ ).

$$CUE = 100 \times \left( 1 - \frac{S_d}{Q_{med}} \right) \quad (8)$$

Em que,

CUE é o coeficiente de uniformidade estatístico (%);

sd é o desvio-padrão dos valores de vazão coletados ( $L h^{-1}$ ); e

Qmed é a média das vazões coletadas de todos os emissores ( $L h^{-1}$ ).

Para a interpretação dos valores de CUC, CUD e CUE utilizou-se a Tabela 1 conforme Mantovani (2001), a qual atribui, mediante os resultados obtidos, classificação para o sistema de irrigação conforme os cálculos dos índices de uniformidade de aplicação de água.

**Tabela 1.** Classificação dos valores CUC, CUD e CUE

CLASSIFICAÇÃO	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)
Excelente	> 90	> 84	90 - 100
Bom	80 - 90	68 - 84	80 - 90
Razoável	70 - 80	52 - 68	70 - 80
Ruim	60 - 70	36 - 52	60 - 70
Inaceitável	< 60	< 32	< 60

Fonte: Mantovani (2001).

O método utilizado para a pesquisa em campo foi o quantitativo, utilizando-se da observação da pressão no início da área, de acordo com o seu respectivo horário de verificação e anotação da potência disponibilizada pelo sistema, cuja aferição das vazões foi medida em oito repetições para cada comprimento de linha lateral (30, 40, 50 e 60 m), com quatro verificações ao longo de cada linha lateral, ou seja, 32 verificações para cada comprimento de linha, totalizando 128 pontos de coleta em toda a área do experimento.

Foi utilizado um piezômetro para verificação da pressão que a água alcançava no início da linha de derivação, uma vez que ao serem abertas todas as linhas laterais, a bomba não oferecia a potência necessária para que fossem obtidos valores satisfatórios de uniformidade, ou seja, não era possível verificar tais pressões nos manômetros de glicerina instalados no início da área.

Numa análise comparativa, verificou-se também a uniformidade de aplicação de água quando o sistema foi calibrado, de modo que a pressão de serviço no início da área fosse mantida em 101 KPa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise do Comprimento Ideal

Os comprimentos máximos e mínimos de linha lateral foram calculados no sentido de servirem de parâmetro inicial, para que se soubesse o intervalo ideal de comprimento de linha, mediante a recomendação da literatura, para evitar que eventuais diferenças de aplicação de água ocorressem. Sendo assim, os valores para comprimento de linha calculados são descritos nas Tabelas 2 e 3 abaixo.

**Tabela 2.** Comprimentos máximos de linha lateral, de acordo com a perda de carga (hf), pressão de serviço (PS) e pressão no início (Pin) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm.

<b>L (m)</b>	<b>Hf (KPa)</b>	<b>PS (KPa)</b>	<b>Pin (KPa)</b>
56	7,922	40,0	45,941
56	8,778	45,0	51,584
57	12,669	65,0	74,502
58	17,509	89,0	102,132
58	20,865	108,9	124,549
59	25,716	131,1	150,387

**Fonte:** elaborado pelos autores

**Tabela 3.** Comprimentos mínimos de linha lateral, de acordo com a perda de carga (hf), pressão de serviço (PS) e pressão no início (Pin) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm.

<b>L (m)</b>	<b>Hf (KPa)</b>	<b>PS (KPa)</b>	<b>Pin (KPa)</b>
40	3,661	47,1	49,870
41	5,555	70,6	74,852
42	7,420	89,0	94,431
42	7,611	94,2	99,957
42	9,239	117,8	124,740
43	11,547	141,3	150,030

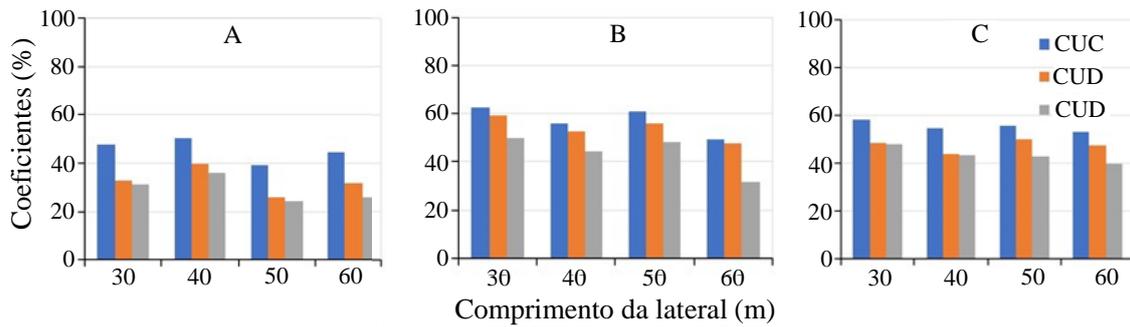
**Fonte:** elaborado pelos autores

Observando-se as Tabelas 2 e 3, bem como pelos critérios estabelecidos, os comprimentos máximo e mínimo para linha lateral corresponderam a 59 e 40 m, respectivamente. No entanto, adotou-se, para efeito de experimento, quatro comprimentos para linha lateral, quais sejam 30, 40, 50 e 60 m, com intuito de verificação, em condições de campo, do que foi dimensionado para o referido sistema.

### 3.2 Teste de uniformidade com todas as laterais abertas

A análise de campo serviu para validar o dimensionamento feito previamente, e, após a tabulação de todos os dados ao longo do período de análise da pesquisa, foram feitos os cálculos para Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE). Na Figura 2 são exibidos os coeficientes descritos, em cada comprimento de linha lateral, com abertura de todas as linhas e sem calibração da pressão de serviço, para os períodos da manhã, do meio-dia e da tarde, respectivamente.

**Figura 2.** Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da manhã (A), do meio-dia (B) e da tarde (C) sem calibração da pressão de serviço



**Fonte:** elaborado pelos autores

Os resultados expressos na Figura 2 demonstram, mediante comparação com os parâmetros prescritos por Mantovani (2001), a ineficiência do método empregado.

No entanto, observando-se os resultados separadamente, verifica-se que os maiores valores para os coeficientes se concentraram no período de análise do meio dia, no qual os valores de CUC, CUD e CUE corresponderam a patamares acima de 60%, 55% e 45%, respectivamente, para os comprimentos de linha de 30 e 50 m.

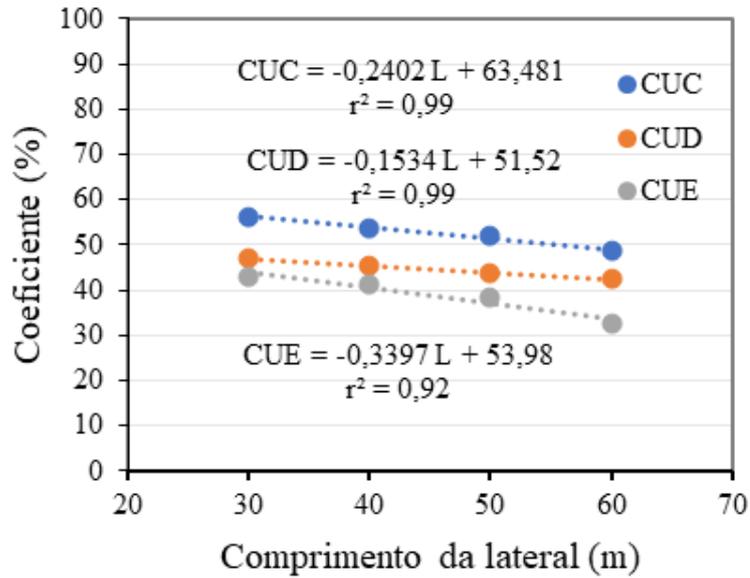
Os dados do método empregado permitem ainda inferir que, para o período do meio dia, o sistema pode ser classificado como ruim do ponto de vista de CUC, razoável pelo índice de CUD e inaceitável pela análise de CUE. Esse comportamento demonstrado pelo sistema pode ser explicado pela não calibração da pressão de serviço, uma vez que a abertura total das linhas laterais ocasionou uma pressão de serviço muito aquém (cerca de 17 KPa), da

que o equipamento necessita para proporcionar a vazão ( $2,0 \text{ L h}^{-1}$ ) proposta pelo fabricante.

Ademais, o período da manhã foi a janela de observação com os menores índices de eficiência, cujos valores de CUC, CUD e CUE variaram de 40 a 50%, 32 a 39% e 31 a 36%, para os comprimentos de 30 e 40 metros, respectivamente, destacando-se o comprimento de 40 m como o mais eficiente, para os coeficientes calculados.

Verificou-se que, no período da manhã, o método utilizado foi categorizado como inaceitável para dois dos coeficientes (CUC e CUE) e ruim do ponto de vista de CUD. Ilustra-se, na Figura 3, as estimativas de CUD, CUD e CUE, independentemente do horário de avaliação, em função dos comprimentos das linhas laterais. Nota-se que, para qualquer coeficiente analisado, a uniformidade de distribuição de água, reduz com o aumento do comprimento da LL.

**Figura 3.** Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de uniformidade de distribuição (CUD) e uniformidade estatístico (CUE) independente do horário de avaliação e sem a calibração da pressão de serviço, para diferentes comprimentos de linhas laterais



Fonte: elaborado pelos autores

Ao serem analisados em conjunto, sem calibração da pressão de serviço e independentemente do horário de observação, os dados obtidos permitem afirmar que o sistema apresentou valores de CUC, CUD e CUE acima de 55%, 45% e 40%, respectivamente, para os comprimentos de 30 e 40 metros.

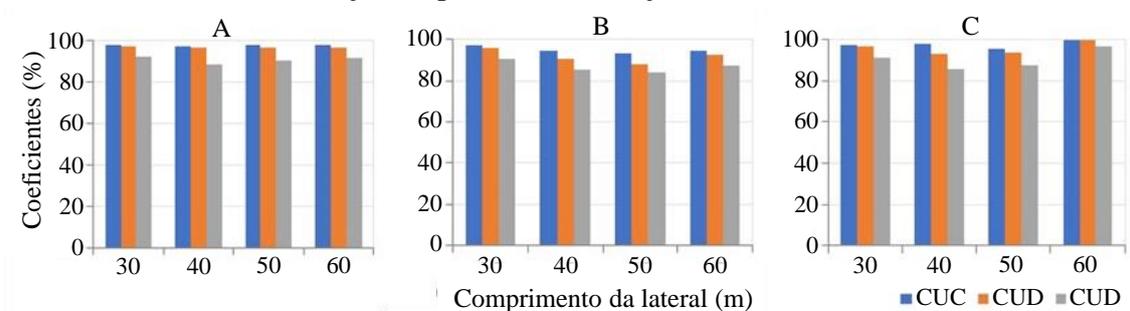
Os dados da Figura 3 indicam também que, sem a calibração da pressão de serviço no início da linha de derivação, a uniformidade de distribuição de água do sistema é muito baixa,

o que torna o método proposto no referido sistema fotovoltaico não recomendado para uso.

**3.3 Teste de uniformidade com calibração da pressão no início da linha de derivação**

Na Figura 4 são exibidos os coeficientes descritos, em cada comprimento de linha lateral, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa, para os períodos da manhã, do meio-dia e da tarde, respectivamente.

**Figura 4.** Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de uniformidade de distribuição (CUD) e uniformidade estatístico (CUE) no período da manhã (A), do meio-dia (B) e da tarde (C) com calibração da pressão de serviço em 101 KPa



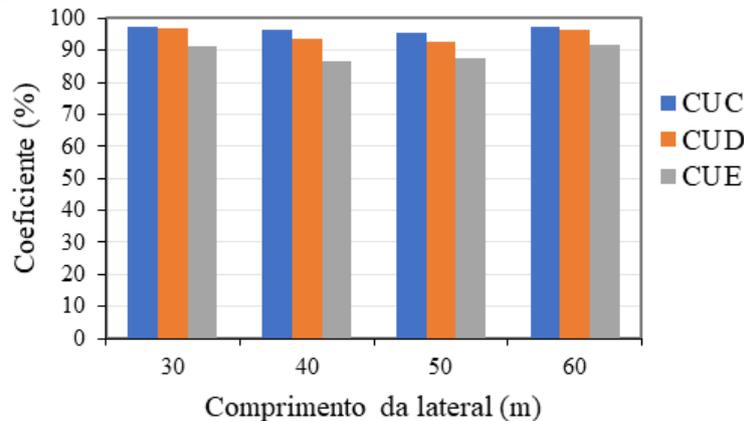
Fonte: elaborado pelos autores

Os dados que compõem a Figura 4 abaixo indicam as médias para os valores de

CUC, CUD e CUE, independentemente do horário de avaliação, nos quatro comprimentos

de linha lateral, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa através do fechamento do comprimento de linha.

**Figura 5.** Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de uniformidade de distribuição (CUD) e uniformidade estatístico (CUE), com calibração da pressão de serviço em 101 KPa, independentemente do horário



**Fonte:** elaborado pelos autores

Analisando-se a Figuras 4 e 5, nota-se que, independentemente do horário de observação, os dados obtidos indicam que o método utilizado apresentou para os coeficientes de CUC e CUD, valores acima de 90% e CUE acima de 85%, para todos os comprimentos de linha lateral utilizados. Sendo assim, para todos os comprimentos de linha experimentados (30, 40, 50 e 60 metros), ao se calibrar a pressão de serviço no início da área em 101 KPa, através do fechamento de qualquer comprimento de linha utilizado, o sistema se comporta de maneira excelente, do ponto de vista de uniformidade de aplicação de água e conforme parâmetros prescritos por Mantovani (2001).

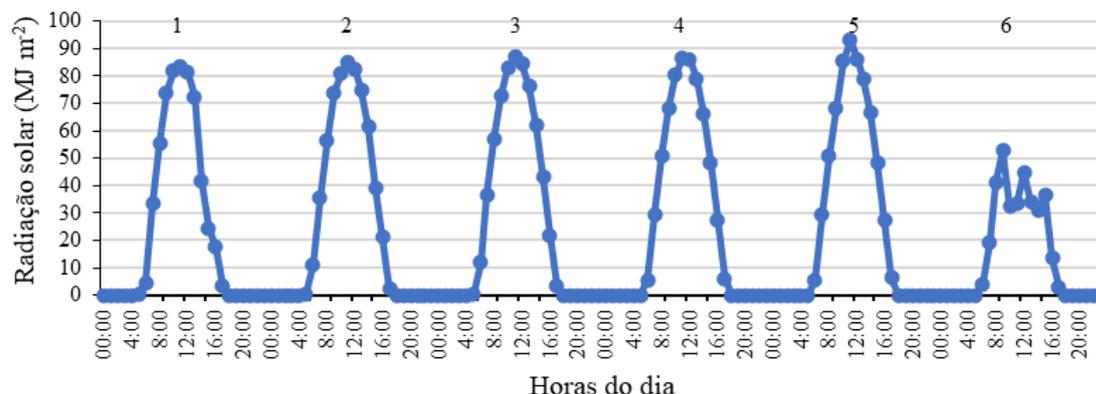
Avaliando o coeficiente de uniformidade estatístico médio (CUE) de um sistema de irrigação por gotejamento, Lima *et al.* (2017) encontraram valores até 93,15%, bem como a eficiência de aplicação ( $E_a$ ), analisada em cinco diferentes pressões de serviço, no presente trabalho, foi verificado valores superiores a 80% até 91%, o que classifica o sistema como bem satisfatório, do ponto de vista de uniformidade de distribuição de água para as plantas.

Constatou-se que em todos os comprimentos de linhas laterais

experimentados (30, 40, 50 e 60 metros) os resultados foram satisfatórios após o método de regulagem da pressão no início da área e inaceitáveis sem esse procedimento.

Outro detalhe que ficou demonstrado mais nas Figuras 4 e 5 foi a influência direta do ambiente na uniformidade de aplicação de água. Nota-se que, para os comprimentos de 30 a 50 m, resultou, relativamente, em uma uniformidade menor quando comparada com a uniformidade para 60 m, o que pode ser explicado pela influência da radiação (Figura 6). Os dados coletados nos comprimentos de 40 e de 50 m foram influenciados pela oscilação da radiação solar no último dia, no momento da mensuração, o que ocasionou maior variação nos valores de vazões e, conseqüentemente, menores coeficiente de uniformidade, como exemplo, os valores de CUD para linhas com 50 m (Figura 4B) foi de 88% ao passo que para linhas laterais com 60 m de comprimento (Figura 4C) foi de 99,6%. Por outro lado, para o comprimento de 30 m, devido ao menor comprimento, que conseqüentemente ocasionou menor perda de carga, resultou em menor variação de vazão e assim, coeficientes de uniformidade maiores.

**Figura 6.** Radiação solar em dias de coletas de água para as duas metodologias empregadas, em que 1 (dia 24/09/2020), 2 (dia 25/09/2020), 3 (dia 27/09/2020), 4 (dia 23/03/2021), 5 (dia 24/03/2021) e 6 (dia 08/04/2021). Guanambi, BA



**Fonte:** elaborado pelos autores

Ademais, acerca do registro de radiação solar efetuado pela Estação Meteorológica instalada no *campus* Guanambi do IF Baiano, indicam que os horários em que se observou valores mínimos de radiação capazes de gerar energia foram às 6:06 h no período da manhã e às 17:48 h no período da tarde, cujos valores médios observados nesses períodos são 2,65 e 4,01 MJ m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Concomitantemente, a tensão elétrica em Volts e a potência produzida em Watts atingiu valores médios de 69,2 e 1.348, respectivamente, dentro do período de observação dos dados. Vale ressaltar ainda que as coletas de dados se deram com o funcionamento do sistema na condição de insolação plena, ou seja, não foram observadas nebulosidades capazes de influenciar nos resultados. Com isso, descarta-se a hipótese de que a ineficiência do sistema pudesse ser causada por falta de radiação solar, o que acarretaria uma baixa produção de energia.

#### 4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados observados nos dois métodos empregados, o sistema fotovoltaico de geração de energia utilizado na pesquisa, com potência de bomba com 1 cv e 4 módulos solares fotovoltaicos, mostrou-se eficiente quanto a uniformidade de aplicação de água, com valores de coeficientes de uniformidades aceitáveis, independentemente do período do dia observado e com comprimentos da linha lateral de 30 a 60 m,

operando-se com o controle da pressão de serviço no início da área. Por outro lado, o sistema se comporta de maneira ineficiente quando não há calibração da pressão de serviço no início da área, assim, o sistema fotovoltaico deve ser dimensionado para atender a pressão e vazão requeridas pelo sistema de irrigação.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes, Código de financiamento 001), pelo apoio financeiro. À Brasmáquinas por disponibilizar o sistema fotovoltaico.

#### 6 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa N° 1.059, de 07 de fevereiro de 2023.** Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas n° 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, 1009, de 22 de março de 2022, e dá outras providências. Brasília, DF: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2024.

AZEVEDO NETO, J. M.; FERNANDEZ y FERNANDEZ, M.; ARAUJO, R.; EIJI ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edigar Blucher, 1998.

BRUNING, J.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; CHAIBEN NETO, M.; RODRIGUES, S. A.; FERREIRA, L. D.; PEREIRA, T. S.; KAYZER, L. P. Economic performance of off-grid photovoltaic systems for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 27, n. 1, p. 57-63, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n1p57-63>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/BYVYKCTbgwrfbphPRdvYRfv/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. (Bulletin, 670). Disponível em: [https://brittlebooks.library.illinois.edu/brittlebooks\\_closed/Books2009-04/chrije0001irrspr/chrije0001irrspr.pdf](https://brittlebooks.library.illinois.edu/brittlebooks_closed/Books2009-04/chrije0001irrspr/chrije0001irrspr.pdf). Acesso em: 15 jun. 2022.

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHOCKLEY, D. G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington, DC: Soil Conservation Service: USDA, 1956. (Agricultural Handbook, 82).

FRAIDENRAICH, N.; BIONE, J.; VILELA, O. C. Implantação de culturas irrigadas com sistemas de bombeamento fotovoltaico na região semi-árida do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 183-190, 2006. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/23/eb8764630824e5fda010f329097bbe5b\\_9b75ad4fee73df856c18da1949e23264.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/23/eb8764630824e5fda010f329097bbe5b_9b75ad4fee73df856c18da1949e23264.pdf). Acesso em: 15 jun. 2022.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain bird sprinkler manufacturing corporation, 1975.

LIMA, M. G. M.; DANTAS NETO, J.; FERREIRA, D. J. L.; GOMES, A. H. S.; VASCONCELOS, G. N. Comportamento hidráulico de sistema de irrigação por gotejamento em função da pressão de serviço adotada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 12, n. 1, p. 167-171, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v12i1.4047>. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/4047>. Acesso em: 15 jun. 2022.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; ESPÍRITO SANTO, O. C.; SACRAMENTO, T. C. B.; BRAZ, K. T. M. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. **Engenharias On-line**, Belo Horizonte, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2016. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A.; MEDEIROS, J. F.; DANTAS NETO, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 149-158, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20100020>. Disponível em: <http://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/83997>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MANTOVANI, E. C. **Avalia**: Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C. W.; LIMA, L. C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 30, n. 2, p. 153-162, 2009. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/1049/4494>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SANT'ANNA, V. R. S.; OLIVEIRA, F. G.; MORAES, M. J.; REIS, J. B. R. S. Uso de

energia solar fotovoltaica na agricultura irrigada. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 42, n. 313, p. 79-90, 2021.

SANTOS, C. S.; SANTOS, D. P.; SILVA, P. F.; ALVES, E. S.; SANTOS, M. L. Avaliação da uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Verde**, Juazeiro, v. 8, n. 3, p. 10-16, 2013. DOI: <https://doi.org/10.28998/rca.v13i1.1272>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/1272>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SILVA, R. L.; VIEIRA, M. M. Modelos sazonais para radiação solar incidente na área rural de Dourados-MS. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 9, n. 32, p. 162-171, 2016. Disponível em:

<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/4058>. Acesso em: 15 jun. 2022.

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ontário, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/sa-1947-0067>. Acesso em: 15 jun. 2022.

ZAGO, E. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; VILAS BOAS, M. A.; TOKURA, L. K. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando energia fotovoltaica. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 5, p. e11111528023, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28023>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/28023>. Acesso em: 26 jun. 2024.