



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

Waldemar Rodrigues de Souza Neto

Sistema de irrigação por gotejamento com energia solar fotovoltaica

Guanambi/BA, dezembro de 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

Waldemar Rodrigues de Souza Neto

Sistema de irrigação por gotejamento com energia solar fotovoltaica

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, como exigência do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal no Semiárido para obtenção do título de Mestre Profissional.

Orientador: Dr. Marcelo Rocha dos Santos

Guanambi/BA, dezembro de 2021

Catálogo: Roberta Pinheiro Ferraz - CRB-5/1596, IF Baiano,  
Campus Guanambi

S729s Souza Neto, Waldemar Rodrigues de  
Sistema de irrigação por gotejamento com energia solar  
fotovoltaica / Waldemar Rodrigues de Souza Neto. –  
Guanambi, Ba, 2021.  
47f.: il.

Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal  
no Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Baiano, Campus Guanambi.

Orientador: Marcelo Rocha dos Santos.

Coorientador: José Alberto Alves de Souza.

1. Irrigação agrícola. 2. Método de irrigação. I. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA

por

Waldemar Rodrigues de Souza Neto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado as 16 horas 00 min. do dia 07 de outubro de 2021, como requisito para a conclusão do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - *Campus* Guanambi. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Carlos Elízio Cotrim

Membro

---

Prof. Dr. Paulo Emilio Rodrigues Donato

Membro

---

Profa. Dra. Vania Reis de Souza Sant'Anna

Membro

---

Prof. Dr. Jose Alberto Alves de Souza

Co-Orientador

**Documento assinado eletronicamente por:**

- **Vania Reis de Souza Sant'Anna, Vania Reis de Souza Sant'Anna - Outros - Escola Estadual Dr. Raimundo Alves Torres (20318499000197)** em 26/10/2021 13:30:57.
- **Paulo Emilio Rodrigues Donato, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICQ** em 10/10/202117:14:32.
- **Carlos Elizio Cotrim, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** em 08/10/2021 17:30:54.
- **Jose Alberto Alves de Souza, COORDENADOR – FUC0001 - GBI-CESM,** em 08/10/2021 13:39:43.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/10/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifbaiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 246272

**Código de Autenticação:** 0458eebe81



“Cuidas da terra e a regas; fartamente a enriqueces. Os riachos de Deus transbordam para que nunca falte o trigo, pois assim ordenaste. Regas os teus sulcos, nivelas suas glebas; tu a amoleces com as chuvas e abençoaas as suas colheitas.” **Salmo 65:9-10**

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, sobretudo minha esposa Cássia pelo companheirismo e apoio incondicionais, minha mãe Tina, minha irmã Tatiana e meu irmão Romeu Júnior pelas orações, ajuda financeira, confiança e torcida. Ao meu pai Romeu (*in memoriam*), pelo exemplo de uma vida de trabalho e hombridade. À minha avó Lourdes (*in memoriam*), que com suas palavras de apoio me inspirou para a escrita, sobretudo através dos seus estudos bíblicos, os quais me impulsionam na busca constante por conhecimento e sabedoria.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por proporcionar os requisitos necessários para a realização desse sonho. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi por proporcionar esse aprimoramento profissional. Ao professor, orientador e amigo Marcelo Rocha dos Santos, pela sempre prontidão na elucidação dos questionamentos e proposição do caminho adequado para realização desse trabalho. Ao meu co-orientador, coordenador e professor José Alberto pelo auxílio sempre disponível. À empresa Brasmáquinas pela seção dos equipamentos e parceria nos momentos cruciais, principalmente o Engenheiro Agrícola Natal Montalvão. À família que se tornou nossa turma do MPPVS (Lorena, Renata, Guapeí, Fábio, Muriel, Leonardo, Anderson, Eudo, Erly e Alex), os quais levarei para sempre uma amizade sincera, conhecimentos compartilhados, lembranças das confraternizações, das noites em claro em trabalhos e avaliações, dos momentos de sufoco para o meu restabelecimento físico e emocional. Meu profundo agradecimento por terem feito parte da minha caminhada. A todos os funcionários do IF Baiano *Campus* Guanambi, nas pessoas de “Seu Zé”, Branco e Ancilon, pelo apoio na preparação da área. Aos demais professores do mestrado profissional, aos funcionários da limpeza, do restaurante, da segurança, da secretaria, dos laboratórios e das oficinas, que na pessoa de Elias, contribuíram das mais variadas formas para que este trabalho se realizasse. Aos irmãos de fé Dário, Débora, Willian, Denise, Caetano, Glória, Jazon, Joãozito e Cleide, por acolherem a mim e minha esposa nos períodos mais difíceis dessa jornada. Às minhas queridas irmãs Magda e Adriana que a vida me trouxe como uma benção, pela disponibilidade, auxílio e carinho a todo instante. Ao primo-irmão Jubiabá, pela inspiração para o crescimento intelectual e incentivos sempre providenciais. Deus abençoe a vida de cada um aqui mencionado.



## Sumário

Resumo.....	2
Abstract.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 Irrigação por gotejamento no Brasil.....	7
2.2 Energia solar e equipamentos fotovoltaicos.....	7
2.3 Irrigação por energia solar.....	8
2.4 Uniformidade de aplicação de água.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Equipamentos.....	12
3.2 Estimativa de comprimento ideal de linha lateral.....	15
3.3 Teste de Uniformidade.....	16
3.3.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).....	17
3.3.2 Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).....	17
3.3.3 Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE).....	18
3.4 Viabilidade econômica.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 Análise do comprimento ideal.....	20
4.2 Teste de uniformidade.....	21
4.2.1 Teste de uniformidade com todas as linhas laterais abertas.....	21
4.2.2 Teste de uniformidade com regulagem da pressão no início da área.....	24
4.3 Viabilidade econômica .....	28
5. CONCLUSÕES.....	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
Anexo.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Interpretação dos valores de CUC, CUD e CUE.....	18
Tabela 2 – Comprimento máximo de linha lateral, de acordo com a perda de carga (hf), pressão de serviço (PS) e pressão inicial (Pin) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm.....	20
Tabela 3 – Comprimento mínimo de linha lateral, de acordo com a perda de carga (hf), pressão de serviço (PS) e pressão inicial (Pin) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm.....	20
Tabela 4: Viabilidade econômica para o cultivo do maracujá amarelo em sistemas de irrigação por gotejamento movidos a energia solar fotovoltaica e energia elétrica convencional com preço de R\$ 2,00 pago ao produtor na região de Ribeira do Pombal – BA, ao longo de 3 anos por ciclo de plantio.....	28
Tabela 5: Viabilidade econômica para o cultivo do maracujá amarelo em sistemas de irrigação por gotejamento movidos a energia solar fotovoltaica e energia elétrica convencional com preço de R\$ 3,33 pago ao produtor na região de Ribeira do Pombal – BA, ao longo de 3 anos por ciclo de plantio.....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Croqui de uma configuração básica de um sistema fotovoltaico de geração de energia .....	8
Figura 2 – Sistema utilizado no bombeamento: Reservatório de 2 m <sup>3</sup> com detalhe para o tubo de abastecimento e os módulos solares fotovoltaicos (A); detalhamento do painel de controle e da motobomba utilizada (B); painel de controle instalado abaixo do centro das placas (C); e reservatório com o sistema motobomba instalado (D).....	13
Figura 3 – Disposição das linhas laterais a cada 90 centímetros entre si .....	14
Figura 4 – Disposição dos coletores instalados para recolhimento de água.....	14
Figura 5 – Detalhamento dos manômetros de glicerina instalados na saída da bomba (A) e no início da área (B).....	17
Figura 6 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da manhã, sem calibração da pressão de serviço.....	21
Figura 7 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período do meio-dia, sem calibração da pressão de serviço.....	22
Figura 8 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da tarde, sem calibração da pressão de serviço.....	22
Figura 9 – Piezômetro instalado no início da área com detalhe para altura da água.....	23
Figura 10 – Comparativo de coeficientes sem a calibração da pressão de serviço e independentemente do horário.....	23
Figura 11 – Equações de regressão dos coeficientes CUC, CUD e CUE, sem calibração da pressão de serviço, em função do comprimento de linha lateral, independentemente do horário de observação.....	24
Figura 12 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da manhã, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.....	25
Figura 13 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período do meio-dia, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.....	25
Figura 14 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da tarde, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.....	25
Figura 15 – Coeficientes de uniformidade de distribuição de água, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa, independentemente do horário.....	26
Figura 16 – Radiação solar em dias de coleta de água para as duas metodologias empregadas.....	27

## RESUMO

Souza Neto, W. R. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, Guanambi, outubro de 2021. **Sistema de irrigação por gotejamento com energia solar fotovoltaica**. Orientador: Dr. Marcelo Rocha dos Santos. Coorientador: Dr. José Alberto Alves de Souza

A verificação da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação localizada, constitui-se numa ferramenta que promove o seu dimensionamento adequado, de maneira a resultar no melhor rendimento das culturas. Objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento 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. Numa simulação de viabilidade econômica, um sistema de irrigação por gotejamento com energia solar fotovoltaica apresentou resultado mais satisfatório para valor presente líquido do que um mesmo sistema de irrigação com energia elétrica convencional.

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

## **ABSTRACT**

Souza Neto, W. R. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano Campus Guanambi, Guanambi, October 2021. **Drip irrigation system with photovoltaic solar energy**. Advisor: Dr. Marcelo Rocha dos Santos. Co-advisor: Dr. José Alberto Alves de Souza

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 of a dripping irrigation system 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. In a simulation of economic feasibility, a drip irrigation system with photovoltaic solar energy presented a more satisfactory result for net present value than the same irrigation system with conventional electricity.

Key words: Solar energy, water distribution uniformity, electricity savings.

## 1. INTRODUÇÃO

Acerca dos benefícios proporcionados pela prática da irrigação nos diversos cultivos agrícolas, destaca-se garantir a oferta hídrica no momento em que a planta necessita e a redução dos riscos de quebra de safra devido a períodos de estiagem prolongada (TESTEZLAF, 2017). Outros fatores que contribuem para que a prática da irrigação seja indispensável, ainda segundo o mesmo autor, dizem respeito ao aumento de produtividade auferido às culturas, à melhoria considerável da qualidade final dos produtos, ao aumento do número de safras e à possibilidade de colheita na entressafra, à oferta de novos postos de trabalho e à capacidade de reduzir a mecanização, como no caso da fertirrigação. Além disso, proporciona o uso de represas, lagos e barragens construídos para armazenamento de água e para fins recreativos, esportivos e de lazer, uma vez que podem ser aproveitados também para o turismo rural.

Percebida como uma das atividades que consomem água em larga escala, a irrigação pode ser executada de diversas formas. Uma dessas modalidades é feita via superfície (sistema não-pressurizado), na qual pode-se obter uma Eficiência de Aplicação (Ea) ideal em torno de 77,5%. Outros tipos, tais como o pivô central e a aspersão convencional (sistemas pressurizados), podem atingir valores médios de Ea em torno de 85%. Contudo, ambos os tipos de sistemas e métodos ficam abaixo da irrigação localizada por microaspersão e gotejamento, cujos índices situam-se em aproximadamente 95%, quando em condições ideais (BERNARDO et al., 2006).

Nesse desafio de maximizar a oferta de água para as plantas e diminuir o desperdício, através de uma maior eficiência de aplicação, encontra-se um vasto caminho a ser trilhado por pesquisadores e técnicos, no intuito de responderem à seguinte indagação: Como aumentar a produção agrícola gastando menos recursos financeiros e ambientais?

Para tanto, há que se enxergar na prática da irrigação uma alavanca propulsora para que se alcance tal pretensão. Dessarte, a utilização da irrigação, principalmente a localizada, constitui-se numa ferramenta que contribui para altas produtividades, dada sua alta eficiência e boa uniformidade de distribuição de água em toda a área irrigada.

Não obstante, a irrigação por gotejamento figura como uma ferramenta que promove a aplicação hídrica de maneira a formar um “bulbo molhado” diretamente na região do sistema radicular das plantas ou até, mediante a textura mais argilosa do

solo e espaçamento mais curto entre os gotejadores, podem formar uma faixa molhada no sentido de plantio.

Numa outra vertente, 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 et al., 2009).

No Brasil, o uso de energia solar fotovoltaica teve sua regulamentação através da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, cuja oferta de equipamentos passou a ser então cada vez mais intensificada, porém sua acessibilidade aos cidadãos comuns ainda não se manifesta tão estimulada, tampouco facilitada, haja vista as limitações impostas pela legislação (ZANETTI NETO, 2014). Outro aspecto a ser levado em consideração é quanto ao seu custo para aquisição ser relativamente alto para a grande maioria da população brasileira, o que de certa forma inicialmente inviabiliza que essas pessoas adquiram esse equipamento.

Segundo Lana et al. (2016), 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.

Pelo exposto, o trabalho busca o entendimento de como um sistema de irrigação localizada por gotejamento pode alcançar níveis ideais de uniformidade de aplicação hídrica utilizando-se energia solar. Outrossim, a literatura científica carece de trabalhos nesse segmento, sendo ainda poucos os que relatam acerca da uniformidade de aplicação hídrica utilizando-se energia provida por um sistema fotovoltaico, principalmente na região do semiárido.

Sendo assim, contempla-se a arguição posta em debate como uma oportunidade de identificação dos empecilhos da aplicabilidade da referida fonte de energia, não obstante no que se refere sua utilização na irrigação de baixa intensidade e alta frequência, como no caso da irrigação localizada por gotejamento, de maneira que pesquisadores e extensionistas reflitam acerca da sua recomendação para a atividade agrícola brasileira.

Desta maneira, a pesquisa buscou avaliar a uniformidade de aplicação hídrica na irrigação por gotejamento proporcionado por um sistema solar fotovoltaico de geração de energia, com sua consequente recomendação dos comprimentos ideais de linha lateral que proporcione tal eficiência para a região semiárida brasileira.



## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Irrigação por Gotejamento no Brasil**

A irrigação em terras brasileiras teve o seu início nas lavouras de arroz do estado do Rio Grande do Sul entre o fim do século XIX e o princípio do século XX, onde foi por muitos anos o polo brasileiro da agricultura irrigada, de acordo com informações contidas no Atlas Irrigação (ANA, 2017).

Desde aquele período até os dias atuais, houve uma grande expansão agrícola que aconteceu nas décadas de 1970 e 1980. Tal crescimento teve seu começo anteriormente com a criação de órgãos governamentais, como o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS, em 1945 e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - CODEVASF em 1975, o que permitiu que a prática da irrigação chegasse às regiões mais remotas do Brasil.

Dentre os sistemas de irrigação existentes no Brasil, o gotejamento se configura num sistema que apresenta algumas vantagens, tais como: maior eficiência no uso da água; aumento da produtividade; melhoria a eficiência da adubação, pois os fertilizantes podem ser aplicados via sistema de irrigação, próximo ao sistema radicular das plantas; conter o desperdício; possibilitar o controle fitossanitário; além, da economia de mão-de-obra com a viabilidade de automação (FOLEGATTI et al. 2001, VILAS BOAS et al. 2011).

Concomitantemente, a utilização de cultivos irrigados com o sistema de gotejamento, proporciona aumento na produtividade, e, como a pauta do presente estudo diz respeito à eficiência na conversão energética, sobretudo a energia solar fotovoltaica para alimentar o sistema motobomba, verifica-se ainda que a prática da irrigação localizada proporciona ganho produtivo na relação entre a quantidade de energia extraída e fonte energética utilizada (JORDAN et al., 2012).

### **2.2 Energia Solar e Equipamentos Fotovoltaicos**

A energia solar fotovoltaica resulta da conversão da radiação solar em eletricidade através de materiais semicondutores, sendo definido como efeito fotovoltaico (KEMERICH et al., 2016). No entanto, para que a energia elétrica seja produzida através dos raios solares que chegam até a célula fotovoltaica, uma pequena corrente elétrica é produzida, sendo então captada pelos contatos elétricos na célula e distribuída para os demais componentes do sistema, uma vez que quanto

maior o número de células fotovoltaicas conectadas em série, maior a tensão produzida (PEREIRA et al., 2006).

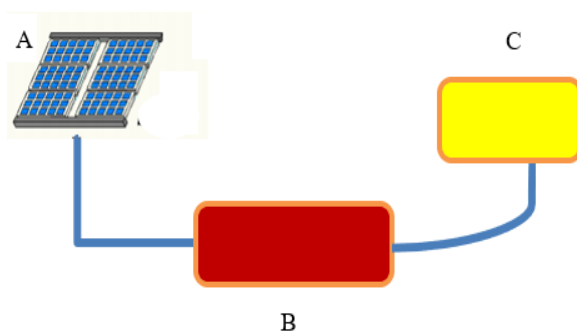


Figura 1: Croqui de uma configuração básica de um sistema fotovoltaico de geração de energia (CRESESB, 2006). Fonte: CRESESB (2006).

- A (Célula Fotovoltaica): superfície plana composta por silício policristalino ou mono cristalino, que capta e absorve a energia luminosa proveniente dos raios solares (radiação);
- B (Unidade de Controle): dispositivo eletrônico que permite a verificação de funcionamento do sistema, desde a energia produzida em Watts, passando pela carga elétrica em Volts, que determina a amperagem e a quantidade de rotações da bomba mediante a energia produzida;
- C (Equipamento): no estudo foi utilizada uma bomba submersa com a potência de 1 cv.

Em relação às energias renováveis e em especial os sistemas fotovoltaicos de geração de energia (SFGE), muito ainda há que se experimentar e ser descoberto no universo desses equipamentos, sempre no intuito de melhorar o aproveitamento energético dos raios solares através de conversores que, pela maior eficiência da sua atuação, permitirão que essa tecnologia revolucione o mercado energético mundial (SILVA, 2008).

### 2.3 Irrigação por energia solar

No Brasil, mais especificamente na região nordeste, a utilização da energia solar encontra boas condições para disseminação entre usuários residenciais, comerciais e agrícolas, uma vez que possui mais de 2.500 horas de brilho solar por ano, o que proporciona um custo-benefício aceitável (NASCIMENTO, 2004).

O estado da Bahia possui condições climáticas propícias para o uso da energia solar fotovoltaica na irrigação, uma vez que possui condições favoráveis quanto aos principais aspectos que devem ser levados em conta no potencial de geração de energia solar, tais como localização geográfica, radiação média incidente e a posição do relevo (GOMES et al., 2019).

As variações climáticas de precipitação e radiação configuram-se como o principal agente influenciador na quantidade de energia que será disponibilizada ao sistema solar fotovoltaico. O nordeste brasileiro sobressai-se como a região mais eficiente na produção energética com baixos índices anuais de precipitação e elevada radiação solar em relação a outras regiões brasileiras (FEITOSA et al., 2017).

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 SFGE, 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 trimestres 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).

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 SFGE, 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 95% nas culturas mútuas (DUARTE et al., 2019).

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).

## 2.4 Uniformidade de aplicação de água

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 de 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., 2012).

Neste sentido, a metodologia proposta por Keller e Karmelli (1975) para determinação da distribuição de distribuição de água em um sistema de irrigação, considera a determinação da vazão do primeiro emissor no início da linha lateral (LL); daquele emissor situado na distância de 1/3 do comprimento total da LL; daquele emissor localizado a 2/3 do comprimento total da LL; e do último emissor que está situado no final da LL. Esse procedimento deve ser 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. O procedimento deverá ser efetuado em todos os setores da área irrigada.

Em irrigação localizada, valores de CUC e CUD acima de 90% significam que o sistema de irrigação possui uniformidade de distribuição de água excelente (ZAGO, 2015).

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; ALMEIDA et al., 2013; KATSURAYAMA, 2015).

### 3. 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° 13` S, Longitude de 42° 46` W, 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 °C e precipitação média anual correspondente a 680 mm com período chuvoso entre os meses de novembro a março.

No dimensionamento do sistema solar fotovoltaico e da potência de bomba, o trabalho foi executado 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 uma maior eficiência do sistema de aplicação hídrica, cuja área será de 1.920 m<sup>2</sup> (Anexo 1).

Essa previsão inicial quanto ao equipamento a ser utilizado, bem como a análise posterior em campo para sua comprovação, visou referendar, através dos testes de uniformidade, os cálculos iniciais de perda de carga, pressão de serviço do emissor e pressão no início da linha lateral, aqui colocados no item 3.2.

Posteriormente, mediante o dimensionamento efetuado e definidos os comprimentos máximo e mínimo para as linhas laterais, passou-se para a etapa 2, com a montagem dos equipamentos em campo e a realização dos testes de uniformidade de aplicação de água, através dos coeficientes CUC, CUD e CUE.

Para que os coeficientes fossem calculados, utilizou-se como premissa para identificação do comportamento do referido SFGE, 03 avaliações ao longo do dia, as quais foram feitas pela manhã, ao meio-dia e pela tarde, em diversos horários em cada série de observação. Com isso, foi possível determinar uma curva de eficiência do sistema e, por conseguinte, referendar o manejo da irrigação a ser utilizado.

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.

Para realização das avaliações, inicialmente, o sistema 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 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 SFGE objeto deste trabalho.

Importante salientar que o sistema motobomba foi instalado numa 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 (onde está localizado o *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 teve o intuito de simular o uso do referido sistema na irrigação com água superficial, a exemplo de canais, lagos e barragens.

### **3.1 Equipamentos**

O material utilizado na pesquisa constou de 1 reservatório com capacidade para 2.000 L, 1 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 possuía 04 módulos solares do tipo policristalino, com capacidade cada placa de ofertar 335 W de potência, numa captação de radiação 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 °C e velocidade do vento de 1 m s<sup>-1</sup>). 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.

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 Figura 2 a seguir identifica o sistema que simulou a fonte de água superficial, bem como os equipamentos utilizados na pesquisa, quais sejam:

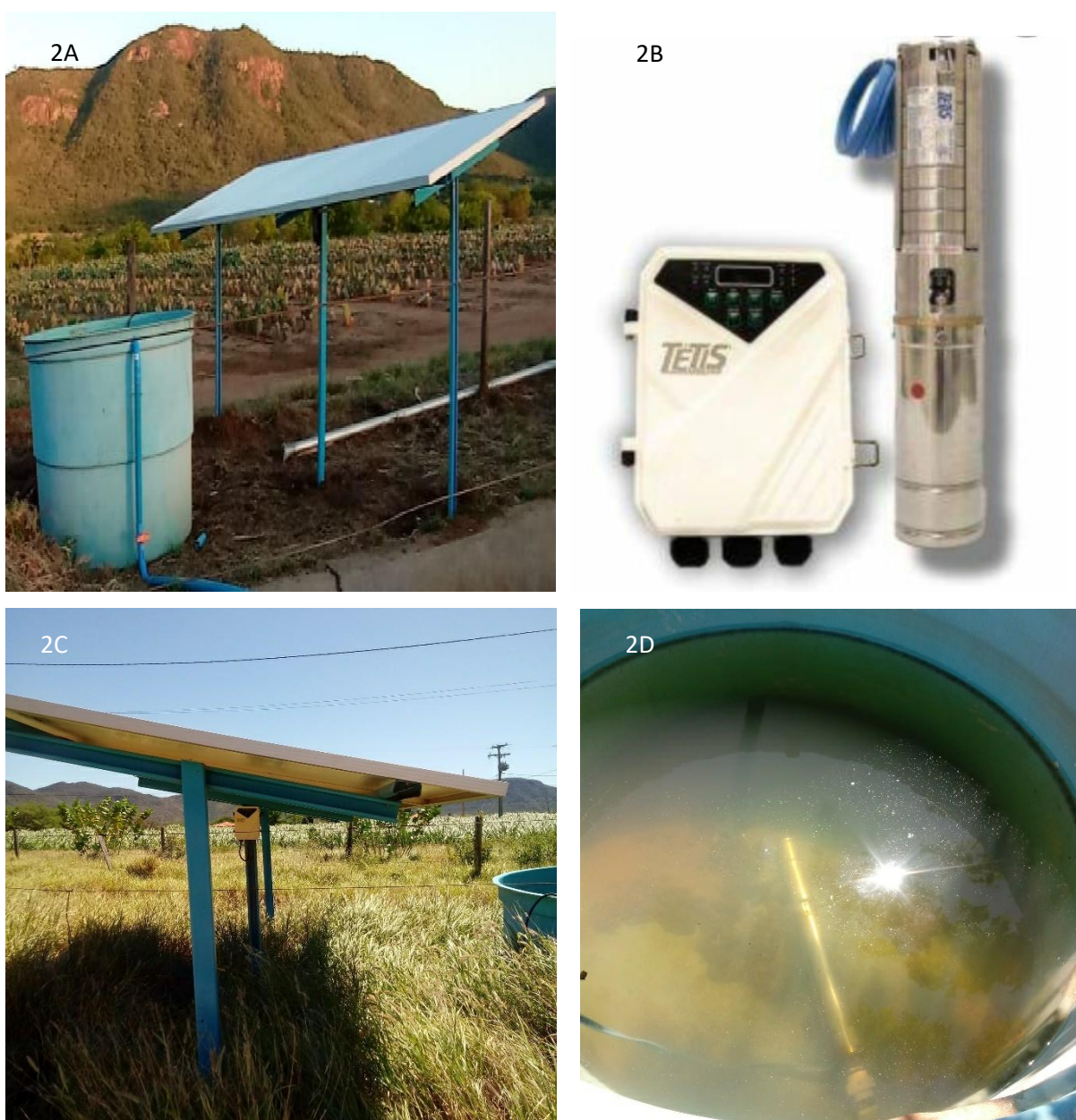


Figura 2: Sistema utilizado no bombeamento: Reservatório de 2 m<sup>3</sup> com detalhe para o cano de abastecimento e os módulos solares fotovoltaicos (A); detalhamento do painel de controle e da motobomba utilizada (B); painel de controle instalado abaixo ao centro das placas (C); e reservatório com o sistema motobomba instalado (D).

A linha principal foi de PVC Rígido, DN 50, PN 40, com comprimento de 114 m. 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 04 comprimentos de linhas laterais: 30, 40, 50 e 60 m, com 8 repetições para cada comprimento, totalizando 1.440 metros, conforme anexo 1 e figura 3 abaixo:



Figura 3: Disposição das linhas laterais no sentido longitudinal (A) e no sentido perpendicular (B), espaçadas a cada 90 cm entre si.

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 (Figura 4) medidos previamente para recolhimento de água e uma proveta de 250 mL para aferição.



Figura 4: Disposição dos coletores instalados para recolhimento de água.



### 3.2 Estimativa de Comprimento Ideal de Linha Lateral

No desenvolvimento de projetos de irrigação é comum tratar de maneira compartimentalizada as etapas de estudo, quais sejam de viabilidade, de planejamento, de dimensionamento e de construção. Sendo assim, várias equações são feitas no sentido de que o dimensionamento hidráulico seja aquele que mais fielmente representará as condições de campo do sistema a ser implantado. Portanto, para o dimensionamento do referido sistema de irrigação, foram utilizadas as Equações 1, 2, 3, 4 e 5:

$$P_{in} = PS + (0,75xhfL) \pm 0,5x\Delta NL \quad (1)$$

em que:

$P_{in}$  = pressão no início da linha lateral, em m;

$PS$  = pressão de serviço do emissor, em m;

$hfL$  = perda de carga na linha lateral, em m; e

$\Delta NL$  = 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:

$H_f$  = perda de carga localizada, em m;

$f$  = fator de atrito, adimensional;

$L$  = comprimento da tubulação, em m;

$D$  = diâmetro da tubulação, em m;

$V$  = velocidade da água, em  $m\ s^{-1}$ ;

$g$  = aceleração da gravidade, em  $m\ s^{-2}$ ; e

$F$  = fator de múltiplas saídas, adimensional.

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

em que:

$g$  = aceleração da gravidade, em  $m\ s^{-2}$ ;

$\varphi$  = Latitude, em graus; e

$H$  = Altitude, em Km.

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

em que:

$f$  = fator de atrito calculado, adimensional;

$\epsilon_{abs}$  = rugosidade absoluta (0,001 m m<sup>-1</sup>, para polietileno);

$D$  = diâmetro da tubulação, em m;

$NR$  = número de Reynolds, adimensional; e

$f$  = fator de atrito estipulado, adimensional.

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

em que:

$NR$  = número de Reynolds, adimensional;

$V$  = velocidade da água, em m s<sup>-1</sup>;

$D$  = diâmetro da tubulação, em m;

$P$  = viscosidade cinemática, em m s<sup>-2</sup>.

### 3.3 Teste de Uniformidade

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 feitas, 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 02 manômetros de glicerina instalados,

um na saída da bomba e outro no início da área experimental, conforme a Figura 5 abaixo.

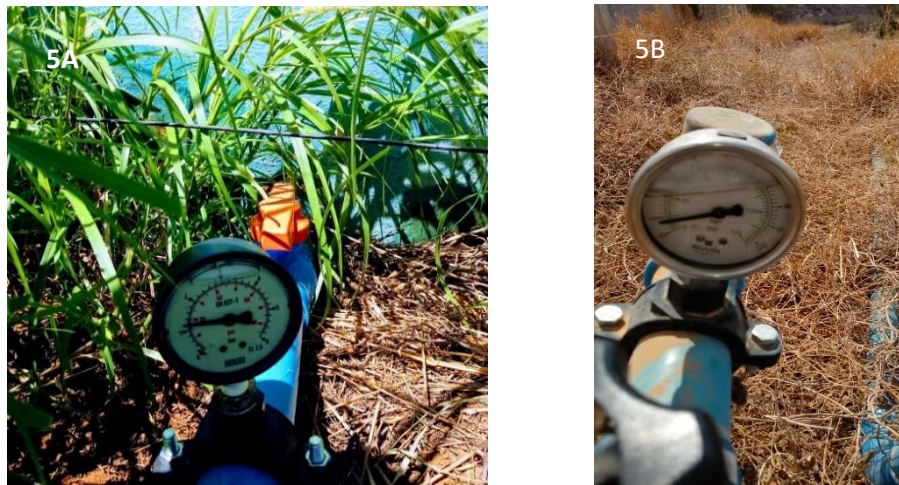


Figura 5: Detalhamento dos manômetros de glicerina instalados na saída da bomba (A) e no início da área (B).

A avaliação da uniformidade de distribuição de água foi feita conforme metodologia proposta por Keller e Karmelli (1975), utilizando-se os seguintes coeficientes:

### 3.3.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

Este coeficiente foi elaborado no sentido de se adotar o desvio médio absoluto como medida de dispersão, o qual recebeu o sobrenome do autor (CHRISTIANSEN, 1942), calculado pela Equação 6:

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

em que:

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

$Q_i$  = vazão de cada emissor ( $L h^{-1}$ );

$Q$  = média das vazões coletadas de cada gotejadores ( $L h^{-1}$ ); e

$n$  = número de coletas.

### 3.3.2 Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Proposto por Criddle et al. (1956), esse coeficiente prediz a razão entre a média do menor quartil e a vazão média coletada, conforme a Equação 7:

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

em que:

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

$q_{25\%}$  = média do menor quartil entre as vazões coletadas ( $L h^{-1}$ ); e

$qm$  = vazão média entre todos os emissores ( $L h^{-1}$ ).

### 3.3.3 Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)

Esse coeficiente de uniformidade foi apresentado por Wilcox e Swailes (1947), o qual utiliza-se do desvio-padrão como medida de dispersão, para o qual são admitidos valores acima de 75%, calculado através da equação 8.

$$CUE = 100 * \left( 1 - \frac{sd}{Qmed} \right) \quad (8)$$

em que:

CUE = coeficiente de uniformidade estatístico (%);

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

$Qmed$  = 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 abaixo indicada por 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, a saber:

Tabela 1: Interpretação dos valores de 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 8 repetições para cada comprimento de linha lateral (30, 40, 50 e 60 m), com 4 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.

A verificação hídrica fez-se através da sua execução em períodos diversos ao longo do dia, isto é, pela manhã, ao meio-dia e pela tarde, em horários distintos e em condições diferentes de radiação e nebulosidade. Buscou-se, então, analisar o funcionamento do SFGE através de seus coeficientes de uniformidade de aplicação de água, em diversos horários ao longo do dia, de maneira que, conforme a radiação incidisse nas placas solares, fosse verificada sua respectiva conversão em potência para o sistema e, por conseguinte, sua culminância na vazão coletada, totalizando 1.280 coletas.

As pressões e os comprimentos de linha foram dimensionados previamente via cálculos hidráulicos, utilizando-se a equação universal de Darcy-Weisbach e equação de Colebrook-White para fator de atrito, respeitando-se algumas regras, tais como:

- i) Que os valores máximo e mínimo para a variação de vazão ( $\Delta Q$ ) não fossem superiores a 10% e 4%, respectivamente;
- ii) Que a variação de pressão ( $\Delta P$ ) máxima ao longo da linha lateral fosse de 21% da pressão de serviço do emissor.

### **3.4 Análise de Viabilidade Econômica**

Outro aspecto de observação que a pesquisa oferece diz respeito à análise de viabilidade econômica que foi simulada, ao comparar o retorno de capital investido de um sistema de irrigação por gotejamento que utiliza energia elétrica convencional, em relação à irrigação por gotejamento quando a energia é oriunda de um sistema fotovoltaico, conforme metodologia utilizada por Oliveira et al. (2021).

Para tanto, foram feitas duas simulações de utilização dos dois sistemas mencionados (movidos a energia solar fotovoltaica e a energia convencional), para o cultivo de maracujá amarelo no município de Ribeira do Pombal, região nordeste da Bahia, onde o valor médio do quilo da fruta pago ao produtor varia entre R\$ 2,00 (preço mínimo) e R\$ 3,33 (preço máximo). Utilizou-se tal metodologia para avaliar a

viabilidade econômica do investimento através de equações que calculam o custo de produção (CP), os custos totais anuais (CT), o valor do sistema de irrigação (VSI), a produtividade esperada (Ye), as receitas (R), o lucro acumulado (LA), o benefício líquido (BL), o payback (PB) e o valor presente líquido (VPL).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos os seguintes dados para as etapas 1 (subitem 4.1) e 2 (subitem 4.2), a saber:

##### 4.1 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 ( $h_f$ ), pressão de serviço (PS) e pressão no início ( $P_{in}$ ) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm:

L (m)	$H_f$ (KPa)	PS (KPa)	$P_{in}$ (KPa)
56	7,922	40	45,941
56	8,778	45	51,584
57	12,669	65	74,502
58	17,509	89	102,132
58	20,865	108,9	124,549
59	25,716	131,1	150,387

Tabela 3: Comprimentos mínimos de linha lateral, de acordo com a perda de carga ( $h_f$ ), pressão de serviço (PS) e pressão no início ( $P_{in}$ ) da linha lateral, para tubos de polietileno de diâmetro igual a 13 mm:

L (m)	$H_f$ (KPa)	PS (KPa)	$P_{in}$ (KPa)
40	3,661	47,1	49,870
41	5,555	70,6	74,852
42	7,420	89	94,431
42	7,611	94,2	99,957
42	9,239	117,8	124,740
43	11,547	141,3	150,030

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.

## 4.2 Teste de Uniformidade

### 4.2.1 Teste de uniformidade com todas 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). Nas Figuras 6 a 8 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.

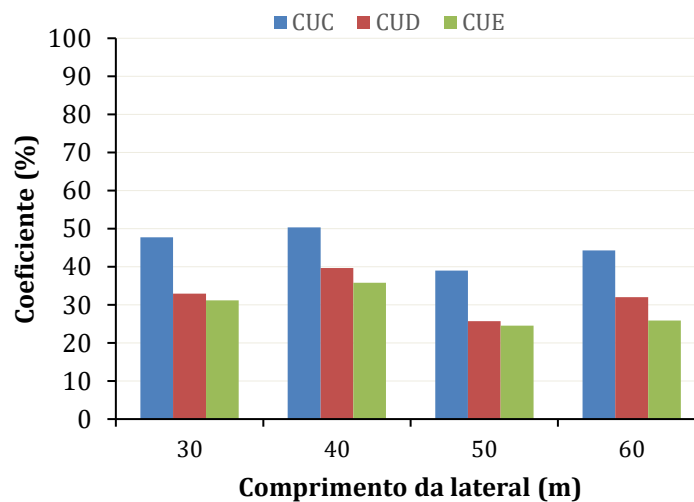


Figura 6: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da manhã, sem calibração da pressão de serviço.



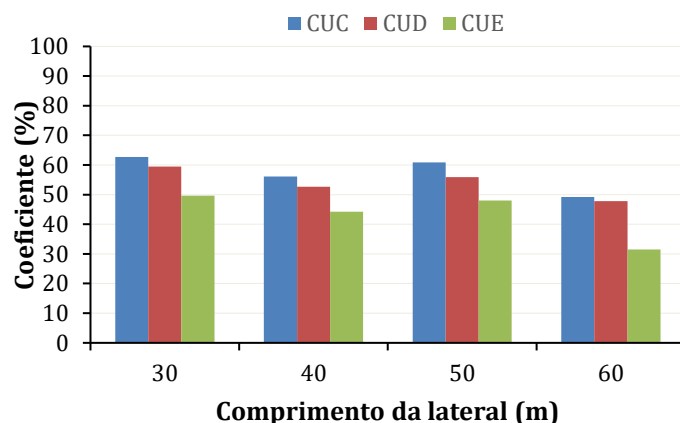


Figura 7: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período do meio-dia, sem calibração da pressão de serviço.

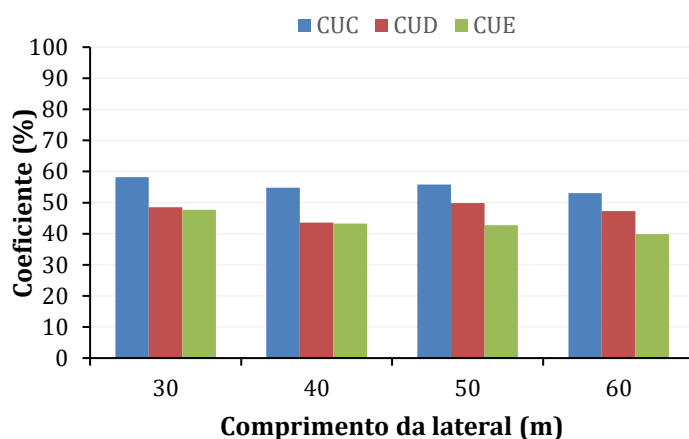


Figura 8: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da tarde, sem calibração da pressão de serviço.

Os resultados expressos nas Figuras 6 a 8 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 proposta pelo fabricante ( $2,0 \text{ L h}^{-1}$ ).



Figura 9: Piezômetro instalado no início da área com detalhe para altura da água.

Foi utilizado um piezômetro (conforme a Figura 9) para verificação da pressão que a água alcançava no início do terreno, 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.

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. Na Figura 10 ilustra-se as médias para os valores de CUD, CUD e CUE, considerando os três períodos avaliados, nos quatro comprimentos de LL.

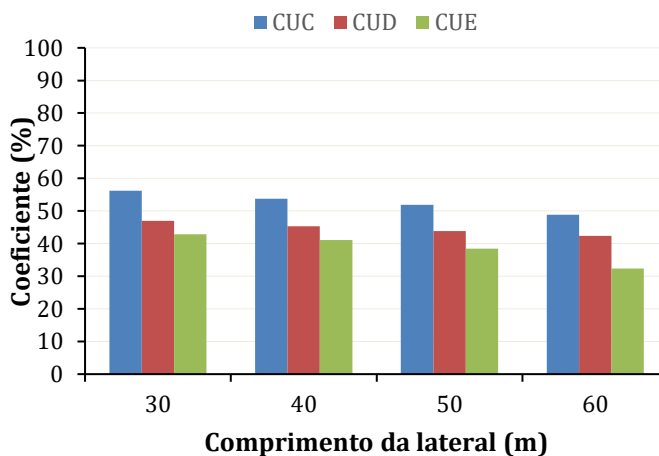


Figura 10: Comparativo de coeficientes sem a calibração da pressão de serviço e independentemente do horário.

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 10 indicam também que, sem a calibração da pressão de serviço no início da LL, 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.

Na Figura 11, são exibidas as equações de regressão dos coeficientes CUC, CUD e CUE, sem calibração da pressão de serviço, em função do comprimento da LL, independentemente do horário de observação.

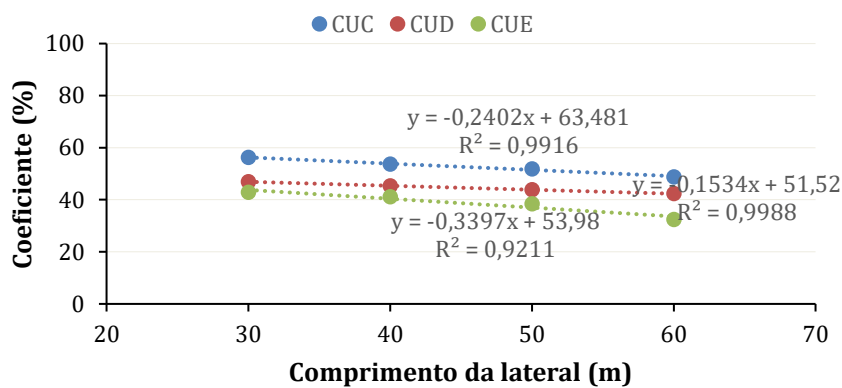


Figura 11: Equações de regressão dos coeficientes CUC, CUD e CUE, sem calibração da pressão de serviço, em função do comprimento da LL, independentemente do horário de observação.

Pela análise da Figura 11, é possível visualizar que, por qualquer dos coeficientes analisados, a uniformidade de distribuição de água, piora com o aumento do comprimento da LL.

#### 4.2.2 Teste de uniformidade com calibração da pressão 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.

Nas Figuras 12 a 14 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.

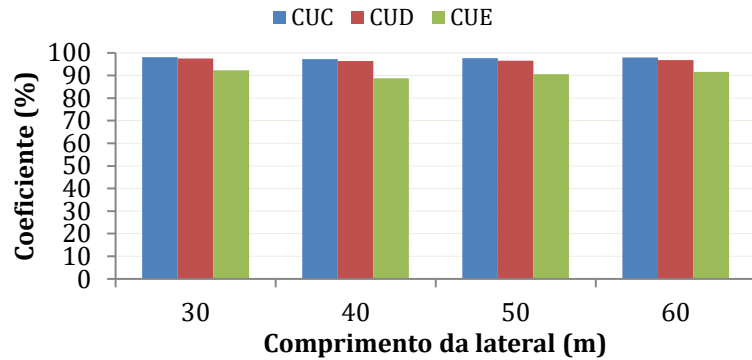


Figura 12: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da manhã, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.

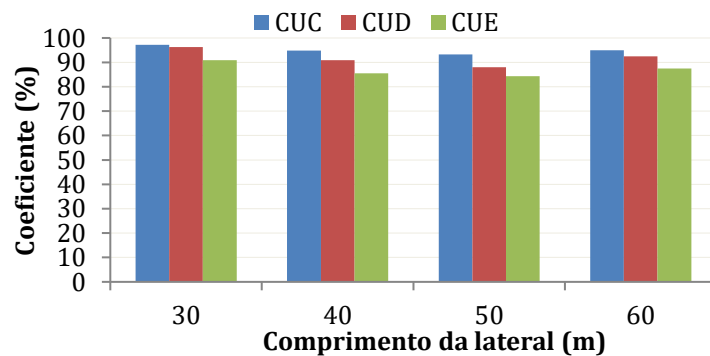


Figura 13: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período do meio-dia, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.

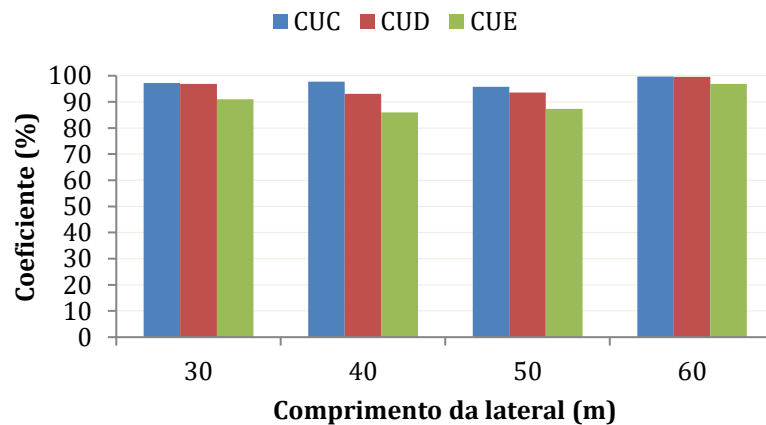


Figura 14: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água no período da tarde, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa.

Os dados que compõem a Figura 15 indicam as médias para os valores de CUD, CUD e CUE, considerando-se os três períodos de avaliação (independentemente do horário), nos quatro comprimentos de linha lateral, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa através do fechamento de um comprimento de linha. Portanto, permanece três comprimentos de linha lateral, em qualquer configuração de fechamento entre os quatro comprimentos utilizados.

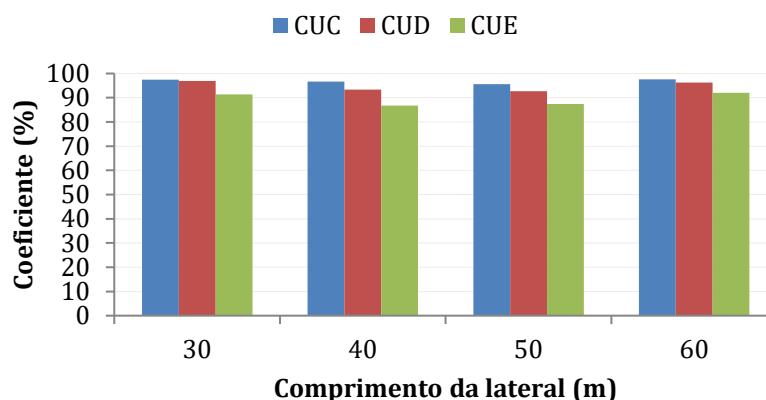


Figura 15: Coeficientes de uniformidade de distribuição de água, com calibração da pressão de serviço em 101 KPa, independentemente do horário.

Analisando-se a Figuras 12 a 15, 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 50 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).

Tais parâmetros foram utilizados por Nascimento (2018) para avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento, cuja fonte energética foi composta por módulos solares fotovoltaico, o qual concluiu que o sistema de irrigação na condição indoor (cultivos em ambientes fechados), para os dias de céu aberto, apresentou maiores valores médios de CUC e CUD na estação do outono, iguais a 91,01 % e 83,73 %, respectivamente.

Avaliando o coeficiente de uniformidade estatístico médio (CUE) de um sistema de irrigação por gotejamento, Lima et al. (2017) encontraram valores de até 93,15%,

bem como a eficiência de aplicação ( $E_a$ ), analisada em cinco diferentes pressões de serviço, com valores superiores a 80%, 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 mangueira 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. Verificou-se ainda que a diferença entre os dados obtidos para os coeficientes analisados permite concluir que em todos os comprimentos de linha utilizados, foram obtidos níveis muito satisfatórios de uniformidade para CUC, CUD e CUE, independentemente do período do dia observado.

Outro detalhe que ficou demonstrado mais nas Figuras 14 e 15 foi a influência direta do ambiente na uniformidade de aplicação de água. Nota-se por meio das figuras, que o comprimento de 60 m. resultou, relativamente, em uma uniformidade maior para os valores de 30 a 50 m., o que pode ser explicado através dos dados de radiação a seguir, demonstrados pela Figura 16 abaixo.

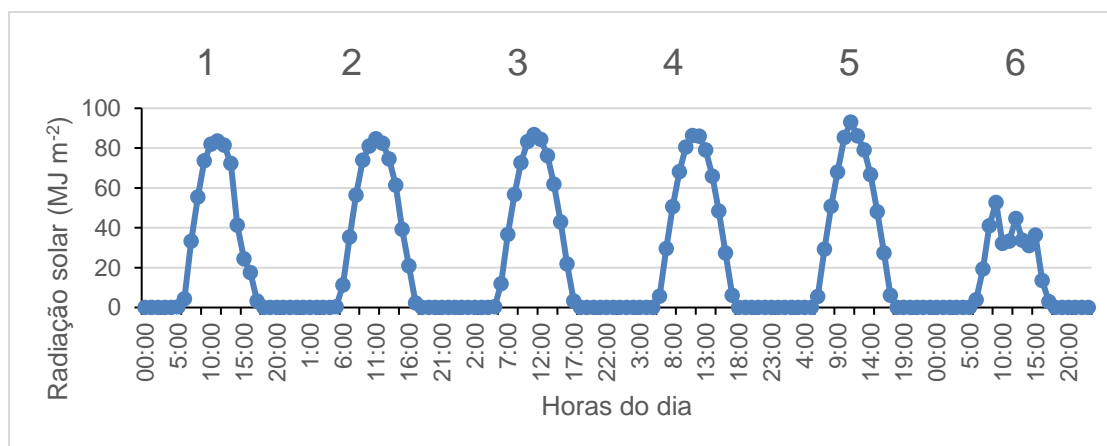


Figura 16: Radiação solar em dias de coletas de água para as duas metodologias empregadas, em que 1 (dia 24/09/2020), 2 (dia 25/09/2020), 3 (dia 27/09/2020), 4 (dia 23/03/2021), 5 (dia 24/03/2021) e 6 (dia 08/04/2021).

A Figura 16 corrobora para a explicação do fenômeno descrito acima, onde o valor de uniformidade de aplicação de água foi maior no comprimento de 60 m. do que nos outros comprimentos. Nota-se que no último dia de coleta ocorreu uma queda nos dados de radiação, o que interferiu significativamente para que os comprimentos de 30 a 50 m. ficassem com valores de uniformidade abaixo do comprimento de 60 m.

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 observam valores mínimos de radiação capazes de gerar energia se deram por volta das 6:06 hs. no período da manhã e das 17:48 hs. no período da tarde, cujos valores médios observados nesses períodos são 2,65 e 4,01, respectivamente.

Concomitantemente, a tensão elétrica em Volts e a potência produzida em Watts obtiveram 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 numa baixa produção de energia.

#### 4.3. Viabilidade Econômica

Vale a pena ressaltar que os dados da viabilidade econômica foram simulados para captação de água em superfície, numa mesma potência de bomba (3 cv) e em uma área de 1 hectare plantado com a cultura do maracujá amarelo. Os dados com os valores máximo e mínimo para a região analisada estão contidos nas tabelas 4 e 5, a seguir:

Tabela 4: Viabilidade econômica para o cultivo do maracujá amarelo em sistemas de irrigação por gotejamento, movidos a energia solar fotovoltaica e energia elétrica convencional, com preço de R\$ 2,00 pago ao produtor na região de Ribeira do Pombal – BA, ao longo de 3 anos por ciclo de plantio.

Variáveis Calculadas	Energia Solar Fotovoltaica	Energia Elétrica Convencional
<b>Custo de Produção</b>	14.422,90	26.982,90
<b>Custo Total</b>	37.063,85	75.607,17
<b>Valor do Sistema de Irrigação</b>	20.255,00	10.555,30
<b>Produtividade Esperada (kg)</b>	65.000	65.000
<b>Receitas</b>	130.000	130.000
<b>Lucro Acumulado</b>	106.478,07	107.087,94
<b>Benefício Líquido</b>	-13.741,75	-17.607,17
<b>Payback</b>	1 ano	1 ano
<b>Valor Presente Líquido</b>	R\$ 51.380,24	R\$ 48.367,49

Pelos dados apresentados na simulação da Tabela 4 acima, verifica-se que com o valor de R\$ 2,00 pago ao produtor, o Payback foi de 1 ano para ambas fontes de energia. Isso indica que para os dois sistemas analisados, o capital investido é recuperado logo no primeiro ciclo de plantio

Tabela 5: Viabilidade econômica para o cultivo do maracujá amarelo em sistemas de irrigação por gotejamento, movidos a energia solar fotovoltaica e energia elétrica convencional, com preço de R\$ 3,33 pago ao produtor na região de Ribeira do Pombal – BA, ao longo de 3 anos por ciclo de plantio.

<b>Variáveis Calculadas</b>	<b>Energia Solar Fotovoltaica</b>	<b>Energia Elétrica Convencional</b>
<b>Custo de Produção</b>	14.422,90	26.982,90
<b>Custo Total</b>	37.063,85	75.607,17
<b>Valor do Sistema de Irrigação</b>	20.255,00	10.555,30
<b>Produtividade Esperada (kg)</b>	65.000	65.000
<b>Receitas</b>	130.000	130.000
<b>Lucro Acumulado</b>	286.028,07	286.637,94
<b>Benefício Líquido</b>	24.828,25	20.962,83
<b>Payback</b>	1 ano	1 ano
<b>Valor Presente Líquido</b>	R\$ 128.755,94	R\$ 125.743,19

Os dados da simulação na Tabela 5 também permitem concluir que quando o valor pago ao produtor corresponde ao valor máximo de mercado de R\$ 3,33 para a região de Ribeira do Pombal – BA, o Payback, tanto para energia elétrica convencional, quanto para energia solar fotovoltaica, apresentou retorno de investimento já no primeiro ano do primeiro ciclo de plantio.

Verificou-se ainda que, em ambas simulações, o VPL é maior no sistema de irrigação que utiliza energia solar fotovoltaica, o que indica melhor retorno de capital investido ao longo do tempo, por conseguinte, melhor viabilidade econômica.



## **5. CONCLUSÕES**

Diante dos resultados observados nos dois métodos empregados, o SFGE utilizado na pesquisa, com potência de bomba com 1 cv e 04 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, operando-se com o controle da pressão de serviço no início da área.

Calibrando-se a pressão de serviço no início da área em 101 KPa através do fechamento de um comprimento de linha (qualquer comprimento), a uniformidade de distribuição de água é excelente, independentemente do comprimento da linha lateral, considerando-se comprimentos de 30 a 60 m.

O sistema se comporta de maneira ineficiente quando não há calibração da pressão de serviço no início da área.

O retorno de capital investido para a cultura do maracujá, tanto para energia solar fotovoltaica, quanto para energia elétrica convencional, não somente no valor mínimo, como também para o valor máximo pago ao produtor, acontece no primeiro ciclo de plantio, sendo a energia solar fotovoltaica a que apresenta maior valor presente líquido e, conseqüentemente, melhor viabilidade econômica.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A radiação solar proporciona muitas vantagens como fonte de energia na geração de eletricidade para os diversos segmentos da economia e da sociedade. A perspectiva de crescimento do uso da tecnologia fotovoltaica e sua difusão no cenário brasileiro, apontam para um melhor custo/benefício e maior acessibilidade para que pessoas de menor poder aquisitivo possam obtê-la.

Nos últimos anos verifica-se, no semiárido brasileiro, uma proliferação maciça desse aparato tecnológico para o fornecimento de energia em pequenas comunidades e propriedades rurais sem acesso à energia elétrica. Muito se especula sobre a autonomia e eficiência do sistema, principalmente no que tange aos cultivos irrigados. No entanto, este trabalho buscou responder a esses questionamentos de ordem técnica, no intuito de gerar conhecimento para os produtores e oportunidades de se realizar discussões e a proposição de estudos no meio acadêmico sobre o tema.

No semiárido brasileiro, a energia solar fotovoltaica pode ser mais uma ferramenta utilizada, por meio de políticas públicas, nas diversas esferas de governo,

para amenizar questões de qualidade de vida e produtivas em regiões isoladas onde a energia elétrica convencional se mostra inexistente ou deficitária.

Almeja-se que este trabalho ofereça aos produtores irrigantes a visão crítica para utilização mais eficiente da tecnologia fotovoltaica, cuja recomendação técnica proporcione uma maior aplicação de água na medida que aumente também a eficiência de uso da água, o que faz com que esta pesquisa seja uma ferramenta indicativa do manejo da irrigação que propicie os resultados esperados pelos produtores.

Aliar as observações da pesquisa e levar informações, numa perspectiva mais facilitada aos produtores, através da própria assistência técnica em campo, seminários e palestras, faz-se necessário, uma vez que o aprendizado proporcionado possa, posteriormente, ser transmitido às comunidades de interesse.

Não obstante, o Instituto Federal de Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, ao firmar parceria com a Empresa Brasmáquinas, celebra não apenas um acordo de cooperação técnica, mas também uma demonstração de que a pesquisa visa responder às indagações não apenas acadêmico-científicas, como também técnicas de extensionistas para assistência aos produtores rurais.

Espera-se que estudos futuros levem ao desenvolvimento de novas metodologias e ferramentas, que propiciem a melhoria da eficiência desse sistema de irrigação com o uso de módulos solares fotovoltaicos, para que a geração de energia elétrica, em sincronia com as demandas da indústria, possa encontrar sua aplicabilidade em benefício do consumidor final, sendo assim, uma realidade palpável proposta para otimizar o uso dos recursos naturais com aumento da produtividade no meio rural.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, R. L. S., Chaves, L. H. G., Silva, E. F., Silva, R. L., Almeida Filho, R. L. S. **Uniformidade de aplicação de água em um sistema de irrigação por gotejamento com duas fitas por fileira de planta.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, XLII, 2013 Fortaleza – CE. Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/94032/1/uniformidade-de-aplicacao.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas da Irrigação. Uso da água na Agricultura Irrigada.** Brasília: ANA, p. 86, 2017.
- Bernardo, S., Soares, A. A., Mantovani, E. C. **Manual de irrigação.** 8. Ed., Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.
- Brasil. **Resolução Normativa Nº 482**, de 17 de Abril de 2012. 2012.
- Christiansen, J. E. **Irrigation by sprinkling.** Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. Bulletin, 670.
- Criddle, W. D., Davis, S., Pair, C. H., Shockley, D. G. **Methods for evaluating irrigation systems.** Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24p. Agricultural Handbook, 82.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Energia Solar: Princípios e Aplicações. **Tutorial Solar**, 2006.
- Duarte, I. N. A. F.; Lucena, K. F. M.; Amaral, R. L.; Nascimento, F. D. **Sistema de irrigação por microtubos utilizando energia solar fotovoltaica.** In: VI ENCONTRO INTERNACIONAL DE JOVENS INVESTIGADORES. Anais III, Salvador, 2019. Disponível em <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/50164>. Acesso em: 26 de jan. 2021.
- Feitosa, F. E. C. S.; Belo, R. C. R.; Santos, J. R. N.; Araújo, M. L. S; Santos, J. S.; Silva, F. B. Influência das Mudanças de Tempo e Variabilidade Climática sobre a Produção de Energia Fotovoltaica no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 06, p. 1959 - 1973, 2017.
- Folegatti, M. V.; Casarini, E.; Blanco, F. F.; Brasil, R. P. C. do; Resende, R. S. **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças.** Guaíba. Agropecuária, 2001. v. 2, 336 p.

Gomes, R. L.; Cerqueira, A. H.; Strenzel, G. M. R.; Pereira, Y. C. Mapeamento do potencial solar para microgeração de energia elétrica: O caso da cidade de Ilhéus. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 31, p. 1 – 22, Uberlândia, 2019.

Jordan, R. A.; Gomes, E. P.; Biscaro, G. A.; Motomiya, A. V. A.; Geisenhoff, L. Impacto energético da irrigação por gotejamento no cultivo de mamona. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 375-382, 2012.

Katsurayama, G. T. **Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

Keller, J., Karmeli, D. **Trickle irrigation design**. Rain bird sprinkler manufacturing corporation, 1975.

Kemerich, P. D. C., Flores, C. E. B., Borba, W. F., Silveira, R. B., França, J. R. Levandoski, N. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v.20, n. 1, p. 241-247, 2016.

Lana, L. T. C., Almeida, E., Dias, F. C. L. S., Rosa, A. C., do Espírito Santo, O. C., Sacramento, T. C. B., Braz, K. T. M. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2016.

Lima, M. G. M., Neto, J. D., Ferreira, D. 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**, v.12, n.1, p. 167-171, 2017.

Maia, C. E., Levien S. L. A., de Medeiros, J. F., Dantas Neto, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 1, p. 149-158, jan-mar, 2010.

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., DE LIMA, L. C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. **Revista Tecnologia**, v. 30, n. 2, 2009.

Oliveira, F. G., Barros, A. C., Santos, M. R., Reis, J. B. R. S. Análise da viabilidade econômica na implantação de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, v. 42, n. 313, p. 91-100, 2021.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L. de., Rütther, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

Nascimento, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Trabalho de conclusão de curso (Especialização)-Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.

Nascimento, L. F. J. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água**. Dissertação (Mestrado em energia na agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018, 155 p.

Pereira, M. E. M., de Lima Junior, J. A., Lima, V. M., de Gusmão, S. A. L., de Oliveira, P. D., da Silva, A. L. P. Viabilidade econômica da produção de couve-flor irrigada por gotejamento no Nordeste Paraense. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, 2018.

Sant'Anna, V. R. de S., Oliveira, F. G., Moraes, M. J., Reis, J. B. R. da S. Uso de energia solar fotovoltaica na agricultura irrigada. **Informe Agropecuário**, v. 42, n. 313, p. 79-90, 2021.

Silva, A. N. M. **Sistema de conversão da energia solar fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008, 125 p.

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

Testezlaf, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas, SP. Unicamp/FEAGRI, 2017.

Vilas Boas, R. C., Pereira, G. M., De Souza, R. J., Consoni, R. Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 117-124, 2011.

Wilcox, J. C., Swailes, G. E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v.27, n.11, p.565-583, 1947.

Zago, E. A. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando energia fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017, 49 p.

Zanetti Neto, G., Costa, W. T., Vasconcelos, V. B. A resolução normativa no 482/2012 da ANEEL: possibilidades e entraves para a microgeração distribuída. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, n. 2, 2014.

# Anexo 1: Croqui da área experimental da fase 2

