**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desenvolvimento de um kit de irrigação por microtubos com moto-
bomba propulsão por energia solar**

Luiz Ricardo Sobenko

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Luiz Ricardo Sobenko
Engenheiro Agrônomo

**Desenvolvimento de um kit de irrigação por microtubos com moto-bomba
propulsionada por energia solar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Sobenko, Luiz Ricardo

Desenvolvimento de um kit de irrigação por microtubos com moto-bomba propulsionada por energia solar / Luiz Ricardo Sobenko. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Energia solar fotovoltaica 2. Bombeamento de água 3. Microirrigação 4. Olericultura
I. Título

CDD 631.7
S677d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Somente uma página não é o suficiente para agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização do presente trabalho. Tentarei, de forma resumida, agradecer àqueles que presenciaram este momento.

Primeiramente, aos meus pais Luiz Carlos e Vera Lúcia, pelo amor e apoio dedicados a mim em minha vida, e por terem me proporcionado a oportunidade de realizar, além da graduação, a pós-graduação.

À minha irmã Luciane e ao meu cunhado Jeferson, pelas assistências e conselhos dados a mim.

Ao orientador professor Dr. Tarlei Arriel Botrel, por ter confiado em meu potencial, por sua paciência e compreensão, e pelos seus ensinamentos e conselhos passados.

À Luanna e aos amigos Eder, Otávio, Maicon, Liz, Thiago e Bruno pelo apoio, amizade e companheirismo dentro e fora da universidade, que foram de fundamental importância e motivação para dar continuidade.

Aos amigos Dr. Robson André Armindo e Dr. Edilson Batista de Oliveira pelos conhecimentos transmitidos a mim durante a graduação, servindo de base para meu desenvolvimento durante o curso do mestrado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” por ter me acolhido e por ter me dado a oportunidade de adquirir novos conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB), em especial ao Gean, Ezequiel, Antônio e Douglas pela ajuda e conselhos dados durante as etapas do trabalho.

Aos funcionários do LEB, em especial ao Sr. Antônio, Sr. Luís, Gilmar, Paula Bonassa e Davilmar, pelo apoio e atenção nos momentos em que precisei.

“Se estudar é luz, então, poupe energia.”

Ana Carolina

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS.....	17
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Irrigação localizada por microtubos.....	23
2.2 Avaliação de sistemas de irrigação	27
2.3 Bombeamento de água por meio de energia solar.....	29
2.4 Custos do bombeamento de água por meio de energia elétrica	33
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Dimensionamento e avaliação dos emissores e das linhas laterais	35
3.1.1 Determinação do diâmetro interno do microtubo.....	35
3.1.2 Dimensionamento dos microtubos e das linhas laterais.....	36
3.1.3 Montagem das linhas laterais.....	37
3.1.4 Avaliação da uniformidade da linha lateral em laboratório	38
3.2 Escolha e avaliação do conjunto de bombeamento por energia solar	39
3.2.1 Necessidade máxima de irrigação	39
3.2.2 Parâmetros necessários para escolha do conjunto de bombeamento	40
3.2.3 Avaliação da bomba hidráulica.....	42
3.3 Instalação do kit de irrigação em canteiros de cultivo de alface.....	42
3.3.1 Componentes do sistema de bombeamento e variáveis avaliadas	43
3.3.2 Preparo da área e plantio	47
3.3.3 Manejo da irrigação	48
3.3.4 Colheita	48
3.3.5 Avaliação da uniformidade do sistema de irrigação em campo.....	49
3.3.6 Custos e economia de energia.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Dimensionamento do sistema de irrigação por microtubos	51
4.2 Avaliação do kit de irrigação em laboratório.....	52
4.3 Avaliação do kit de irrigação a campo	53
4.4 Avaliação da produção da cultura da alface.....	57
4.5 Custos e economia de energia.....	57
5 CONCLUSÕES	59

REFERÊNCIAS	61
-------------------	----

RESUMO

Desenvolvimento de um kit de irrigação localizada por microtubos com moto-bomba propulsão por energia solar

O bombeamento de água por meio da energia solar vem se mostrando uma alternativa para localidades onde outras fontes de energia não estão disponíveis ou são limitadas. Torna-se interessante aliar essa alternativa a um sistema de irrigação que opera com vazão e pressão relativamente baixas, como a irrigação localizada por microtubos, possibilitando assim a obtenção de alta eficiência. No presente trabalho teve-se por objetivo dimensionar e avaliar um kit de irrigação por microtubos, alimentado por bomba acionada com energia solar; e apresentar o custo e a economia de energia obtida com a utilização do kit desenvolvido. O kit foi composto por linhas laterais de irrigação, moto-bomba de deslocamento positivo (DC), gerador fotovoltaico, bateria, controlador de carga e válvulas solenóides. Assim, três etapas foram realizadas sendo o dimensionamento e avaliação dos emissores e das linhas laterais; a escolha e a avaliação do conjunto de bombeamento por energia solar; e, por fim, a instalação do kit em quatro canteiros de irrigação de cultivo de alface para avaliação do kit de irrigação. Em laboratório, as linhas laterais apresentaram “excelente” uniformidade (maior que 95,8%) para os três coeficientes de uniformidade avaliados; e a moto-bomba selecionada potencializou a irrigação de até 15 canteiros (270 m²) com rendimento de 10,8%. Nos canteiros, o sistema de irrigação também apresentou “excelente” uniformidade (maior que 94,7%) para os coeficientes avaliados. Nos maiores tempos observados, o sistema de bombeamento apresentou rendimentos do conjunto moto-bomba, de conversão e global de 9,7%, 36,6% e 2,4%, respectivamente. O custo fixo total de implantação do kit desenvolvido para a irrigação de 15 canteiros foi de R\$ 4.313,33 com automação, ou R\$ 3.088,33 sem automação. Na área e no período avaliado, o kit desenvolvido promoveu economia de energia de 4,5 kWh. Simulando-se o cultivo da alface por um ano, estimou-se uma economia de 63 kWh. Assim, o kit desenvolvido mostrou-se tecnicamente viável para irrigação da olerícola, observando-se a necessidade de equipamentos com diferentes características no mercado, que poderiam potencializar a eficiência do sistema.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica; Bombeamento de água; Microirrigação; Olericultura

ABSTRACT

Development of a drip irrigation system by microtubes kit with pump propelled by solar energy

The water pumping by solar energy has proven to be an alternative to locations where energy sources are not available or are limited. It's interesting to combine it with an irrigation system that operates with relatively low flow and low pressure, as drip irrigation with microtubes, in order to obtain high efficiency. The present study aimed to design and evaluate a microtubes irrigation kit, powered by solar energy pump; and show the cost and energy saving provided by the use of the kit developed. The kit was provided by lateral irrigation lines, positive displacement pump (DC), photovoltaic generator, battery, charge controller and solenoid valves. Three steps were followed: the design and evaluation of emitters and lateral lines; the selection and evaluation of the pumping set by solar energy; and the installation of the kit in four flowerbeds irrigating lettuce to evaluate the irrigation kit. In the laboratory, the lateral lines had "excellent" uniformity (greater than 95,8%) for the three uniformity coefficients evaluated; and the selected pump potentiated irrigation up to 15 flowerbeds (270 m²) with a 10.8% efficiency. In flowerbeds, the irrigation system also presented "excellent" uniformity (greater than 94.7%) for the evaluated coefficients. In the days when the irrigation time were higher, the pumping system presented motor pump set, conversion and overall efficiencies in the order of 9.7%, 36.6% and 2.4%, respectively. The total fixed cost of deployment kit developed for irrigation of 15 flowerbeds was R\$ 4313.33 with automation, or R\$ 3083.33 without automation. In the area and period evaluated, the developed kit promoted 4.5 kWh energy savings. Simulating the cultivation of lettuce for a year, a 63 kWh saving was estimated. Therefore, the kit developed proved to be technically feasible for lettuce irrigation, observing the need for equipment on the market with different characteristics that could increase the system efficiency.

Keywords: Photovoltaic solar energy; Water pumping; Microirrigation; Olericulture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas típicas de desempenho de bombas de deslocamento positivo e centrífuga	32
Figura 2 – Imagem do microtubo do tipo espaguete	35
Figura 3 – Esquema da inserção do emissor (A) e vedação com luva (B) e selante (C) na linha lateral	38
Figura 4 – Imagem do suporte para coleta da água utilizado para ensaio de uniformidade.....	38
Figura 5 – Curvas características vazão (Q) x pressão (H) das bombas hidráulicas solares Anauger P100 (a), Lorentz PS150 (b), Lorentz PS200 (c) e Shurflo S8000 (d)	41
Figura 6 – Esquema do circuito hidráulico fechado para o ensaio da determinação da curva característica da bomba utilizada	42
Figura 7 – Esquema geral dos componentes do kit, do sistema de irrigação e dos canteiros de cultivo.....	43
Figura 8 – Imagem dos componentes do kit de irrigação por energia solar instalados a campo: a) bomba Shurflo S8000; b) gerador fotovoltaico; c) bateria; d) controlador de carga; e, e) válvula solenóide	44
Figura 9 – Esquema do sistema de aquisição de dados	45
Figura 10 – Imagem da área após o preparo do solo dos canteiros	47
Figura 11 – Imagem das mudas transplantadas para os canteiros	48
Figura 12 – Imagens dos ensaios de uniformidade a campo	49
Figura 13 – Comprimento médio de microtubos (L_m) e estimativa do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) para diferentes comprimentos de linhas laterais (L_{LL})	51
Figura 14 – Curvas características vazão (Q) x pressão (H) e Q x rendimento (η) da bomba hidráulica Shurflo S8000	53
Figura 15 – Tempo de irrigação por canteiro (TI), precipitação (PPT) (a) e lâminas de irrigação (b) nos dias de avaliação do kit após o transplante	54
Figura 16 – Potências útil (P_u) e absorvida (P_a) da bomba, e rendimento do conjunto moto-bomba (η_{mb}) nos dias de avaliação do kit após o transplante.....	55

- Figura 17 – Energias elétrica consumida pela bomba (E_{elet}) e fornecida pelo painel fotovoltaico (E_{solar}), e rendimento de conversão (η_{conv}) nos dias de avaliação do kit após o transplante..... 56
- Figura 18 – Energias hidráulica fornecida pela bomba (E_{hid}) e fornecida pelo painel fotovoltaico (E_{solar}), e rendimento global do sistema (η_{global}) nos dias de avaliação do kit..... 56
- Figura 19 – Imagens do *stand* da produção das variedades japonesa (a), lisa (b), americana (c) e crespa (d)..... 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos parâmetros de ajuste da equação de cálculo de vazão em um microtubo.....	25
Tabela 2 – Critérios para classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	28
Tabela 3 – Critérios para classificação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)	29
Tabela 4 – Critérios para classificação da uniformidade estatística (UE).....	29
Tabela 5 – Vazão (Q_B) e tensão elétrica da bomba (V), vazão por canteiro (Q_C), número de canteiros possíveis de se irrigar por dia (CPI), vazão (Q_m) e tempo de irrigação (TI) por microtubo, área irrigada e preço médio, em função dos modelos de bombas.....	41
Tabela 6 – Especificações da bomba Shurflo S8000	42
Tabela 7 – Especificações dos componentes do kit de irrigação por energia solar ..	44
Tabela 8 – Valores do coeficiente de cultura (K_c) em função das fases de desenvolvimento da cultura do alface, após o transplântio das mudas..	48
Tabela 9 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD), uniformidade estatística (UE) e vazão média dos emissores (q_{med}), em função da repetição	52
Tabela 10 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD), uniformidade estatística (UE), vazão média dos emissores (q_{med}) e variação de vazão (q_{var}), em função da avaliação e da linha lateral....	54
Tabela 11 – Média das características agronômicas massa fresca comercial (MFC), massa seca (MS), diâmetro da planta (DP) e altura da planta (HP) em função da variedade de alface	57
Tabela 12 – Custos de aquisição dos sistemas de irrigação e de bombeamento por energia solar.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

“a”, “b”, “c” e “d” – Parâmetros de ajuste que variam em função de D_m

A – Área útil do painel fotovoltaico (m^2)

A_c – Área do canteiro (m^2)

CPI – Canteiros possíveis de se irrigar por dia

CUC – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%)

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição (%)

D_m – Diâmetro interno do microtubo (m)

D_{LL} – Diâmetro da linha lateral (m)

DP – Diâmetro da planta (cm)

E_{elet} – Energia elétrica consumida pela bomba (MJ)

E_{hid} – Energia hidráulica fornecida pela bomba (MJ)

E_{solar} – Energia fornecida pelo painel fotovoltaico (MJ)

ETc – Evapotranspiração da cultura ($mm\ dia^{-1}$)

ETo – Evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$)

Ev – Energia de velocidade (m.c.a.)

f – Coeficiente de atrito da fórmula Universal (adimensional)

g – Aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$)

G – Fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)

H – Perda de carga total (m.c.a.)

hf_c – Perda de carga contínua (m.c.a.)

hf_{loc} – Perda localizada de carga (m.c.a.)

HP – Altura da planta (cm)

I – Corrente elétrica (A)

JT – Jornada de trabalho (h)

K – Coeficiente da equação de perda localizada de carga (adimensional)

K_c – Coeficiente de cultura (adimensional)

L_m – Comprimento do microtubo (m)

MFC – Massa fresca comercial (g)

MS – Massa seca (g)

n – Número de emissores

P_a – Potência absorvida pela bomba (W)

Pot – Potência da bomba (cv)

P_u – Potência útil fornecida pela bomba (W)
 q_{25} – média do quartil inferior das vazões dos emissores ($L\ h^{-1}$)
 q_i – Vazão do i -ésimo emissor ($L\ h^{-1}$)
 q_{max} – Vazão do emissor que opera à pressão máxima na subunidade ($L\ h^{-1}$)
 q_{med} – Vazão média dos emissores ($L\ h^{-1}$)
 q_{min} – Vazão do emissor que opera à pressão mínima na subunidade ($L\ h^{-1}$)
 q_{var} – Variação da vazão do emissor (%)
 Q_B – Vazão da bomba ($L\ h^{-1}$)
 Q_C – Vazão por canteiro ($L\ h^{-1}$)
 Q_{LL} – Vazão no trecho da linha lateral ($m^3\ s^{-1}$)
 Q_m – Vazão no microtubo ($L\ h^{-1}$)
 Rad – Radiação solar (W)
 Rad_{solar} – Radiação solar informada pelo piranômetro ($W\ m^{-2}$)
 Re – Número de Reynolds (adimensional)
 Rn – Saldo de radiação na superfície ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)
 s – Declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($kPa\ ^\circ C^{-1}$)
 t – Tempo de funcionamento da bomba (s)
 T_{ag} – temperatura da água, $^\circ C$;
 T – Temperatura média do ar ($^\circ C$)
 TI – Tempo de irrigação (min)
 U – Tensão elétrica (V)
 UE – Uniformidade estatística (%)
 U_2 – Velocidade do vento à 2 m de altura da superfície do solo ($m\ s^{-1}$)
 v – Velocidade de escoamento da água ($m\ s^{-1}$)
 V – Volume de água bombeado (m^3)
 z – Diferença de nível (m)
 σ – Desvio padrão médio das vazões dos emissores ($L\ h^{-1}$)
 η_{conv} – Rendimento de conversão (%)
 η_{global} – Rendimento global (%)
 η_{mb} – Rendimento do conjunto moto-bomba (%)
 η_{painel} – Eficiência do painel fotovoltaico (%)
 ρ – Massa específica da água ($kg\ m^{-3}$)
 γ – Coeficiente psicrométrico ($kPa\ ^\circ C^{-1}$)

γ – Peso específico da água (N m^{-3})

ν – Viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

(es-ea) – Déficit de pressão de vapor (kPa)

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios atuais da irrigação é a correta utilização dos sistemas de irrigação para que apresentem eficiência adequada, principalmente em relação ao uso e a aplicação de água. Isso se deve, principalmente, ao decréscimo da disponibilidade da água e ao alto custo de energia. A irrigação por gotejamento tem se destacado nesse contexto, pois a vazão e a pressão de operação do sistema são menores quando comparados com os sistemas de irrigação por aspersão.

Apesar dos sistemas de irrigação localizada, como o gotejamento, apresentarem uma série de vantagens em relação aos demais sistemas, os mesmos também apresentam algumas limitações. Além de requererem boa qualidade da água para se evitar problemas com obstrução de emissores, ainda apresentam elevado custo de instalação, entre outras.

Uma alternativa aos emissores do tipo gotejadores é o uso dos microtubos, que possui fácil manuseio, baixo custo e possibilidade de apresentar alta eficiência. Hidraulicamente um microtubo é um gotejador de longo percurso, de material polietileno, de diâmetro variando de 0,5 a 2,0 mm, cujo comprimento pode ser ajustado conforme necessário. Assim, o microtubo pode ser utilizado em sistemas que operam sob baixa pressão, como aqueles onde se utiliza apenas a gravidade.

Recentemente tem-se utilizado a energia solar para a geração de energia para o bombeamento de água, especialmente em localidades onde outras fontes de energia não estão disponíveis ou são limitadas. Isso possibilita a utilização da irrigação nesses locais remotos, e com isso uma série de benefícios.

Nos últimos anos a utilização de sistemas fotovoltaicos tem aumentado devido à diminuição do custo de aquisição dos equipamentos; aumento da sua eficiência e confiabilidade; baixo custo de manutenção e vida útil do gerador em torno de 25 anos. O custo de investimento inicial para um sistema fotovoltaico para bombeamento ainda é maior quando comparado a um convencional, porém ao longo de sua vida útil pode se tornar mais vantajoso possibilitando aliar a irrigação por microtubos com o bombeamento de água por energia solar.

Duas estratégias podem ser adotadas em projetos de irrigação por microtubos com acionamento de bomba por energia solar: acionamento direto, por meio da utilização de bombas de corrente contínua, ou acionamento indireto, quando se converte a corrente contínua para corrente alternada e se utiliza uma

bomba convencional. O acionamento direto tem a vantagem de não necessitar de nenhum dispositivo para a conversão da energia, apresentando menores perdas elétricas e tornando mais simples o sistema. Contudo, os estudos do comportamento operacional de bombas de corrente contínua para essa aplicação ainda são poucos, além de possuírem baixa potência, limitando o tamanho da área irrigada. Nesse caso, torna-se interessante a utilização de um conjunto em que os microtubos possam ser utilizados especialmente para uma bomba com essas características.

Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivos: *i)* dimensionar e avaliar um kit de irrigação por microtubos utilizando bomba acionada pela energia solar; *ii)* apresentar o custo fixo total do kit desenvolvido; *iii)* apresentar a economia de energia proporcionada com a utilização do kit.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação localizada por microtubos

A irrigação localizada é caracterizada por aplicar água diretamente na região radicular da cultura, em pequenas intensidades, alta frequência, mantendo sempre o solo próximo à capacidade de campo. De acordo com Frizzzone et al. (2012) a água pode ser aplicada na forma de gotas na superfície ou na subsuperfície do solo (gotejamento), aspergida (microaspersão) ou em fluxo contínuo (*bubbler*).

De modo geral, como vantagens do método de irrigação localizada pode-se citar a economia de água e energia devido ao maior controle da quantidade de água aplicada, o menor uso de mão-de-obra para operação e excelente uniformidade de aplicação de água. Como desvantagens do método, tem-se alto custo inicial, elevado potencial de entupimento de emissores, necessitando geralmente de sistema de filtragem e manutenção com maior frequência (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2012).

O sistema de irrigação localizada com microtubos normalmente é composto por linhas de polietileno e emissores do tipo microtubo, cujo diâmetro interno varia de 0,5 a 2,0 mm. Alves et al. (2014) citam o sistema como uma importante ferramenta para o aumento do nível tecnológico de pequenos irrigantes, bem como a facilidade de instalação e manutenção do mesmo. Contudo, deve-se lembrar que essa facilidade que os autores se referiram está relacionada à robustez dos microtubos, que não requerem muitos cuidados na instalação, como ocorre com os microaspersores e gotejadores. Por outro lado, quanto maior a quantidade de microtubos, maior a mão de obra para instalação, o que pode apresentar alguma limitação ao usuário.

Os microtubos possuem baixo custo e, quando corretamente dimensionados, possibilitam uniformidade de distribuição de água satisfatória. Para a alface, por exemplo, Souza, Pérez e Botrel (2006) obtiveram uma uniformidade de aplicação de água de 97%, sendo considerado excelente. Em relação ao custo, os autores citam uma economia de 54,4% ao utilizarem microtubos ao invés de tubos gotejadores.

Silva (2011) e Almeida (2008) citam como limitações dos microtubos a alta sensibilidade à variação de temperatura e pressão, e a exigência de água de boa qualidade, devido à susceptibilidade ao entupimento.

Hidraulicamente, o microtubo dissipa energia ao longo de seu comprimento emitindo água para a irrigação. Desta forma, a vazão de água pode ser regulada conforme seu comprimento e diâmetro, o que possibilita utilizá-lo como emissor (SOARES, 1981).

Segundo Ishaq e Ibrahim (1995), para que se tenha vazão uniforme em todos os microtubos ao longo de uma linha lateral é necessário o ajuste do comprimento de cada microtubo. Ainda de acordo com os autores, a maior parte dos estudos de microtubos utilizaram os mesmos para operarem sob regime laminar.

Souza (2005) comenta que o dimensionamento dos microtubos é feito baseado no cálculo da perda de carga causada pelo emissor em determinada condição de vazão e pressão. Na literatura existem equações empíricas que expressam tal perda de carga, podendo-se citar as equações de Khatri, Giltrlin e Phillips (1979), Vermeiren e Jobling (1980) e Souza e Botrel (2004). Assim, para determinada vazão, perda de carga e diâmetro interno, calcula-se o comprimento de microtubo necessário.

Khatri, Giltrlin e Phillips (1979) determinaram equações para a perda de carga total em diferentes condições de regime de escoamento. Os mesmos ainda consideram que as perdas localizadas de carga podem ser irrelevantes em regime laminar. A equação apresentada pelos autores (eq. 1) representa, de forma genérica, a perda de carga para qualquer regime de escoamento.

$$H = 0,0054 \frac{Q_m^{1,516}}{D_m^{4,245}} L_m \quad (1)$$

em que:

H – perda de carga total, m.c.a.;

D_m – diâmetro interno do microtubo, mm;

Q_m – vazão do microtubo, L h⁻¹;

L_m – comprimento do microtubo, cm.

Para Vermeiren e Jobling (1980), a relação entre vazão, perda de carga, comprimento e diâmetro interno pode ser expressa pela eq. (2).

$$Q_m = a L_m^b H_m^c D_m^d \quad (2)$$

em que:

Q_m – vazão do microtubo, $L h^{-1}$;

L_m – comprimento do microtubo, m;

H – perda de carga, m.c.a.;

D_m – diâmetro do microtubo, m;

“a”, “b”, “c” e “d” – parâmetros de ajuste que variam em função de D_m .

Os parâmetros de ajuste da Eq. 2 estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros de ajuste da equação de cálculo de vazão em um microtubo

Parâmetros	Diâmetro interno (mm)						
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
a	0,86	0,91	1,02	1,14	1,16	1,28	1,38
b	-0,78	-0,75	-7,2	-0,68	-0,65	-0,62	-0,58
c	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,69	0,65
d	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Fonte - Adaptado de Vermeiren e Jobling (1980)

Souza e Botrel (2004) associaram as equações de perda de carga contínua (equação universal), perda localizada de carga e energia cinética (eq. 3, 4 e 5, respectivamente) em uma (eq. 6), contemplando todas as energias envolvidas no microtubo.

$$hf_c = f \frac{L_m}{D_m} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$hf_{loc} = K \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$Ev = \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$$H = \frac{64v^4}{\pi^2 g} \left(\frac{L_m Q_m}{D_m^4} \right) + \frac{16}{\pi^2 2g} \left(\frac{Q_m^2}{D_m^4} \right) + \frac{16}{\pi^2 2g} \left(\frac{K Q_m^2}{D_m^4} \right) \quad (6)$$

em que:

hf_c – perda de carga contínua, m.c.a.;

f – coeficiente de atrito da fórmula Universal, adimensional;

L_m – comprimento do microtubo, m;

v – velocidade de escoamento da água, $m s^{-1}$;

- g – aceleração da gravidade, m s^{-2} ;
 hf_{loc} – perda localizada de carga, m.c.a.;
 Ev – energia de velocidade, m.c.a.;
 H – perda de carga total no microtubo, m.c.a.;
 ν – viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
 Q_m – vazão no microtubo, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;
 D_m – diâmetro interno do microtubo, m;
 K – coeficiente da equação de perda localizada de carga, adimensional.

Como o diâmetro do microtubo é um dos fatores importantes que influencia na perda de carga sendo seu valor necessário, seja por medição ou por estimativa. Para se medir o diâmetro pode-se utilizar um projetor óptico, por exemplo; contudo, esse é um equipamento restrito a poucas instituições devido ao seu custo. Alternativamente à medição, pode-se estimar o diâmetro por meio de ensaios e equações, como feito por Almeida e Botrel (2010).

O ensaio consiste na medição da vazão de água no microtubo para uma determinada diferença de nível entre o ponto de emissão e o nível de um reservatório (3 m, por exemplo). Posteriormente, estima-se o diâmetro interno com os resultados de ensaio, por meio de uma equação, como aquela utilizada por Almeida e Botrel (2010) (eq. 7).

$$D_m = \left(\frac{0,08262647Q_m^2 + 4,153269\nu L_m Q_m}{z} \right)^{0,25} \quad (7)$$

em que:

z – diferença de nível, m.

No dimensionamento das linhas laterais, várias equações podem ser utilizadas para a determinação da perda de carga, no entanto, a equação de Darcy-Weisbach, ou equação Universal, é amplamente aceita para tal (eq. 3).

O coeficiente de atrito (f) da eq. (3) é obtido em função do tipo de regime de escoamento. Para regime de escoamento laminar ($Re < 2000$), utiliza-se da equação proposta por Hagen-Poiseuille (eq. 8), enquanto que para regime de escoamento

turbulento ($4000 < Re < 100000$) utiliza-se a equação de Blasius (eq. 9), uma vez que os regimes de escoamento nos tubos da linha lateral são hidraulicamente lisos.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (9)$$

em que:

Re – número de Reynolds, adimensional.

Para fins de projeto hidráulico, as variações de pressão e vazão são os parâmetros a serem considerados na subunidade, sendo que a uniformidade depende delas. De acordo com Frizzzone et al. (2012), em projetos de irrigação localizada, permite-se uma variação máxima de pressão de 10 a 20% na subunidade. Essa variação de pressão resulta numa variação de vazão (q_{var}), que pode ser calculado por meio da eq. (10).

$$q_{var} = \left(\frac{q_{max} - q_{min}}{q_{max}} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

em que:

q_{var} – variação da vazão do emissor, %;

q_{max} – vazão do emissor que opera à pressão máxima na subunidade, $L \ h^{-1}$;

q_{min} – vazão do emissor que opera à pressão mínima na subunidade, $L \ h^{-1}$.

2.2 Avaliação de sistemas de irrigação

Ao se definir o critério do manejo da irrigação, é necessária a análise da qualidade com que a água é aplicada. Essa análise permite verificar como se comporta a uniformidade de distribuição durante a irrigação. Segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2012), a uniformidade da aplicação de água é um dos parâmetros básicos no manejo da irrigação, sendo que a partir da mesma podem-se traçar estratégias para aumentar a produtividade da cultura, visando aumentar a rentabilidade da propriedade.

Vários coeficientes de uniformidade são utilizados para caracterizar a distribuição de água em sistemas de irrigação pressurizada. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), é um dos mais utilizados e é expresso pela eq. (11).

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum |q_i - q_{med}|}{n \cdot q_{med}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

em que:

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, %;

q_i – vazão do i -ésimo emissor, $L \cdot h^{-1}$;

q_{med} – vazão média dos emissores, $L \cdot h^{-1}$;

n – número de emissores.

Mantovani (2002) apresentou uma classificação dos valores de CUC para a irrigação localizada por gotejamento, conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

CUC (%)	Classificação
> 90	Excelente
80 – 90	Bom
70 – 80	Razoável
60 – 70	Ruim
< 60	Inaceitável

Fonte – Mantovani (2002)

Outro coeficiente utilizado para representar a uniformidade na irrigação localizada é o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), proposto por Kruse (1978) e representado por meio da eq. (12).

$$CUD = \left(\frac{q_{25}}{q_{med}} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

em que:

CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %;

q_{25} – média do quartil inferior das vazões dos emissores, $L \cdot h^{-1}$.

De acordo com Bralts (1986) o CUD pode ser interpretado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios para classificação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

CUD (%)	Classificação
> 90	Excelente
80 – 90	Bom
70 – 80	Regular
< 70	Ruim

Fonte – Bralts (1986)

Para pequenos sistemas de irrigação localizada, Keller et al. (2001) recomendam a utilização da uniformidade estatística (UE) para a representação de sua uniformidade (eq. 13), podendo ser interpretada conforme a Tabela 4.

$$UE = \left(1 - \frac{\sigma}{q_{med}} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

em que:

UE – Uniformidade Estatística, %;

 σ – desvio padrão médio das vazões dos emissores, L h⁻¹.

Tabela 4 – Critérios para classificação da uniformidade estatística (UE)

UE (%)	Classificação
> 90	Excelente
80 – 90	Bom
70 – 80	Regular
60 – 80	Ruim
< 60	Inaceitável

Fonte – Adaptado de Almeida (2008)

2.3 Bombeamento de água por meio de energia solar

A energia elétrica pode ser obtida por meio da conversão da luz solar em eletricidade, sem a interferência de qualquer motor térmico, com um grande potencial para locais onde há disponibilidade abundante de irradiação solar. Andrade (2013) comenta que a conversão solar possui inúmeras aplicações, como fonte de alimentação, sistemas domésticos de energia, comunicações, satélites, veículos e o bombeamento de água, fazendo com que a demanda pela tecnologia aumente a cada ano.

Dentre as tecnologias existentes para o bombeamento de água, a opção fotovoltaica vem se mostrando promissora para o abastecimento de água em locais sem acesso à rede elétrica convencional, sendo suas principais aplicações na

irrigação de culturas, na pecuária e no abastecimento de água residencial (ANDRADE, 2013; NOGUEIRA, 2009).

Os sistemas de bombeamento com energia fotovoltaica têm como vantagens não consumir combustíveis fósseis, logo não há geração de poluentes. Nogueira (2009) e Santos et al. (2007) também citam os baixos custos de manutenção, a vida útil média do gerador em torno de 25 anos e a alta confiabilidade da tecnologia. Entretanto, o alto custo inicial e a falta de incentivos para a produção e aquisição de equipamentos ainda são duas questões que limitam o uso generalizado da tecnologia (MELÉNDEZ, 2009).

Um sistema fotovoltaico de bombeamento convencional é dotado basicamente por um gerador fotovoltaico de energia, dispositivos para controle, regulação e funcionamento do sistema (inversores e controladores), armazenamento de energia (reservatório ou bateria) e conjunto moto-bomba. De acordo com Chandel, Naik e Chandel (2015), a atual tecnologia utiliza de dispositivos que aumentam ainda mais a potência de saída, o desempenho e a eficiência global do sistema, pois permitem monitorar os níveis de armazenamento ou até mesmo controlar a velocidade da bomba.

O gerador fotovoltaico é o componente básico do sistema e tem a função de converter a energia solar em energia elétrica. É dividido em três categorias de acordo com o tipo de cristal à base de silício utilizado na fabricação da célula fotovoltaica: monocristalino, policristalino e amorfo com eficiências em torno de 17, 15 e 7%, respectivamente (MEAH; ULA; BARRETT, 2008).

O controlador de carga está presente na maioria dos sistemas de geração de energia solar. Possui a função de proteção contra corrente reversa, sobrecorrente, regular a tensão de carga e recarga das baterias e a tensão de alimentação dos demais dispositivos ligados ao sistema (BRASÍLIO; GUEDES, 2012; MEAH; ULA; BARRETT, 2008; SÁ, 2010). Inversores de frequência são recomendados quando bombas convencionais de corrente alternada são utilizadas. São dispositivos que convertem a eletricidade de corrente contínua (12, 24 ou 48 V) para corrente alternada (127 ou 220 V).

Tratando-se de armazenamento de energia, normalmente a água é bombeada para um reservatório elevado para que seja distribuída por gravidade. Para fins de irrigação, por exemplo, dimensiona-se o reservatório para garantir o fornecimento de água às culturas em dias com pouca radiação ou até mesmo

durante a noite, como no trabalho realizado por Hamidat, Benyoucef e Hartani (2003) nas culturas do trigo, batata, tomate e girassol. Outra forma de acúmulo de energia é a utilização de baterias, que garantem o fornecimento contínuo ao conjunto de bombeamento.

Em alguns casos, não existe um local com elevação suficiente para construir um reservatório com a finalidade de tirar proveito da energia gravitacional para distribuição da água; ou até mesmo quando o projeto demanda estruturas relativamente grandes, aumentando o custo de construção dos reservatórios e, conseqüentemente, tornando o sistema inviável (LÓPEZ-LUQUE; RECA; MARTÍNEZ, 2015). A bateria também pode ser um ponto limitante, pois eleva os custos de instalação e manutenção do sistema, tem vida útil reduzida, confiabilidade baixa e gera preocupações ambientais quanto ao seu descarte (GRAH, 2014).

Como alternativa à isso, outra estratégia é a utilização de um sistema de bombeamento autônomo, sem a utilização de reservatórios ou baterias. Para tal, são necessárias simulações e desenvolvimento de modelos para cada caso específico, como López-Luque, Reza e Martínez (2015) realizaram para a irrigação de déficit em oliveiras nas condições climáticas do Mediterrâneo; e Michels et al. (2009) que simularam o bombeamento à 20 m de altura para a região oeste do Paraná para verificar o comportamento do sistema nos períodos de solstício.

As bombas utilizadas em sistemas fotovoltaicos são normalmente alimentadas por motores de corrente contínua (DC), ligados diretamente nos geradores. Com relação aos motores de corrente alternada (AC), apresentam menores perdas elétricas por não necessitarem de um inversor de frequência, resultando em maior disponibilidade de energia (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS – USDA, 2010). De acordo com Meah, Ula e Barrett (2008) podem ser classificadas com base nas suas aplicações (submersível, de superfície ou flutuante) ou quanto ao seu princípio de funcionamento (centrífugas ou deslocamento positivo).

Com relação à aplicabilidade das bombas, as submersíveis retiram água de poços profundos, enquanto que as de superfície retiram de poços rasos, nascentes, lagos, rios ou tanques. Já as bombas flutuantes são recomendadas para bombear água de reservatórios com capacidade de ajuste de nível (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015).

As bombas centrífugas, segundo Chandel, Naik e Chandel (2015), representam a primeira geração de bombas utilizadas em sistemas fotovoltaicos e possuem confiabilidade comprovada em longo prazo, menores exigências de manutenção e uma eficiência hidráulica de 25 a 35%. A eficiência dessas bombas diminui quando operam em velocidades mais baixas, o que pode ser uma limitação em um sistema de bombeamento em condições de baixa radiação solar.

Bombas de deslocamento positivo são as utilizadas na segunda geração de sistemas fotovoltaicos para bombeamento, e são caracterizadas por baixos requisitos de energia, baixo custo de aquisição e eficiência hidráulica de até 70% (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015). Chandel, Naik e Chandel (2015) comentam que bombas de diafragma e de pistão são bombas de deslocamento positivo, e que a saída de água nestas é diretamente proporcional à velocidade e praticamente independente da pressão. As bombas de diafragma são as mais adaptadas à aplicação direta no bombeamento por energia solar, porém os estudos do seu comportamento operacional ainda são escassos (KOLLING et al., 2004).

As bombas centrífugas são normalmente utilizadas para vazões mais elevadas e baixas alturas manométricas, enquanto que a aplicação das bombas de deslocamento positivo dá-se em bombeamentos de baixa vazão, elevadas alturas manométricas e baixa tensão. Pode-se observar na Figura 1 que a bomba centrífuga tem sensível variação na vazão quando varia-se a pressão de saída. Já a bomba de deslocamento positivo mantém basicamente a mesma vazão independente da pressão.

Figura 1 – Curvas típicas de desempenho de bombas de deslocamento positivo e centrífuga

2.4 Custos do bombeamento de água por meio de energia elétrica

A irrigação é responsável por grande parte do consumo de energia elétrica no meio rural (TURCO; RIZZATTI; PAVANI, 2009). Geralmente, os produtores não adotam um manejo adequado da irrigação podendo comprometer a produção. Segundo Mello (1999), isso contribui para o desperdício de água obtendo elevados custos com tarifas de energia elétrica, sendo um dos principais componentes, ou até mesmo o principal, dentro dos custos variáveis de um sistema de irrigação (FRIZZONE; BOTREL; FREITAS, 1994).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, há uma divisão em dois grupos dentre os usuários da rede no fornecimento da energia elétrica, em função da sua carga instalada, superior a 2,3 kV (grupo A) e igual ou inferior a 2,3 kV (grupo B). No grupo A encontram-se os irrigantes, sendo submetidos a três modalidades tarifárias (convencional, azul e verde) e dois elementos que definem o seu preço (demanda de potência e consumo de energia) (ARAÚJO, 2003; SOUZA; FRIZZONE, 2003). Portanto, o custo anual com a energia elétrica é calculado pela soma dos faturamentos anuais de demanda e de consumo, ajustados pelo fator de potência (MARQUES; MARQUES, 2002).

A modalidade tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente do momento de utilização no dia. A tarifa azul é caracterizada por apresentar tarifas de consumo de energia e demanda de potência que variam de acordo com o momento de utilização no dia (ponta ou fora de ponta). Já a tarifa verde é semelhante à azul, porém apresenta somente uma única tarifa de demanda de potência (ANEEL, 2010; ARAÚJO, 2003).

As diferenciações na utilização da energia elétrica durante o momento no dia são divididas em horário de ponta e horário fora de ponta. O primeiro é composto pelas três horas consecutivas entre as 18h e 21h, com exceção dos sábados, domingos e feriados. Já o horário fora de ponta compreende as horas complementares às da ponta (ANEEL, 2010; MARQUES, 2005; SOUZA; FRIZZONE, 2003).

Irrigantes no período noturno possuem descontos em sua tarifa, variando de acordo com a região, sendo 90% para o Nordeste, 80% para o Norte e Centro-Oeste, e 70% para as demais regiões (ANEEL, 2010; MARQUES, 2005; TURCO;

RIZZATTI; PAVANI, 2009). Segundo a resolução normativa 414 de 09 de setembro de 2010 da ANEEL, o período compreendido para obter-se o desconto com irrigação noturna é entre 21h30 e 6 h. Ademais, a propriedade deve estar localizada em área rural com fornecimento de energia destinado ao desenvolvimento de atividade rural.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios iniciais foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba-SP. Os testes em campo foram realizados em uma área experimental pertencente ao LEB, nas coordenadas 22°42’41”S e 47°37’46”W, e altitude de 548 m.

O desenvolvimento do kit de irrigação foi realizado de acordo com as seguintes etapas: 1) dimensionamento e avaliação dos emissores e das linhas laterais para irrigação de olerícolas; 2) escolha e avaliação do conjunto de bombeamento por energia solar a ser utilizado; 3) instalação do kit em canteiros de cultivo de alface para avaliação da irrigação.

3.1 Dimensionamento e avaliação dos emissores e das linhas laterais

Nos seguintes subtópicos são mostrados os passos iniciais para a obtenção das variáveis necessárias para o dimensionamento do sistema de irrigação por microtubos.

3.1.1 Determinação do diâmetro interno do microtubo

Para o dimensionamento das linhas laterais, primeiramente determinou-se, por meio da medição hidráulica (ALMEIDA; BOTREL, 2010), o diâmetro interno de um microtubo (D_m) de faixa verde (Figura 2), cujo valor informado pelo fabricante é de 0,7 mm.

Figura 2 – Imagem do microtubo do tipo espaguete
Fonte – Adaptado de Plasnova Tubos Ltda.

Para a realização do ensaio, utilizaram-se seis segmentos de microtubos de 3 m de comprimento, sendo três do início da embalagem e três do final. Todos foram submetidos à carga constante de 1,7 m e a temperatura da água foi monitorada constantemente por meio de um termômetro de mercúrio para estimativa da massa específica (ρ) (Kell, 1975) e da viscosidade cinemática da água (ν) (PINTO et al., 2014), pelas eq. (14) e (15), respectivamente. As massas de água foram coletadas por 82 min, e convertidas em vazões, para utilizar-se da eq. (7) para determinação do D_m .

$$\rho = (999,8676 + 17,801161T_{ag} - 7,942501 \cdot 10^{-3}T_{ag}^2 - 52,56328 \cdot 10^{-6}T_{ag}^3 + 137,6891 \cdot 10^{-9}T_{ag}^4 - 364,4647 \cdot 10^{-12}T_{ag}^5) / (1 + 17,735441 \cdot 10^{-3}T_{ag}) \quad (14)$$

$$\nu = \frac{32,025666 \cdot 10^{-6}}{\rho} e^{\frac{482,134866}{T+119,886026}} \quad (15)$$

em que:

ρ – massa específica da água, kg m^{-3} ;

T_{ag} – temperatura da água, $^{\circ}\text{C}$;

ν – viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

3.1.2 Dimensionamento dos microtubos e das linhas laterais

O dimensionamento da linha lateral foi realizado trecho a trecho, somando-se as perdas de carga contínuas em cada trecho por meio da equação universal de perda de carga (eq. 3). Para tal, o fator de atrito (f) foi determinado pelas eq. (8) e (9) e a velocidade de escoamento da água pela eq. (16).

$$v = \frac{4Q_{LL}}{\pi \cdot D_{LL}^2} \quad (16)$$

em que:

Q_{LL} – vazão no trecho da linha lateral, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

D_{LL} – diâmetro da linha lateral, m.

Utilizou-se de um coeficiente de perda de carga localizada (K) de 8,164 (SOUZA; BOTREL, 2004) e foi estipulado uma vazão dos microtubos de 1 L h^{-1} , para uma pressão de 40 kPa no último microtubo.

Para que o último emissor apresentasse a pressão estipulada, foi considerada a perda de carga ao longo da linha lateral. Com esses dados e com o D_m determinado pelo método hidráulico, calculou-se o comprimento de cada microtubo (L_m), por meio da eq. (6) (SOUZA; BOTREL, 2004).

Cada microtubo apresentou um comprimento diferente, porém isso gerou dificuldades para a montagem da linha lateral, especialmente para o usuário final do kit no campo. Assim, utilizou-se um comprimento constante, sendo tomado pela média de comprimento de todos os microtubos da linha lateral, o que facilitou a instalação dos microtubos. Com isso, houve uma pequena redução na uniformidade de aplicação de água, pois quando se utiliza o comprimento variável, a uniformidade da vazão de projeto é de 100%.

3.1.3 Montagem das linhas laterais

A avaliação do kit a campo foi feita em canteiros de cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) de 1,25 x 15 m, com 0,30 m de espaçamento entre plantas. Cada microtubo foi fixado em um ponto de emissão, que estavam igualmente espaçados em 7,5 cm, ou seja, quatro microtubos entre duas plantas paralelas à linha lateral, com um total de 200 plantas por canteiro.

Foram construídas quatro linhas laterais de microtubos de 18 m de comprimento, resultante da união de três tubos de PVC marrom, com 20 mm de diâmetro nominal. Foram fixados microtubos em toda a linha lateral, o que resultou em 240 emissores. Isso visou tornar prática a montagem do kit a campo, pois o tubo desse material é mais popular, além de ser rígido e facilitar a estanqueidade da junção do microtubo com o mesmo, quando comparado ao polietileno, por exemplo.

A inserção dos microtubos na linha lateral foi realizada conforme a Figura 3. Como não há uma solda específica para PVC e polietileno, realizou-se a vedação com um selante para juntas de dilatação e de conexão à base de poliuretano (mastique, popularmente conhecido pelo nome comercial Veda Calha).

Figura 3 – Esquema da inserção do emissor (A) e vedação com luva (B) e selante (C) na linha lateral

3.1.4 Avaliação da uniformidade da linha lateral em laboratório

Para verificar o desempenho hidráulico do sistema de irrigação com a utilização do comprimento médio dos microtubos, uma linha lateral foi submetida ao ensaio de uniformidade para a obtenção dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de distribuição (CUD) e de uniformidade estatística (UE).

Durante o ensaio, a pressão de entrada, para que a vazão dos emissores fosse de 1 L h^{-1} , foi ajustada com um registro de agulha e monitorada por meio de um transdutor de pressão para pressões de até 100 kPa. O sistema de filtragem da água era dotado de um filtro de tela de 120 aberturas pol^{-2} (mesh).

Foram realizadas três repetições para aquela pressão de ensaio. Coletou-se a massa de água de 40 emissores, sendo 10 de cada quartil da linha. Para facilitar a coleta da água, utilizaram-se suportes de madeira para agrupar 10 emissores cada (Figura 4). Posteriormente, converteu-se as massas coletadas em volumes para se obter as vazões dos emissores.

Figura 4 – Imagem do suporte para coleta da água utilizado para ensaio de uniformidade

3.2 Escolha e avaliação do conjunto de bombeamento por energia solar

Primeiramente nesta etapa, como pré-projeto, foi estimada a lâmina máxima demandada pela alface em Piracicaba e, com base nisso, a determinação do tempo de irrigação máximo para levantamento de parâmetros para a seleção do conjunto de bombeamento. Após a aquisição da moto-bomba, foram feitos ensaios para determinação da curva característica, com a finalidade de obter os valores de desempenho.

3.2.1 Necessidade máxima de irrigação

A lâmina que representa a máxima quantidade de água necessária para a cultura da alface utilizada para o projeto foi de 5,4 mm dia⁻¹, calculada pelo produto do coeficiente de cultura (Kc) máximo de 0,88 da alface (GOMES, 2001) e da evapotranspiração de referência (ET_o) em Piracicaba. A ET_o foi estimada pelo método padrão de Penman-Monteith (eq. 17) (ALLEN et al., 2006), considerando a maior média de sete dias consecutivos de uma série histórica de 30 anos de dados climatológicos disponibilizados pela estação meteorológica do LEB.

$$ET_o = \frac{0,408.s.(R_n - G) + \gamma.[900/(T+273)].U_2.(e_s - e_a)}{s + \gamma(1+0,34.U_2)} \quad (17)$$

em que:

ET_o – evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

s – declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C⁻¹;

R_n – saldo de radiação na superfície, MJ m⁻² d⁻¹;

G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

γ - coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹;

U₂ – velocidade do vento à 2 m de altura, m s⁻¹;

(e_s-e_a) – déficit de pressão de vapor, kPa;

T – temperatura média do ar, °C.

Para atender à necessidade de irrigação na máxima evapotranspiração, considerando-se uma vazão de 1 L h⁻¹ de cada microtubo, o tempo de irrigação (eq. 18) deve ser de 24,3 minutos por canteiro. Portanto, para os quatro canteiros o

tempo total de irrigação deve ser de aproximadamente 1 h e 40 min, que pode ser atendido por um sistema alimentado por energia solar, considerando a radiação durante cerca de 6 h por dia.

$$TI = \left(\frac{A_c \cdot ET_c}{Q_c} \right) \cdot 60 \quad (18)$$

em que:

TI – tempo de irrigação, min;

A_c – área do canteiro, m²;

ET_c – evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

Q_c – vazão por canteiro, L h⁻¹.

3.2.2 Parâmetros necessários para escolha do conjunto de bombeamento

Para a escolha da bomba a ser utilizada considerou-se a vazão de 240 L h⁻¹ de cada linha lateral e a pressão na entrada calculada anteriormente. Realizou-se um levantamento das principais marcas e modelos de bombas hidráulicas acessíveis no mercado, específicas para a aplicação no bombeamento por meio da energia solar. Assim, obtiveram-se as curvas características (vazão x pressão) disponibilizadas nos catálogos dos fabricantes de cada uma destas (Figura 5).

Figura 5 – Curvas características vazão (Q) x pressão (H) das bombas hidráulicas solares Anauger P100 (a), Lorentz PS150 (b), Lorentz PS200 (c) e Shurflo S8000 (d)

Na Tabela 5 estão dispostos os parâmetros calculados para a tomada de decisão de qual bomba a ser utilizada no kit: vazão por canteiro (Q_C) e por microtubo (Q_m); tempo de irrigação (TI) (eq. 18); número de canteiros possíveis de se irrigar por dia (CPI) (eq. 19); e área que cada bomba poderá suprir.

Tabela 5 – Vazão (Q_B) e tensão elétrica da bomba (V), vazão por canteiro (Q_C), número de canteiros possíveis de se irrigar por dia (CPI), vazão (Q_m) e tempo de irrigação (TI) por microtubo, área irrigada e preço médio, em função dos modelos de bombas

Marca/Modelo	Bomba			Canteiros		Microtubos		Área irrigada (m ²)	Valor médio (R\$)	Valor por área (R\$ m ⁻²)
	Q_B (L h ⁻¹)	Tensão (V)	AC/DC*	Q_C (L h ⁻¹)	CPI***	Q_m (L h ⁻¹)	TI (min)			
Anauger P100	300	36	AC	300	18	1,250	19,40	334	1.300,00	3,90
Lorentz PS150**	1684	12	DC	241	104	1,002	24,20	1875	5.900,00	3,15
	4650	24		245	287	1,020	23,79	5176		1,14
Lorentz PS200**	345	24	DC	333	20	1,388	17,48	370	11.000,00	29,70
	654	48		327	40	1,362	17,80	728		15,11
Shurflo S8000	467	12	DC	467	28	1,946	12,47	520	450,00	0,87

*ciclo de serviço contínuo (DC) ou alternado (AC)

**bomba com duas opções de tensão de operação

***cálculo realizado adotando-se uma jornada de trabalho de 6 h

$$CPI = \left(\frac{JT}{TI} \right) \cdot 60 \quad (19)$$

em que:

CPI – canteiros possíveis de se irrigar por dia;

JT – jornada de trabalho, h.

A bomba selecionada foi a Shurflo modelo S8000, por possuir um menor custo de aquisição por unidade de área, atender à demanda do projeto, e ser de corrente contínua para ser utilizada com placas fotovoltaicas sem necessidade de

conversores. Suas especificações técnicas com base no fabricante estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações da bomba Shurflo S8000

Especificação	Shurflo S8000
Tipo de bomba	Deslocamento positivo 3 câmaras de diafragma
Tensão	12 Vcc
Corrente	7 A
Pressostato	Desligamento ajustável (alcance 40-60 PSI) Configuração de fábrica: 60 PSI
Ciclo de serviço	Liga 45 PSI $\pm$ 5 PSI
Vida útil	Contínuo 15 anos

3.2.3 Avaliação da bomba hidráulica

A avaliação da bomba Shurflo S8000 foi realizada por meio da determinação das curvas características da altura útil (vazão x pressão) e da eficiência (vazão x eficiência). Para tal, um circuito hidráulico fechado foi montado, como se pode observar na Figura 6.

A bomba foi alimentada por uma bateria de 12 Vcc e capacidade de carga de 165 Ah, a pressão foi controlada por meio de um registro de agulha e monitorada por um manômetro instalado no mesmo nível da água do reservatório. Um multímetro também foi ligado à bateria permitindo o monitoramento da corrente.

Figura 6 – Esquema do circuito hidráulico fechado para o ensaio da determinação da curva característica da bomba utilizada

3.3 Instalação do kit de irrigação em canteiros de cultivo de alface

Com todo o sistema dimensionado e avaliado em laboratório, o kit foi instalado a campo para ser avaliado e para irrigar a cultura da alface em quatro

canteiros com dimensões especificadas anteriormente. Na Figura 7 pode-se observar um esquema geral do kit disposto a campo.

Figura 7 – Esquema geral dos componentes do kit, do sistema de irrigação e dos canteiros de cultivo

3.3.1 Componentes do sistema de bombeamento e variáveis avaliadas

Além da bomba hidráulica (Figura 8a), adicionalmente foi utilizado um painel fotovoltaico modelo Kyocera KD140SX capaz de fornecer uma tensão de 12 Vcc e uma corrente de 7 A, suficientes para atender ao requisitos da bomba (Figura 8b); uma bateria de 12 Vcc para permitir o fornecimento contínuo de energia à bomba, especialmente em períodos de nebulosidade (Figura 8c); um controlador de carga MorningStar SS-20L de 20 A e 12 Vcc para regular a carga requerida pela moto-bomba, fazendo a interface entre o painel, a bateria e a moto-bomba (Figura 8d); e, para controlar a entrada de água nos canteiros, válvulas solenóides (Figura 8e). As demais especificações técnicas dos componentes do kit estão descritas na Tabela 7.

Ressalta-se que foi utilizado somente um gerador fotovoltaico para não desmontar a estrutura apresentada na Figura 8b, que já estava instalada e vinha sendo utilizada em estudos anteriores.

Figura 8 – Imagem dos componentes do kit de irrigação por energia solar instalados a campo: a) bomba Shurflo S8000; b) gerador fotovoltaico; c) bateria; d) controlador de carga; e, e) válvula solenóide

Tabela 7 – Especificações dos componentes do kit de irrigação por energia solar

Componente	Marca/Modelo	Especificação
Gerador fotovoltaico	Kyocera KD140SX	<ul style="list-style-type: none"> - Potência máxima: 140 W - Tensão em circuito aberto: 22,1 V - Tensão de pico: 17,7 V - Corrente de pico: 7,91 A - Tensão máxima do sistema: 600 V - Tipo de célula: silício policristalino - Dimensões: 1500 x 668 x 46 mm - Eficiência fabricante: 15%
Bateria	Freedom	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: estacionária - Tensão de flutuação: 13,2 – 13,8 Vcc - Tensão de carga: 14,4 – 15,5 Vcc - Capacidade: 50 – 70 Ah
Controlador de carga	MorningStar SS-20L	<ul style="list-style-type: none"> - Tensão do sistema: 12 Vcc - Corrente do sistema: 20 A - Tensão reguladora: 14,4 Vcc (bateria convencional) - Desconexão por tensão baixa: 11,5 Vcc - Reconexão por tensão baixa: 12,6 Vcc - Consumo próprio: 6 – 10 mA

Foram avaliadas e monitoradas as seguintes variáveis nos 35 dias enquanto o kit esteve a campo: corrente e tensão elétricas requeridas pela bomba (consumo de energia); vazão e pressão fornecidas pela bomba; e radiação solar. Todas as medições foram armazenadas em um *data logger* modelo CR23X da Campbell Scientific (Figura 9). O *data logger* também controlou o sistema, por meio do

acionamento da bomba e abertura/fechamento de válvulas dos canteiros, durante o tempo necessário para irrigação. Diariamente, pela manhã, foi informado no *datalogger* o tempo de irrigação de cada canteiro para que o mesmo realizasse o controle.

Corrente e tensão elétricas foram medidas por circuitos eletrônicos. A vazão foi medida por meio de um hidrômetro que gerava um pulso elétrico, monitorado por *timer*, a cada 10 L de água, e a pressão na saída da bomba foi monitorada por meio de um transdutor de pressão. Por fim, para medição da radiação solar, instalou-se um piranômetro modelo SP-Lite da Kipp & Zonen próximo ao painel fotovoltaico, à uma altura de 1,2 m da superfície do solo, de acordo com os critérios estabelecidos pela rede meteorológica, que fornecia os dados (em $W\ m^{-2}$) em intervalos de 15 minutos ao *datalogger* (Figura 9).

Figura 9 – Esquema do sistema de aquisição de dados

Com todas as variáveis monitoradas e armazenadas, os rendimentos do conjunto moto-bomba (η_{mb}), de conversão (η_{conv}) e global (η_{global}) foram calculados conforme as eq. (20), (21) e (22), respectivamente.

$$\eta_{mb} = \left(\frac{P_u}{P_a} \right) \cdot 100 \quad (20)$$

$$\eta_{conv} = \left(\frac{E_{elet}}{E_{solar}} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

$$\eta_{\text{global}} = \left(\frac{E_{\text{hid}}}{E_{\text{solar}}} \right) \cdot 100 \quad (22)$$

em que:

- η_{mb} – rendimento do conjunto moto-bomba, %;
- P_u – potência útil, W;
- P_a – potência absorvida, W;
- η_{conv} – rendimento de conversão, %;
- E_{elet} – energia elétrica consumida pela bomba, MJ;
- E_{solar} – energia fornecida pelo painel fotovoltaico, MJ;
- η_{global} – rendimento global do sistema, %;
- E_{hid} – energia hidráulica fornecida pela bomba, MJ.

As potências útil (P_u) e absorvida (P_a) pela bomba foram calculadas pelas eq. (23) e (24), respectivamente. Isso permitiu o cálculo da energia elétrica consumida pela bomba (eq. 25) e da energia hidráulica fornecida pela bomba (eq. 26). E por fim, a energia fornecida pelo painel fotovoltaico foi determinada pela integração da radiação solar (eq. 27) durante o dia. A eficiência do painel fotovoltaico foi adotada em 12%.

$$P_u = \gamma \cdot Q_B \cdot H \quad (23)$$

$$P_a = U \cdot I \quad (24)$$

$$E_{\text{elet}} = P_a \cdot t \quad (25)$$

$$E_{\text{hid}} = \gamma \cdot V \cdot H \quad (26)$$

$$\text{Rad} = (\text{Rad}_{\text{solar}} \cdot A) \cdot \eta_{\text{painel}} \quad (27)$$

em que:

- γ – peso específico da água, N m^{-3} ;
- Q_B – vazão da bomba, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$;
- H – pressão, m.c.a.;
- U – tensão elétrica, V;
- I – corrente elétrica, A;
- t – tempo de funcionamento da bomba, s;
- V – volume de água bombeado, m^3 ;
- Rad – radiação solar, W;
- $\text{Rad}_{\text{solar}}$ – radiação solar informada pelo piranômetro, W m^{-2} ;

A – área útil do painel fotovoltaico, m^2 ;

η_{painel} – eficiência do painel fotovoltaico, %.

3.3.2 Preparo da área e plantio

Primeiramente, foi feita a limpeza do terreno com a aplicação de herbicida. Em seguida, como sistematização do terreno, realizou-se a descompactação, aração, destorroamento e levantamento do solo dos canteiros até que ficassem homogêneos (Figura 10).

A adubação de pré-plantio foi feita com a incorporação de 3 kg m^{-2} de esterco bovino curtido e com a aplicação de 200 g m^{-2} do adubo mineral de formulação 4-14-8.

Figura 10 – Imagem da área após o preparo do solo dos canteiros

Após a adubação, os canteiros foram cobertos com plástico do tipo “mulching” com a finalidade de reduzir a competição com plantas daninhas, reduzindo a quantidade de capinas ao longo do ciclo da cultura; e de reduzir também a evaporação da água.

Foram adquiridas 800 mudas de alface do mercado local, sendo 200 de cada variedade (crespa, lisa, americana e japonesa). No dia 7 de outubro foram transplantadas para os canteiros, sendo cada uma irrigada por um emissor (Figura 11).

Figura 11 – Imagem das mudas transplantadas para os canteiros

3.3.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado via clima, através da estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). A ET_o foi estimada pelo método de Penman-Monteith (eq. 17) conforme dados climatológicos diários disponibilizados pela estação meteorológica do LEB, e os valores de K_c utilizados foram os recomendados por Gomes (2001) (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores do coeficiente de cultura (K_c) em função das fases de desenvolvimento da cultura do alface, após o transplântio das mudas

Fase	Período	K_c
II	Transplântio – 16 dias seguintes	0,48
III	Final da fase II – 37 dias seguintes	0,80
IV	Final da fase III - colheita	0,88

Fonte – Gomes (2001)

O tempo de irrigação (TI) de cada canteiro, informado diariamente ao controlador, foi calculado por meio da eq. (19).

3.3.4 Colheita

Procedeu-se a colheita no dia 11 de novembro, quando a cultura completou 35 dias a campo e já apresentava um tamanho comercial, período no qual o kit foi avaliado.

Foram colhidas 20 plantas de cada canteiro para avaliação das seguintes características agronômicas: massa fresca comercial (MFC), massa seca (MS), diâmetro da planta (DP) e altura da planta (HP). As duas primeiras foram determinadas em balança de precisão de duas casas decimais, sendo a MS

mensurada após estufa de circulação de ar forçada regulada à 75 °C por 48 h. O DP e a HP foram medidos por meio de uma trena, realizando-se a média de três repetições.

3.3.5 Avaliação da uniformidade do sistema de irrigação em campo

Duas novas avaliações do desempenho hidráulico do sistema de irrigação foram realizadas a campo, uma aos dois dias após o transplântio e outra após colheita. Coletou-se o volume de água de 20 emissores por linha lateral durante 12 minutos, sendo 5 de cada quartil, e foram obtidos os coeficientes CUC, CUD e UE (Figura 12).

Figura 12 – Imagens dos ensaios de uniformidade a campo

3.3.6 Custos e economia de energia

Com a finalidade de despertar interesse desta técnica para produtores, apresentaram-se os custos de investimento do kit proposto, contemplando os gastos com o sistema de irrigação e com o sistema de bombeamento por energia solar. A cotação de cada item foi realizada em empresas do ramo.

Considerando a relação que 1 kWh equivale a 3.600.000 J, primeiramente realizou-se a soma da energia elétrica consumida pela bomba (eq. 25), nos 35 dias de avaliação, para determinar a economia obtida com a utilização da energia solar ao irrigar os 15 canteiros (270 m²) que o kit desenvolvido tem potencial.

Em uma escala maior, o mesmo foi simulado considerando que no ano de 2015 o sistema funcionou diariamente irrigando a cultura da alface em sua fase de desenvolvimento de maior exigência hídrica ($K_c = 0,88$). Para tal, estimou-se a ETo diária para o ano de 2015 pelo método padrão de Penman-Monteith, como no

manejo da irrigação. A potência absorvida utilizada no cálculo da energia elétrica foi média das potências apresentadas pela bomba a campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dimensionamento do sistema de irrigação por microtubos

O D_m médio determinado pela medição hidráulica foi 0,787 mm, valor 11,05% maior que o informado pelo fabricante. O resultado foi semelhante aos de Almeida e Botrel (2010), que encontraram diferenças de até 11,25%, comprovando a importância de se realizar a determinação do diâmetro interno do microtubo experimentalmente.

Quanto ao comprimento dos microtubos, pode-se observar na Figura 13 o comprimento médio das linhas laterais de 15 a 36 m, bem como o CUD estimado para as mesmas. Considerando-se as linhas laterais do kit de 18 m de comprimento, o L_m médio utilizado foi 126,7 cm. Ressalta-se que para todos os comprimentos de linha lateral, a variação de vazão estimada respeitou a permitida na subunidade (10 a 20%).

Figura 13 – Comprimento médio de microtubos (L_m) e estimativa do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) para diferentes comprimentos de linhas laterais (L_{ll})

Considerando a pressão de entrada no último emissor de 40 kPa e acumulando-se a perda de carga ao longo da linha lateral, a pressão necessária na entrada na linha lateral foi de 42 kPa para um comprimento de 18 m.

4.2 Avaliação do kit de irrigação em laboratório

Com relação à uniformidade, os três coeficientes obtidos em laboratório apresentaram classificação “excelente” (ALMEIDA, 2008; BRALTS, 1986; MANTOVANI, 2002) nas três repetições realizadas, uma vez que todos foram maiores que 90% (Tabela 9). A vazão média dos microtubos na linha lateral está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD), uniformidade estatística (UE) e vazão média dos emissores (q_{med}), em função da repetição

Repetição	CUC (%)	CUD (%)	UE (%)	q_{med} (L h ⁻¹)
	Estimado			
	99,64	99,61	99,97	1,0000
	Medido			
I	96,95	95,75	98,76	0,9922
II	96,47	96,05	98,45	0,9980
III	96,00	95,51	98,18	0,9868
Média	96,47	95,77	98,46	0,9923

Todos os valores dos coeficientes obtidos foram menores que os estimados devido aos fatores não controlados, como: obstrução de algum emissor, erros de montagem da linha lateral ou pela heterogeneidade do microtubo utilizado.

Em condições de laboratório, Katsurayama (2015) ao recomendar pressões de operação na entrada de uma linha lateral para irrigação por microtubos de comprimento variável, obteve CUD de 95,25% para a pressão mínima (16,32 kPa), 97,80% para a pressão ótima (39 kPa) e 97,93% para a pressão máxima (84,43 kPa).

Ao avaliar-se a bomba hidráulica com o registro totalmente aberto a vazão foi de 360 L h⁻¹, valor 26,5% menor que o informado pelo fabricante. Na pressão máxima, a vazão observada foi 21,5% menor que a disponível no catálogo do fabricante.

Para disponibilizar a pressão demandada pelo kit (42 kPa), a bomba forneceu uma vazão de 358 L h⁻¹ e apresentou um rendimento de 10,8% (Figura 14), tendo potencial para irrigar até 15 canteiros na jornada de trabalho estipulada, e não mais 28 como no estudo preliminar baseado nos dados de catálogo (Tabela 5). Como a vazão foi superior àquela demandada pelos canteiros, instalou-se uma tubulação de retorno da água ao reservatório que, por sua vez, alimentava novamente o sistema.

Pode-se observar na Figura 14 que o maior rendimento da bomba (38%) ocorreu na faixa de vazão e pressão de 270 L h⁻¹ e 370 kPa, respectivamente. Isso mostra a importância de se determinar a curva característica da bomba experimentalmente, podendo-se verificar quais os limites para que se tenha melhor execução do projeto.

Figura 14 – Curvas características vazão (Q) x pressão (H) e Q x rendimento (n) da bomba hidráulica Shurflo S8000

Realizar ensaios de emissores ou do conjunto moto-bomba toda vez que um projeto como este for implantado pode gerar contratempos, ou até mesmo ser inviável. Notou-se que nenhum fabricante dos equipamentos avaliados apresentou uma certificação dos dados dos catálogos. Portanto, como uma alternativa de tentar reduzir ou acabar com essas divergências, tornando os valores dos catálogos mais confiáveis, recomenda-se que os fabricantes apresentem uma certificação de seus ensaios.

4.3 Avaliação do kit de irrigação a campo

Com base na Tabela 10, o sistema de irrigação manteve, a campo, uniformidade classificada como “excelente” (ALMEIDA, 2002; BRALTS, 1986; MANTOVANI, 2002) em ambas as avaliações realizadas. A q_{med} foi de 1,0130 e 0,9940 L h⁻¹ nas avaliações 1 e 2, respectivamente. Acrescenta-se que nenhuma linha lateral excedeu o limite de variação de vazão (q_{var}) recomendado por Frizzzone et al. (2012) (Tabela 10).

Diversos trabalhos com sistema de irrigação por microtubos a campo apresentaram coeficientes de uniformidade “excelentes”. Kumar et al. (2015) observaram CUC de 93,65% e CUD de 91,55%, e uma variação de vazão de 18,96%, ao avaliarem 9 linhas laterais de um sistema de irrigação por gravidade com microtubos ramificados desenvolvido na Índia. Souza, Pérez e Botrel (2006) ao avaliarem hidraulicamente um sistema de irrigação com microtubos por gravidade, para vazão de 1 L h^{-1} , em canteiros de alface, obtiveram CUD e UE excelentes (97% e 97,4%, respectivamente). Já Souza et al. (2009) ao implantarem e avaliarem o mesmo sistema de irrigação em comunidades agrícolas do Ceará, obtiveram CUD de 87% e UE de 89%. Souza et al. (2011) utilizando microtubos em regime turbulento de escoamento com comprimentos variáveis, na fertigação em mudas de citros, obtiveram CUE de 98,25%.

Tabela 10 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD), uniformidade estatística (UE), vazão média dos emissores (q_{med}) e variação de vazão (q_{var}), em função da avaliação e da linha lateral

Avaliação	Linha lateral	CUC (%)	CUD (%)	UE (%)	q_{med} (L h^{-1})	q_{var} (%)
1	1	96,40	94,31	95,56	1,0200	16,14
	2	96,70	95,60	95,87	1,0115	13,76
	3	96,80	95,96	96,22	1,0160	12,39
	4	95,50	93,06	92,65	1,0049	15,40
2	1	97,00	94,56	96,20	1,0051	11,86
	2	97,60	96,24	96,98	1,0049	11,88
	3	95,70	93,60	94,97	0,9866	16,37
	4	95,70	94,39	94,69	0,9810	19,82
Média	-	96,43	94,72	95,39	1,0038	14,70

Devido a elevados índices pluviométricos nos dias 2, 3, 14, 15, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31 e 32 de avaliação do kit, não se procedeu a irrigação nos dias seguintes a estes. Para cada canteiro, o sistema de irrigação funcionou ao todo por 4,2 h e aplicou uma lâmina total de 76,02 mm (Figura 15a e Figura 15b).

Figura 15 – Tempo de irrigação por canteiro (TI), precipitação (PPT) (a) e lâminas de irrigação (b) nos dias de avaliação do kit após o transplântio

Com a pressão necessária na entrada das linhas laterais (42 kPa), já se esperava que a moto-bomba não fosse operar no seu ponto ótimo, como apresentado na sua curva característica (Figura 14).

A potência absorvida não se mostrou constante durante a avaliação, variando de 68 a 78 W. Isso ocorreu devido a oscilações na tensão e corrente elétricas, o que acarretou variações na pressão de saída da bomba, fazendo com que a potência útil também oscilasse (3,1 a 6,8 W). A vazão fornecida pela bomba foi de 368 L h^{-1} a uma pressão média de 45 kPa.

Pode-se observar na Figura 16 a variação do η_{mb} durante o período de avaliação, sendo em média de 6,45%. O máximo η_{mb} (9,71%) ocorreu quando as potências absorvida e útil foram de 70,2 e 6,8 W, respectivamente.

Figura 16 – Potências útil (P_u) e absorvida (P_a) da bomba, e rendimento do conjunto moto-bomba (η_{mb}) nos dias de avaliação do kit após o transplante

O conjunto de bombeamento apresentou, durante o período de avaliação, η_{conv} médio e máximo de 9,81% e 36,58%, respectivamente. Na Figura 17 pode-se observar que em todos os dias de avaliação a energia fornecida pelo painel fotovoltaico atendeu a demanda de energia pela bomba.

O sistema apresentou um η_{global} médio de 0,64%. No dia em que se aplicou a maior lâmina aplicada, o sistema apresentou η_{global} de 2,4%, podendo chegar a 9% caso estivessem sendo irrigados os 15 canteiros que a bomba tem potencial (Figura 18). O η_{global} poderia ser maior caso a área irrigada fosse maior, decorrendo em tempos de irrigação maiores, ou até mesmo se o gerador fotovoltaico tivesse área útil menor.

Figura 17 – Energias elétrica consumida pela bomba (E_{elet}) e fornecida pelo painel fotovoltaico (E_{solar}), e rendimento de conversão (η_{conv}) nos dias de avaliação do kit após o transplante

Figura 18 – Energias hidráulica fornecida pela bomba (E_{hid}) e fornecida pelo painel fotovoltaico (E_{solar}), e rendimento global do sistema (η_{global}) nos dias de avaliação do kit

Durante o período de avaliação a campo raras vezes ocorreram entupimentos dos microtubos, sendo facilmente desobstruídos quando ocorreram. As verificações de obstrução dos emissores foram realizadas até a cultura apresentar um desenvolvimento vegetativo avançado, capaz de cobrir a saída de água do emissor.

O manejo da irrigação foi realizado de forma adequada e simples, informando no controlador o tempo de irrigação com maior gerenciamento da lâmina de água aplicada.

O controlador de carga indicou em todos os dias de avaliação que a bateria estava em carga máxima. Pode-se citar um benefício do uso da bateria caso a área

irrigada fosse maior: nos dias 21 e 24, em que os tempos de irrigação foram maiores e o painel solar forneceu menos energia, o kit ainda conseguiria atender a demanda dos canteiros.

4.4 Avaliação da produção da cultura da alface

Na Tabela 11 estão dispostas as características agronômicas das variedades utilizadas na avaliação do kit de irrigação, e na Figura 19 o *stand* homogêneo da produção destas variedades antes da colheita.

Tabela 11 – Média das características agronômicas massa fresca comercial (MFC), massa seca (MS), diâmetro da planta (DP) e altura da planta (HP) em função da variedade de alface

Variedade	MFC (g)	MS (g)	DP (cm)	HP (cm)
Japonesa	317,9	14,1	19,2	40,2
Lisa	256,1	13,9	15,6	37,3
Americana	217,0	13,2	12,8	33,9
Crespa	181,2	10,1	18,4	36,0

Figura 19 – Imagens do *stand* da produção das variedades japonesa (a), lisa (b), americana (c) e crespa (d)

Ressalta-se que tais valores e produções não foram obtidos apenas em função do sistema em estudo, porém comprova-se que foi possível obter elevadas produtividades com um sistema de irrigação de baixa mão-de-obra, bem como a utilização de uma energia alternativa.

4.5 Custos e economia de energia

O custo fixo total de implantação do kit desenvolvido, para a área em estudo, foi de R\$ 4.313,33 para opção automatizada, ou seja, com controlador de irrigação e válvulas solenóides para os canteiros. Caso o usuário opte por uma opção sem automação, o kit apresentaria um custo inicial de R\$ 3.088,33.

Na Tabela 12 é apresentada a lista dos itens que seriam utilizados no kit de irrigação e seus respectivos custos caso fossem irrigados 15 canteiros.

Tabela 12 – Custos de aquisição dos sistemas de irrigação e de bombeamento por energia solar

Itens	Vida útil (anos)	Quantidade	Unidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
a) Sistema de irrigação					
Microtubo faixa verde	5	4562	m	0,09	410,58
Tubo PVC (20 mm x 6 m)	5	45	m	10,00	450,00
Controlador de irrigação	15	2	un	500,00	1000,00
Válvulas solenóides	5	15	un	15,00	225,00
Filtro de disco	5	1	un	65,00	65,00
Reservatório (150 L)	15	1	un	160,00	160,00
União (20 mm x ½")	5	30	un	4,00	120,00
Cap (20 mm x ½")	5	15	un	0,90	13,50
Tê interno (½")	5	15	un	1,55	23,25
Abraçadeiras de metal	5	45	un	0,80	36,00
Total	-	-	-	-	2.503,33
b) Bombeamento solar					
Bomba Shurflo S8000	15	1	un	450,00	450,00
Painel fotovoltaico	25	1	un	750,00	750,00
Controlador de carga	10	1	un	320,00	320,00
Bateria	4	1	un	290,00	290,00
Total	-	-	-	-	1.810,00

Para o período de avaliação, o kit promoveu economia de energia de 4,5 kWh. Ao simular a lâmina requerida pela alface em seu estágio de desenvolvimento com maior exigência de água no ano de 2015, observou-se que o sistema operou por um período de 58,1 h, aplicando lâmina total de 973,2 mm, gerando economia de 63 kWh.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi realizado, conclui-se que para projetos de sistemas de irrigação por gotejamento utilizando microtubos como emissor, recomenda-se que os fabricantes, tanto dos emissores quanto da moto-bomba, apresentem uma certificação dos ensaios que geraram os dados disponibilizados nos catálogos. Isto poderia diminuir, ou até mesmo acabar, com as variações observadas.

O kit desenvolvido, utilizando-se de microtubos de comprimento fixo e linhas laterais de tubos de PVC, é tecnicamente viável para a irrigação de olerícolas, pois apresentou uniformidade excelente.

Os rendimentos obtidos mostraram que o projeto poderia ser mais bem otimizado se houvesse maior disponibilidade de equipamentos com diferentes características no mercado.

O custo fixo total do kit desenvolvido para a irrigação de 15 canteiros foi de R\$ 4.313,33, promovendo economia de energia de apenas 4,5 kWh para o ciclo da cultura da alface. Assim, a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte de energia para a irrigação de olerícolas é viável em situações onde a instalação da energia elétrica convencional fica onerosa, devido às grandes distâncias das redes de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 7: Estrutura Tarifária das Concessionárias de Distribuição**. Disponível em :<<http://aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 mar 2016.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo – guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 323p. (Riego y Drenaje, Paper 56).

ALMEIDA, C.D.G.C. **Microaspersor com microtubos**: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada. 2008. 104p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A. Determinação do diâmetro de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.5, n. 3, p.413-417, 2010.

ALVES, D.G.; PINTO, M.F.; DAMASCENO, A.P.A.B.; SALVADOR, C.A.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de microtubos ramificados. In: II INOVAGRI International Meeting, 2014, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a216>>. Acesso em: 22 out. 2014.

ANDRADE, M.G. **Efeito de um sistema de bombeamento de água fotovoltaico na operação de um microaspersor**. 2013. 97p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

ARAÚJO, J.A.B. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão**. 2003. 158p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A.. **Trickle of irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986, chapter 3, p.216-240.

BRASÍLIO, J.G.L.; GUEDES, G.P. Projeto e desenvolvimento de uma bancada de testes para baterias estacionárias conectadas em série. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 4., 2012, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: USP; INCT-EEREA, 2010. Resumo 330.

CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.49, p.1084-1099, May 2015.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô central, em culturas de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.5, n.1, p.34-53, 1994.

FRIZZONE, J.A.; DE FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; DE FARIA, M.A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356p.

GOMES, T.M. **Efeito do CO₂ na água de irrigação e no ambiente sobre a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2001. 83p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

GRAH, V.F. **Avaliação do posicionamento de geradores fotovoltaicos com sistema rastreador manual aplicado ao bombeamento de água para irrigação**. 2014. 98p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

HAMIDAT, A.; BENYOUCEF, B.; HARTANI, T. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. **Renewable Energy**, Oxford, v.28, p.1081-1096, 2003.

ISHAQ, A.M.; IBRAHIM, M.A. The design of trickle irrigation systems with microtubes as emitters. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MICROIRRIGATION, 5., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p.708-716.

KATSURAYAMA, G.T. **Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo**. 2015. 54p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

KELL, G.S. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0° to 150°C. **Journal of Chemical Engineering Data**, Washington, v.20, p.97-105, 1975.

KELLER, J.; ADHIKARI, D.L.; PETERSEN, M.R.; SURYAWANSHI, S. **Engineering low-cost micro-irrigation for small plots**. International Development Enterprises, 2001. 25p. Disponível em: <<http://www.ideorg.org/html/library/library.jsp>>. Acesso em: 22 out. 2014.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GILTRLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.2, p.167-173, 1979.

KOLLING, E.M.; SOUZA, S.N.M.; RICIERI, R.P.; SAMPAIO, S.C.; DALLACORT, R. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.527-535, set./dez., 2004.

KRUSE, E.G. Describing irrigation efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n.1, p.35-41, 1978.

KUMAR, M.; REDDY, K.S.; ADAKE, R.V.; RAO, C.V.K.N. Solar powered micro-irrigation system for small holders of dryland agriculture in India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.158, p.112-119, May 2015.

LÓPEZ-LUQUE, R.; RECA, J.; MARTÍNEZ, J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaics system for deficit irrigation of olive orchards. **Applied Energy**, London, 149, p.13-23, Apr. 2015.

MANTOVANI, E.C. **Avalia**: manual do usuário. Viçosa: DEA/UFV – PNP&D/Café Embrapa, 2002. 100p.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação**: princípios e métodos. 3. ed. Viçosa: UFV, 2012. 355p.

MARQUES, P.A.A. **Modelo computacional para determinação do risco econômico em culturas irrigadas**. 2005. 168p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MARQUES, P.A.A.; MARQUES, T.A. Programa Pupunha: software para avaliação econômica da irrigação da pupunha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p.379-384, 2002.

MEAH, K.; ULA, S.; BARRETT, S. Solar photovoltaic water pumping – opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.12, p.1162-1175, 2008.

MELÉNDEZ, T.A.F. **Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**. 2009. 86p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MELLO, C.R.; CARVALHO, J.A.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; REINATO, C.H.; SANTANA, M.J. Economia de Energia e instalação de bombeamento para irrigação com uso de inversor de frequência. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 4, p. 78-88, 1999.

MICHELS, R.N.; RICIERI, R.P.; GNOATTO, E.; SOUZA, S.N.M.; SILVA, S.L.; FISCHBORN, M. Avaliação de bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, p.370-379, jul./set. 2009.

MORALES, L.R.V. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 2011. 154p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NOGUEIRA, C.U. **Utilização de sistemas, solar e eólico, no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

PINTO, M.F.; CAMARGO, A.P.; RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A. Caracterização hidráulica de tubos porosos oriundos de pneus reciclados utilizados em irrigação subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 1095-1101, 2014.

SÁ, D.A.P. **Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água**. 2010. 56p. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, E.C.; DE SOUZA, L.C.; SOUTO, J.S.; ARAÚJO FILHO, J.B. Energia solar na fruticultura irrigada familiar. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v.1, n.2, p.1-7, dez. 2007.

SILVA, S.S. **Desempenho hidráulico de sistema de irrigação com microtubos gotejadores sob fertirrigação**. 2011. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SOARES, A.A. **Características hidráulicas de microtubos Cipla e linhas laterais para irrigação por gotejamento**. 1981. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

SOUZA, J.L.M.; FRIZZONE, J.A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada. I. simulação do balanço hídrico e do custo com água. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.25, n.1, p.103-112, 2003.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p. 16-22, 2004.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento com microtubos**. 2005. 100p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 266-279, abr./jun. 2006.

SOUZA, R.O.R.M.; MIRANDA, E.P.; NASCIMENTO NETO, J.R.; FERREIRA, T.T.S.; MESQUITA, F.P. Irrigação localizada por gravidade em comunidades agrícolas do Ceará. **Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 1, p. 34-40, 2009.

SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. Fertirrigação em mudas de citros utilizando-se mangueiras e microtubos sob regime de escoamento turbulento. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.8, p.816-822, 2011.

TAKANORI, G.K. **Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo**. 2015. 53p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

TURCO, J.E.P.; RIZZATTI, G.S.; PAVANI, L.C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.311-320, abr./jun. 2009.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Design of small photovoltaic (PV) solar-powered water pump systems**. Portland, Oregon, Oct. 2010. Technical Note No. 28. 64p.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Localized irrigation: Design, installation, operation, evaluation**. Rome: FAO, 1980. 203p.