

LAÍS FERNANDA JUCHEM DO NASCIMENTO

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO COM SISTEMA FOTOVOLTAICO AMORFO PARA
BOMBEAMENTO DE ÁGUA

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
DEZEMBRO – 2018

LAÍS FERNANDA JUCHEM DO NASCIMENTO

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO COM SISTEMA FOTOVOLTAICO AMORFO PARA
BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentado à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz
Siqueira

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Antonio
Vilas Boas

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo
Camargo Nogueira

CASCADEL

PARANÁ – BRASIL

DEZEMBRO – 2018

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Nascimento, Laís Fernanda Juchem

Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água : Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água / Laís Fernanda Juchem Nascimento; orientador(a), Jair Antônio Cruz Siqueira; coorientador(a), Marcio Antonio Vilas Boas, coorientador(a)II, Carlos Eduardo Camargo Nogueira, 2018.

155 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, , Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2018.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Sistema de irrigação por gotejamento. 3. CUC e CUD. 4. Shewhart. I. Cruz Siqueira, Jair Antônio . II. Vilas Boas, Marcio Antonio . III. Camargo Nogueira, Carlos Eduardo . IV. Título.

LAÍS FERNANDA JUCHEM DO NASCIMENTO

“Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Roberto Moreira

Faculdade Assis Gurgacz – Cascavel (FAG)

Cascavel, 7 de dezembro de 2018

“Dedico ao meu pai (in memoria) e mãe que formam o pilar principal de minha vida”.

*“Ofereço ao meu noivo e aos nossos filhos que virão e que serão meu amor
incondicional”.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida.

Agradeço ao meu pai Sabino, minha grande saudade.

Agradeço a todos que me auxiliaram nesta caminhada de vida, principalmente a minha mãe Amália, irmãos Fernando e Leonardo, irmã Sabrina, meu cunhado Plínio. Vocês são a minha maior fortaleza. Ainda, meus avós Amélia e Ewaldo, muito obrigada.

Agradeço às minhas sobrinhas, Sara e Cecília, que são um dos amores da minha vida.

Agradeço às minhas amigas Mariana, Nayane e Alessandra que compartilham dos meus melhores momentos e me motivam nos piores.

Agradeço em especial a minha cunhada, Nayara, que embarcou nesta caminhada desde o começo. Você foi primordial nisso tudo. A amo incondicionalmente.

Agradeço também ao meu noivo, Ricardo, que soube compreender nos momentos de ausência e me apoiar nos meus sonhos fazendo deles o seus.

Agradeço a Kauanna por ter dividido a vida neste período, obrigada por tudo!

Agradeço aos amigos que fiz no mestrado Bianca, Everton, Ricardo, Júlio, Luzia, Soni, João, Cláudia, Bruna e João vocês foram demais!

Agradeço imensamente ao meu orientado prof. Jair, por me auxiliar desde a caminhada acadêmica e por todo conhecimento compartilhado. Obrigada por sempre ver potencial em mim!

Agradeço ao Prof. Márcio, por estar sempre disposto a ensinar incondicionalmente. Sou muito grata por todo conhecimento estatístico compartilhado.

Agradeço à Profa. Luciene por ser sempre atenciosa. Tenho uma grande admiração por ti como pessoa e profissional.

Agradeço ainda ao Prof. Carlos Eduardo pelas dicas e conhecimento.

Agradeço à banca que contribuiu com este trabalho, Profa. Maritane e Prof. Carlos Moreira.

Agradeço a todos que me auxiliaram nas coletas: Renan, Everton, Soni, Lorenzo, Gabriela e Maurício. Gratidão!

Agradeço à Profa. Marta pelo empréstimo do material, meu muito obrigada. E a Carlos por ter dado o suporte técnico para este trabalho que foi fundamental.

Agradeço a Vanderléia pelos conselhos e por tudo que realiza pelos alunos!
Agradeço também ao coordenador do curso Prof. Samuel.
Agradeço ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior- Brasil (CAPES).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das Aplicações Práticas de Energia Solar.....	4
Figura 2: Componentes da radiação solar.	6
Figura 3: Radiação horizontal global anual e diária em diferentes zonas do planeta Terra.....	7
Figura 4: Média de radiação solar Global Horizontal, Direta Normal, Difusa e no Plano Inclinado na Latitude encontradas no Estado do Paraná.	9
Figura 5: Radiação solar da cidade de Cascavel.	10
Figura 6: Percentual da produção total (MWp) ao longo dos anos.....	11
Figura 7: (a) Estrutura típica da célula solar; (b) princípio de funcionamento.	13
Figura 8: Células solares de primeira geração: (a) silício monocristalino (b) policristalino.....	15
Figura 9: Células solares de segunda geração: (a) silício amorfo; (b) CIGS; (c) CdTe.	16
Figura 10: Eficiência em laboratório.	16
Figura 11: Representação do silício amorfo.	17
Figura 12: Estrutura da célula de silício amorfo.	18
Figura 13: Processo hierarquizado de agrupamento: célula, módulo e painel fotovoltaico.	19
Figura 14: Estrutura Padrão do módulo fotovoltaico.	20
Figura 15: Representação esquemática da associação em série de módulos fotovoltaicos.	21
Figura 16: Representação esquemática da associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.	21
Figura 17: Sistema fotovoltaico conectado à rede com medidor bidirecional.....	23
Figura 18: Layout do sistema fotovoltaico off-grid.	24
Figura 19: Sistema fotovoltaico de bombeamento para elevação de água com aplicações para consumo humano, animal e irrigação.....	26
Figura 20: Gráfico de controle em formato conceitual.....	34
Figura 21: Vista Panorâmica do Centro de Análise de Sistemas Alternativos e da implantação dos experimentos. 1-Sistema de irrigação out door; 2- Sistema de irrigação in door; 3- Painel fotovoltaico do sistema; 4- Reservatório de água com sistema motobomba; 5- Localização do datalogger; N- Norte geográfico do local.....	36
Figura 22: Vista superior com a posição dos equipamentos no experimento. (Sem Escala)	37
Figura 23: Painel fotovoltaico de silício amorfo instalado para o experimento na inclinação 35 graus e voltado para o norte geográfico.....	38

Figura 24: Piranômetro instalado nas mesmas inclinação e orientação do painel fotovoltaico.	39
Figura 25: Motobomba. (a) Bomba do tipo submersa marca Solarjack (b) colocação da bomba na caixa d'água.	40
Figura 26: Reservatório de água utilizado. (a) demarcação do nível d'água empregado (b) mangueira que interliga o sistema motobomba com o sistema de irrigação.....	41
Figura 27: Medidor de vazão de água Yf-s201.....	42
Figura 28: Croqui do sistema de irrigação por gotejamento.....	43
Figura 29: Tubo gotejador da marca Netafim, modelo Micro Drip.	43
Figura 30: Coletor do sistema de irrigação por gotejamento (a) coletor utilizado com a distância da linha de gotejadores até o solo (b) distância da linha de gotejadores até a abertura do coletor.	44
Figura 31: Manômetros utilizados (a) entrada do sistema após a caixa d'água (b) entrada do sistema de irrigação por gotejamento (c)final do sistema de irrigação por gotejamento.....	45
Figura 32: Sistema de irrigação por gotejamento implantado próximo do laboratório CASA.	45
Figura 33: (a) Estação meteorológica (b) e receptor de dados.	46
Figura 34: Sistema de irrigação por gotejamento implantado dentro do CASA.....	47
Figura 35: Datalogger da Campbell Scientific, modelo CR1000.....	47
Figura 36: Delineamento utilizado no experimento.	49
Figura 37: Diagrama geral da montagem experimental. Onde: (1) painel fotovoltaico; (2) circuito de seccionamento + sensoramento para datalogger; (3) caixa d'água; (4) bomba d'água submersa; (5) manômetro de saída da bomba; (6) sensor de fluxo de água; (7) manômetro de entrada do sistema de irrigação; e (8) sistema de irrigação.	50
Figura 38: Arranjos dos geradores fotovoltaicos amorfos.	51
Figura 39: Diagrama elétrico, posicionamento e ligações dos sensores.....	52
Figura 40: Coletas realizadas na metodologia de Keller e Karmeli para a irrigação.	57
Figura 41: Coletas realizadas na metodologia de Denículi para a irrigação.....	58
Figura 42: Temperatura média (°C) e umidade relativa média (%) dos ensaios caracterizados como céu abertos para a estação do outono (1 a 10) e primavera (11 a 20).	61
Figura 43: Temperatura média (°C) e umidade relativa média (%) dos ensaios caracterizados como parcialmente nublados para a estação do Outono (1 a 10) e Primavera (11 a 20).....	62
Figura 44: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na estação do outono.	66
Figura 45: Gráficos de controles individuais para a eficiência do sistema solar fotovoltaica (%) e vazão média (L h ⁻¹) para dias de céu aberto (1 ao 20) e	

parcialmente nublados (21 ao 40) do sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento montado na estação do outono.	67
Figura 46: Histograma do CUC do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado no Outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.	68
Figura 47: Histograma do CUD do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.	68
Figura 48: Distribuição média das vazões encontradas no sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento para os dias caracterizados como céu aberto, no outono, para os horários: (a) 9h:45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	69
Figura 49: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento para os dias caracterizados como parcialmente nublados, no outono, para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	70
Figura 50: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na estação na primavera.	72
Figura 51: Gráficos de controles individuais para a eficiência do sistema solar fotovoltaico (%) e vazão média Lh^{-1} para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na estação na primavera.	73
Figura 52: Histograma do CUC do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados. ...	74
Figura 53: Histograma do CUD do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados	75
Figura 54: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>indoor</i> por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como céu aberto para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	75
Figura 55: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>indoor</i> por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como parcialmente nublados para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	76
Figura 56: Variação de CUC e CUD (%) do sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975) referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	77
Figura 57: Variação de CUC e CUD (%) do sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Denículi et al. (1980) referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	78
Figura 58: Variação de CUC e CUD (%) do sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia Total referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	79
Figura 59: Gráficos de controles individuais para o vento para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono.	83

Figura 60: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublado (21 ao 40).....	84
Figura 61: Gráficos de controles individuais para a eficiência solar (%) e vazão média L h ⁻¹ para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono.	85
Figura 62: Histograma do CUC do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados	86
Figura 63: Histograma do CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.	87
Figura 64: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>outdoor</i> por gotejamento na estação do outono para os dias caracterizados como céu aberto para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	88
Figura 68: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>outdoor</i> por gotejamento na estação do outono para os dias caracterizados como parcialmente nublado para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	89
Figura 66: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).....	91
Figura 67: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).....	92
Figura 68: Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).....	93
Figura 69: Histograma do CUC do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados. ...	94
Figura 70: Histograma do CUD do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados. ...	94
Figura 71: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>outdoor</i> por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como céu aberto para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	95
Figura 72: Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação <i>outdoor</i> por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como parcialmente nublados para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h30min e (d) 15h.	96
Figura 73: Variação de CUC e CUD (%) do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975) referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	96

Figura 74: Variação de CUC e CUD (%) do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Denículi et al. (1980) referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	98
Figura 75: Variação de CUC (%) do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento conforme a metodologia Total referente a estação do outono (1-40) e primavera (41-80).	99
Figura 76: Médias do CUC (%), CUD (%) e Eficiência do Sistema Fotovoltaico (%) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> no Outono.	102
Figura 77: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> no Outono.	104
Figura 78: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> no Outono.	105
Figura 79: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> na primavera.	107
Figura 80: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> na primavera.	108
Figura 81: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> na primavera.	110
Figura 82: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> no outono.	113
Figura 83: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> no outono.	114
Figura 84: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> no outono.	115
Figura 85: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> na primavera.	117
Figura 86: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> na primavera.	118
Figura 87: Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m ²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> na primavera.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Top 10 países para instalações e total capacidade instalada em 2017.....	12
Tabela 2: Especificações técnicas de módulo JN40F da Solarterra.....	39
Tabela 3: Especificações técnicas do piranômetro CMP3 da Kipp & Zonen.....	40
Tabela 4: Especificações técnicas da bomba d'água SDS-D-228 da SolarJack.....	41
Tabela 5: Especificações técnicas do sensor de fluxo de água	42
Tabela 6: Especificações do Datalogger CR 1000, da Campbell Scientific.....	48
Tabela 7: Critérios para classificação de CUC	56
Tabela 8: Critérios para classificação de CUD	57
Tabela 9: Valores de Tensão Real (V) e Corrente Real (A) encontradas nas estações do ano outono e primavera.	63
Tabela 10: Valores de Irradiação encontrada nas estações do ano outono e primavera.	64
Tabela 11: Análise descritiva das variáveis CUC, CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação do sistema <i>indoor</i> por gotejamento na estação do outono.	64
Tabela 12: Análise descritiva das variáveis CUC, CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação do sistema <i>indoor</i> por gotejamento na estação da primavera.	71
Tabela 13: Análise descritiva das variáveis CUC, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação e velocidade do vento para o sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono.	81
Tabela 14: Análise descritiva das variáveis CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação para o sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono.	82
Tabela 15: Análise descritiva das variáveis CUC, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaico, irradiação e velocidade do vento para um sistema <i>outdoor</i> por gotejamento na estação da primavera.	90
Tabela 16: Análise descritiva das variáveis CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica, irradiação e velocidade do vento para um sistema <i>outdoor</i> por gotejamento na estação da primavera.	91
Tabela 17: Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto para dias nublados.....	101
Tabela 18: Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema <i>indoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto e dias nublados.....	106

Tabela 19: Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto para dias nublados.....	111
Tabela 20: Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento na estação da primavera para os dias de céu aberto e para dias nublados	116

RESUMO

NASCIMENTO, Laís Fernanda Juchem. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, dezembro de 2018. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água.** Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Coorientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas. Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

A energia solar é uma opção limpa e renovável de produção de energia e pode ser aplicada para as mais distintas finalidades, bem como aquecimento de água, iluminação, energização rural, bombeamento de água etc. Entre esses usos, o bombeamento de água é uma das tecnologias mais disseminadas quanto ao emprego de energia solar fotovoltaica. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento em função da utilização de um sistema fotovoltaico amorfo de bombeamento de água, sem armazenamento de energia elétrica. O referido sistema foi instalado nas dependências da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel-PR. Com isso, coletou-se os dados da tensão e corrente elétrica gerados pelos painéis da marca JN40F da Solarterra; temperatura ambiente, umidade relativa do ar pela estação meteorológica da marca Instrutemp-ITWH 1080; a irradiação solar foi medida pelo aparelho piranômetro da marca Kipp & Zonen; vazão da bomba d'água da marca Solarjack pelo fluxômetro. Os ensaios foram realizados em dias de céu aberto e parcialmente nublados para um sistema de irrigação por gotejamento *indoor* e *outdoor* em diferentes horários do dia. Os resultados encontrados permitiram concluir que o sistema de irrigação apresentou melhor desempenho nas condições *indoor* e *outdoor* na estação do outono, tanto para os dias de céu aberto, quanto nos dias de céu nublado, com valores de CUC e CUD acima de 80%. As variações do desempenho do sistema de geração fotovoltaico não influenciaram o desempenho do sistema de irrigação. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

PALAVRAS-CHAVE: energia solar; sistemas fotovoltaicos, sistema de irrigação por gotejamento.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Laís Fernanda Juchem, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, december 2018. **Performance of an irrigation system for dripping with amorfo photovoltaic system for water pumping.** Advisor: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Coorientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas. Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

Solar energy is a clean and renewable option for energy production and can be used for different purposes such as water heating, lighting, rural energization, water pumping, among others. What is the use of photovoltaic solar energy. In this context, the objective of this work was to evaluate the performance of a drip irrigation system as a function of the use of an amorphous photovoltaic solar pumping system. water, without storage of electricity. The same was installed in the dependencies of the State University of the West of Paraná - Campus Cascavel-PR. Collection of voltage and current generated by the panels of the brand JN40F of Solarterra; ambient temperature, the part relating to the meteorological station of the brand Instrutemp-ITWH 1080; solar irradiation by the pyranometer apparatus brand Kipp & Zonen; and pump flow of the brand Solarjack brand through the flowmeter. The tests were performed on open and partly cloudy days for an in-door drip irrigation system and for the same out door for different times of the day. The results showed that the irrigation system presented better performance in the indoor and outdoor conditions in the autumn season, both for open air days and cloudy days, with CUC and CUC values above 80%. The main conclusion was that the performance variations of the photovoltaic generation system did not influence the performance of the irrigation system.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior- Brasil (CAPES)- Finance Code 001.

KEY WORDS: solar energy; photovoltaic systems, drip irrigation system.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Energia solar	3
2.1.1. Potência Solar	5
2.2.2. Energia Solar Fotovoltaica	10
2.2.3. Células fotovoltaicas.....	13
2.2.3.1. Células de Silício Amorfás.....	17
2.2.4. Módulos solares fotovoltaicos	19
2.2.5 Sistemas solares fotovoltaicos	22
2.3. Bombeamento de Água com Pannel Fotovoltaico	25
2.3.1 Uso de Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação	28
2.4. Sistema de Irrigação	29
2.4.1. Sistema de Irrigação por gotejamento.....	30
2.4.2. Avaliação de desempenho de sistema de irrigação	31
2.5. Gráfico de controle de Shewhart	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1. Material.....	36
3.1.1. Localização da Área Experimental	36
3.1.2 Características Ambientais do Experimento	36
3.1.3.1. Pannel Fotovoltaico Utilizado no Experimento	38
3.1.4. Sistema de bombeamento de água do experimento	40
3.1.5. Sistemas de Irrigação por Gotejamento	43
3.1.5.1.Sistema de Irrigação por Gotejamento <i>outdoor</i>	45
3.1.5.2.Sistema de Irrigação por Gotejamento <i>indoor</i>	46
3.1.6. Datalogger	47
3.2 Métodos.....	48
3.2.1 Coleta de dados	48
3.2.2. Montagem e funcionamento do experimento	49
3.2.3. Arranjo dos Módulos fotovoltaicos do experimento	51
3.2.4. Método de aquisição de dados por meio do datalogger	51

3.2.4.1. Tensão e correntes reais.....	53
3.2.4.2. Potência	54
3.2.5. Energia solar disponível e energia consumida pela carga	54
3.2.5.1. Determinação da eficiência dos painéis, da bomba e do sistema	55
3.2.8 Avaliação do desempenho do sistema de irrigação por gotejamento	55
3.2.8.1. Coeficiente de Uniformidade de Christiansen	55
3.2.8.2. Coeficiente de Uniforme CUD	56
3.2.8.4. Metodologia de Keller e Karmeli (1975)	57
3.2.8.5. Metodologia de Denículi et al. (1980)	58
3.2.8.6. Teste de Normalidade	58
3.2.9. Análise de limites por gráficos de Shewhart.....	59
3.2.10. Análise de vazões médias de distribuição.....	60
3.2.11 Avaliação comparativa entre a eficiência do sistema de bombeamento fotovoltaico e o desempenho do sistema de irrigação por gotejamento.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Análises dos dados meteorológicos do experimento	61
4.2 Análises dos parâmetros do sistema solar	62
4.2.1 Irradiação solar.....	63
4.3 Avaliação do coeficiente de uniformidade para o sistema de irrigação por gotejamento em condições <i>indoor</i> e <i>outdoor</i> nas estações outono e primavera.....	64
4.3.1 Análises da uniformidade do sistema indoor de irrigação por gotejamento e da eficiência do sistema solar fotovoltaico na estação do outono por gráficos de controle	64
4.3.2 Análise da uniformidade do sistema indoor de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação da primavera por gráfico de controles	71
4.3.3 Análises das metodologias de coletas para o sistema <i>indoor</i> por gotejamento	76
4.3.4 Análise da uniformidade do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação do outono por gráfico de controles	81
4.3.4 Análise da uniformidade do sistema <i>outdoor</i> de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação da Primavera por gráfico de controles	89
4.3.5 Análises das metodologias de coletas para o sistema outdoor por gotejamento na Estação do outono e primavera.....	96

4.4.1 Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação <i>indoor</i> por gotejamento com um sistema de bombeamento fotovoltaico amorfo	101
4.4.1.1 Análises do sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> montado na estação do outono	101
4.4.1.2 Análise do sistema de irrigação por gotejamento <i>indoor</i> montado na estação da primavera	106
4.4.2 Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação <i>outdoor</i> por gotejamento com um sistema de bombeamento fotovoltaico amorfo	111
4.4.2.1 Análise do sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> montado na estação do outono	111
4.4.2.2 Análise do sistema de irrigação por gotejamento <i>outdoor</i> montado na estação da primavera	116
5.CONCLUSÕES	121
6.REFERÊNCIAS.....	122

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica dita o ritmo das atividades do setor industrial, comercial e agrícola, com relação à aquisição de bens e serviços tecnológicos que demandam acesso à rede elétrica e expressam o consumo de energia elétrica (KHARE; NEMA; BAREDAR, 2016; GUVEN; SULUN 2017). A Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) estima que 1,2 bilhões de pessoas, cerca de 17% da população mundial, não têm acesso à eletricidade. De acordo com Dassie (2017), isto ocorre por esta população viver em áreas afastadas ou isoladas, o que eleva o custo de instalação de redes de transmissão e distribuição de eletricidade.

As hidrelétricas possuem a maior participação energética na capacidade instalada, segundo a matriz energética brasileira (EPE, 2018). A fim de diversificar, tem-se estudado cada vez mais sistemas descentralizados de suprimento de energia alternativa, utilizando recursos renováveis (BARBOSA FILHO et al., 2015). Pode-se citar, principalmente, a energia eólica, biomassa e energia solar. São consideradas energias limpas por não agredir ao meio ambiente e, além disso, são renováveis, pois a reposição natural de suas fontes no meio ocorre de forma mais rápida do que o seu consumo pelo homem (BASSO, 2010).

Para Akikur et al. (2013), a energia fotovoltaica recebeu maior relevância no esforço de oferecer energia para áreas rurais fora da rede, principalmente pelo fato de implementações bem-sucedidas em todo o mundo. Dessa maneira, os sistemas fotovoltaicos autônomos *off-gride* tornam-se uma opção de atender a uma única demanda de energia do que as fontes rurais comumente usadas, como geradores a diesel. Entretanto, em sistemas autônomos (*off-grid*) de geração de energia solar, nem sempre o consumo elétrico é proporcional a demanda de radiação no momento. Por isso, para Sen e Bhattacharyya (2014), é necessário o estudo aprofundado dessa problemática em pesquisas científicas.

Em sua pesquisa, Khan e Arsalan (2016) apontaram a energia solar fotovoltaica como uma alternativa sustentável e viável por ser um tipo energético de alta disponibilidade. Além disso, uma tecnologia relativamente acessível e adequada para áreas urbanas como a rural, ainda mais por ser um sistema de fácil expansão e manutenção.

Para Viela Bione e Fraidenraich (2004), o bombeamento fotovoltaico de água pode ser utilizado no Brasil e representar uma solução às famílias em pequenas propriedades rurais, sobretudo, em regiões áridas e semiáridas. Entretanto, para isso, Michels et al. (2009) apontam que se deve entender o funcionamento do painel e, conseqüentemente, sua tensão, a corrente e a potência geradas pelo sistema, como também as especificidades do conjunto motobomba e a radiação média da região em todas as estações do ano.

Para Ludwig (2012), a racionalização do consumo dos recursos hídricos é um assunto importante no contexto atual. Com isso, é oportuna a utilização de métodos mais eficientes quanto ao uso consciente e criterioso deste insumo. A partir disso, recomenda-se a irrigação localizada por ser um dos meios mais eficazes de aplicação de água para as plantas, principalmente, a irrigação por gotejamento. Além disso, cita que a principal vantagem desta técnica está no fato de que a irrigação é realizada diretamente na região radicular, em baixas vazões e alta frequência, mantendo o teor de água em nível ideal.

Sendo assim, o trabalho proposto teve o objetivo geral de avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com a utilização de um sistema de bombeamento de água com um sistema fotovoltaico amorfo. Os objetivos específicos do trabalho consistiram na determinação dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água (CUD) e pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), sem armazenamento de energia com um experimento *indoor* e *outdoor* para avaliar o desempenho da irrigação. Destacou-se, ainda, como objetivo específico determinar a geração da energia fotovoltaica durante o bombeamento de água para o sistema de irrigação e avaliar a influência da variabilidade da geração fotovoltaica no desempenho do sistema de irrigação em dias de céu aberto e dias de céu parcialmente nublado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia solar

O conhecimento da radiação solar incidente na Terra desde os primórdios se aplica a muitas atividades humanas como a agricultura, arquitetura e planejamento energético (DA CUNHA KEMERICH et al., 2016). De acordo com Funari e Tarifa (2018), a maioria das fontes de energia como a hidráulica, biomassa, combustíveis e energia dos oceanos, são formas indiretas dessa energia. Além de ser importante no desenvolvimento dos processos físicos que geram o tempo e clima.

Para Nascimento e Hausmann (2015), existem muitas vantagens no uso direto da energia proveniente do sol. A primeira é a sua alta capacidade de renovação, que, considerando a escala de tempo humana, é quase infinita. Além disso, sua operação é silenciosa e não poluente mitigando os impactos ambientais. E, por fim, é uma fonte flexível em razão da sua viabilidade de aplicação e disponibilidade, o que elimina problemas de transporte por grandes distâncias, diminuindo as perdas por transmissão e distribuição, bem como falhas características do sistema convencional.

A energia solar é denominada como a energia eletromagnética proveniente da luz e do calor do Sol. É produzida por meio de reações nucleares incidida na superfície da Terra a partir do espaço interplanetário. O total de energia que incide na superfície terrestre em um ano, é superior a dez mil vezes o consumo anual de energia bruta da humanidade (CRESESB, 2014). Essa energia tem potencial para ser utilizada de diferentes maneiras tecnológicas como: o aquecimento solar; a energia solar fotovoltaica; a energia heliotérmica; a arquitetura solar e a fotossíntese artificial (NREL, 2017).

Por meio da Figura 1 nota-se que existem dois grandes grupos de aplicação prática da energia solar: energia solar ativa e passiva. A energia solar passiva se resume na Arquitetura Solar, em que os projetos arquitetônicos são planejados a fim de edificações com eficiência energética. A forma ativa acontece quando a energia solar é convertida de forma direta em energia elétrica podendo ser via a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. A utilização de energia solar no modo

descentralizado tem o potencial para atender a necessidade de energia de áreas rurais remotas (CHAUHAN; SAINI, 2015).

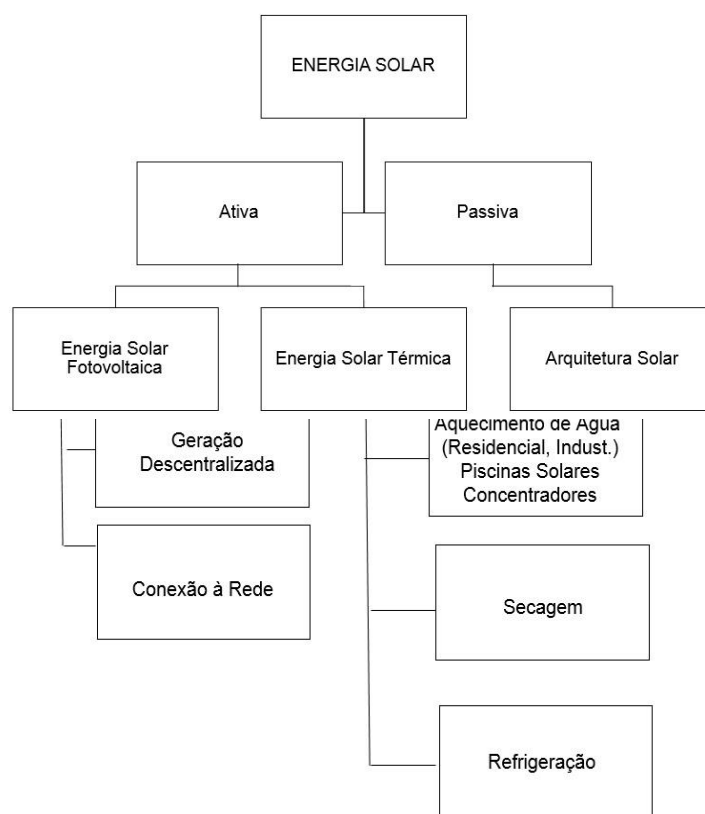


Figura 1: Fluxograma das Aplicações Práticas de Energia Solar.
Fonte: Adaptado de De Souza, Torres e Senna (2013).

Carneiro et al. (2015) utilizaram a arquitetura solar em seu trabalho a fim de estudar o condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. O emprego de cobertura verde diminuiu a temperatura da superfície do telhado por adicionar camadas de isolamento que desaceleram o fluxo de calor por meio da cobertura. Estudos como este auxiliam a desenvolver ambientes com melhor conforto térmico e lumínico.

Na tecnologia solar térmica, radiações solares são coletadas em uma superfície para converter energia solar em energia térmica que pode ser utilizada para aquecimento de água, aquecimento, cozinhar, entre outros. Possui uma ampla gama de aplicações, que podem ser divididas em processos realizados a baixa,

média e alta temperatura. Os processos são relacionados com o uso final do fluido térmico, comumente a água ou o ar e à tecnologia empregada (IPCC, 2011).

Nos estudos de Hoffman e Ngo (2018) acerca do aquecimento de água por energia solar térmica acessível para rurais na República Dominicana, encontraram um desempenho consistente e confiável a longo prazo dos aquecedores de água. Estes que foram confeccionados com materiais disponíveis localmente, com construção de manutenção e baixo custo.

Já a energia solar fotovoltaica, consiste na transformação de energia solar em energia elétrica por meio do uso de painéis fotovoltaicos, formados por células solares. Para Fraindenraich et al. (2003), a aplicação prática da tecnologia fotovoltaica são: produtos de consumo; sistemas interligados à rede elétrica; e também sistemas autônomos como o de telecomunicações, bombeamento de água e sinalização.

2.1.1. Potência Solar

A potência solar pode ser mensurada pela irradiação e é definida como a quantidade de potência radiante incidente sobre uma superfície. A unidade de medida para a potência é dada em watt (W), e a irradiação é medida por potência por unidade de área (W/m^2). Os valores de irradiação variam de acordo com o tempo. Assim, quanto maior a potência da radiação solar, mais energia ela transporta em um intervalo de tempo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Analisando a radiação solar que incide na superfície terrestre, ou sobre uma superfície receptora para a geração de energia, pode se concluir que ela é constituída pelos componentes: direta, difusa e por uma reflexiva. A componente direta é a radiação que não sofre com nenhum obstáculo atmosférico e nem é refletida por nenhum corpo, chegando a sua totalidade em uma determinada superfície. A difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. A terceira componente é resultado da reflexão da radiação que ocorre no ambiente (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, entre outros), e é denominada Albedo (CRESESB, 2014). A Figura 2 apresenta os componentes da radiação.

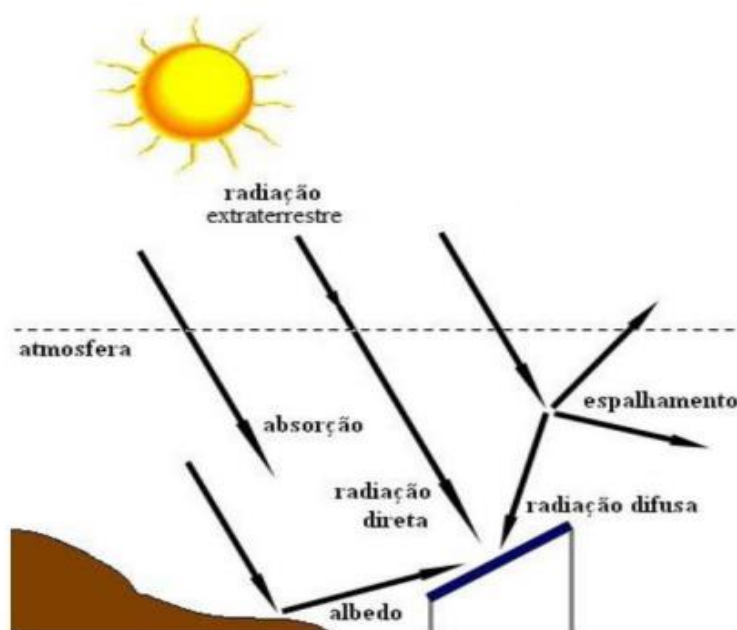


Figura 2: Componentes da radiação solar.
Fonte: CRESESB (2014).

Para Lima (2003), a radiação solar sofre na sua trajetória as seguintes influências: da latitude, pois quanto maior latitude a área de superfície terrestre atingida pela mesma radiação, também aumenta, resultando uma menor concentração de radiação; as estações do ano por conta do movimento de translação da Terra em torno do sol que descreve uma órbita elíptica plana; a hora do dia, pois em cada hora do dia os raios solares atingem uma dada superfície sob diferentes ângulos; condições do céu, em razão da quantidade de nuvens que recobrem o céu interferem na radiação que atinge a superfície terrestre. Por fim, as condições atmosféricas, pois dias enfumaçados ou poluídos alteram a radiação disponível.

Segundo o Manual de Engenharia Fotovoltaico (CRESESB, 2014), para avaliar o potencial da conversão fotovoltaica em um determinado lugar, seria muito útil dispor de dados confiáveis da irradiação solar disponível em intervalos horários. Existem poucas estações meteorológicas no Brasil que registram sistematicamente o valor da irradiação solar incidente em intervalos horários. A informação obtida na base temporal horária é importante, porque os módulos fotovoltaicos são geralmente instalados em planos inclinados e, como a posição solar varia a cada instante, a

conversão de um dado de irradiância no plano horizontal para um plano inclinado também é diferente a cada instante.

Como a radiação solar depende da latitude, as médias mensais de radiação são diferentes em cada local da Terra. Quanto ao clima, observa-se que em climas desérticos como do deserto de Atacama, situado no Chile, a irradiância é alta. A Figura 3 explana isso, pois é possível notar que, em regiões próximas a linha do equador, podem exceder $6,3 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$, enquanto no sul da Europa não excede os $5,0 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ (SolarGIS, 2013).

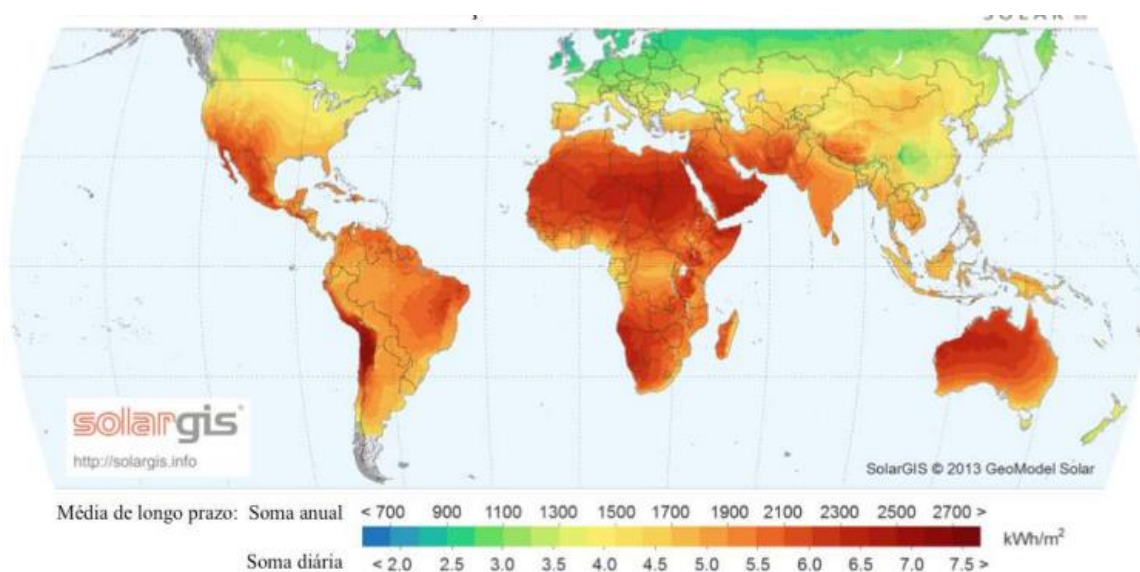


Figura 3: Radiação horizontal global anual e diária em diferentes zonas do planeta Terra.

Fonte: Solargis, 2013.

O Brasil possui, assim como países da África e alguns da Ásia, grande potencial solar chegando a níveis que variam de $7,5 \text{ kWh/m}^2$ a $4,8 \text{ kWh/m}^2$ diária. A Alemanha, mesmo com índices inferiores de irradiação de $2,5 \text{ kWh/m}^2$ a $3,5 \text{ kWh/m}^2$ diária, é o país líder que usa o sistema fotovoltaico para geração de energia. Para Kannan e Vakeesan (2016), a Índia é um dos países asiáticos que é tendência de desenvolvimento para a energia solar fotovoltaico para o futuro (Figura 3).

Dos dez países com maior capacidade instalada solar mundial até 2016, cinco eram europeus: Alemanha, Itália, Reino Unido, França e Espanha. Representam aproximadamente 28% da capacidade instalada global em sistemas fotovoltaicos (REN21, 2017). Para Castillo, Silva e Lavallo (2016), o principal fator para este potencial aproveitado, quando comparado com regiões que são

referências nesta tecnologia, principalmente na Europa, são o apoio de políticas públicas.

Para Pereira et al. (2017), o Brasil possui em média uma incidência de radiação solar alta durante o ano todo, em razão do seu clima intertropical. Sendo assim, seria favorável o uso da energia solar como uma fonte térmica ou elétrica em praticamente todo seu território. Vale frisar que existem grandes variações na radiação solar nos períodos de outono e inverno na região sul e sudeste considerando a entrada de sistemas frontais que provocam nebulosidades durante alguns dias consecutivos.

O potencial solar brasileiro está diretamente ligado com sua localização geográfica, fator determinante na disponibilidade energética durante todo o ano (PEREIRA et al., 2006).

A região Nordeste, de acordo com Pereira et al. (2016), possui 5,49 kWh/m².dia de irradiação. Conforme Fadigas (2015), a região do semiárido possui os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 Wh/m² de potência contínua, o que equivale entre 4,8 kWh/m².dia a 6 kWh/m².dia de radiação incidente. Isto coloca o local entre as regiões do mundo com maior potencial de energia solar.

Caruzzo e Nogueira (2015) afirmam que as regiões Centro-oeste e Sudeste ficam em segundo na disponibilidade de energia solar. Por outro lado, as características climáticas da região Norte possuem valores médios de disponibilidade próximos da região Sul. Para Pereira et al. (2017), a região Sul possui 4,53 kWh/m².dia de irradiação global horizontal por dia, 4,77 kWh/m².dia de irradiação no plano inclinado por dia e 4,20 kWh/m².dia de irradiação direta normal.

Os autores Tiepolo et al. (2018) apontaram para o Estado do Paraná uma radiação solar média de: 4,66 kWh/m².dia global horizontal; 4,40 kWh/m².dia direta normal e 4,89 kWh/m².ano plano inclinado na latitude. Ao comparar a média obtida no Estado do Paraná no plano inclinado na latitude em relação aos principais países europeus, pôde-se verificar que a média obtida no estado é 42,88% superior à Alemanha; 2,13% superior à Itália; 54,98% superior ao Reino Unido; 18,15% superior à França e 8,22% inferior à Espanha. O que justificaria o estudo de potência instalada no Estado. A Figura 4 apresenta os valores de radiação solar total anual para cada Região do Estado do Paraná obtidas por mesorregião.

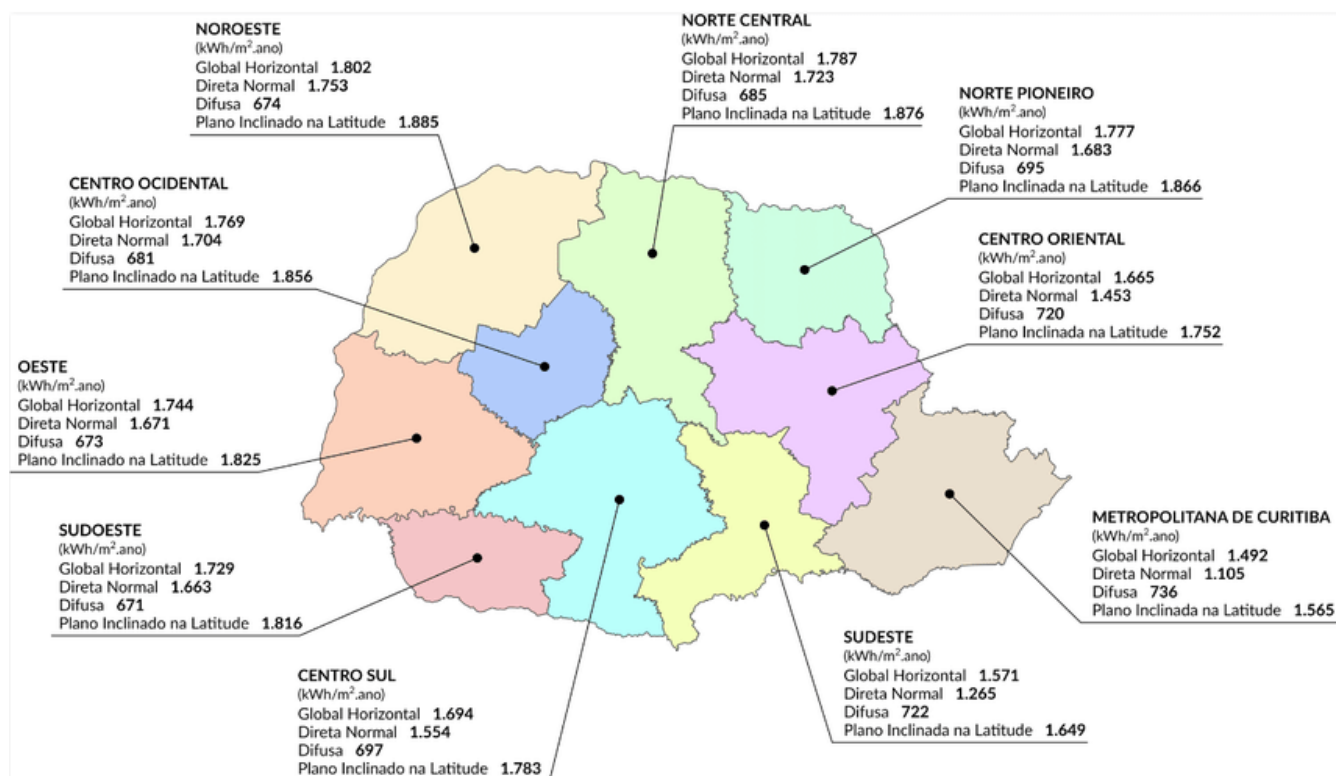


Figura 4: Média de radiação solar Global Horizontal, Direta Normal, Difusa e no Plano Inclinado na Latitude encontradas no Estado do Paraná.
Fonte: Tiepolo et al. (2018)

De acordo com SUNDATA (2016), a cidade de Cascavel apresenta como média de 4,72 kWh/m².dia para a irradiação no plano horizontal e de 4,94 kWh/m².dia para o ângulo igual a latitude (Figura 5). Nota-se que a radiação solar diária média mensal é menor na estação de inverno e maior para a estação do verão. O mês de junho registrou 2,97 kWh/m².dia para o plano horizontal e o mês de dezembro apresentou 6,34 kWh/m².dia para o mesmo parâmetro. Nesse sentido, a região poderia utilizar desta disponibilidade potencial solar de forma eficiente.

Michelsm et al. (2015) analisaram o rendimento de módulos fotovoltaicos policristalinos no Oeste do Paraná e encontraram dados condizentes com a Figura 5, pois na estação do inverno a colocação do módulo fotovoltaico em um plano inclinado levou a um aumento de eficiência, visto que representou um período crítico de irradiação.

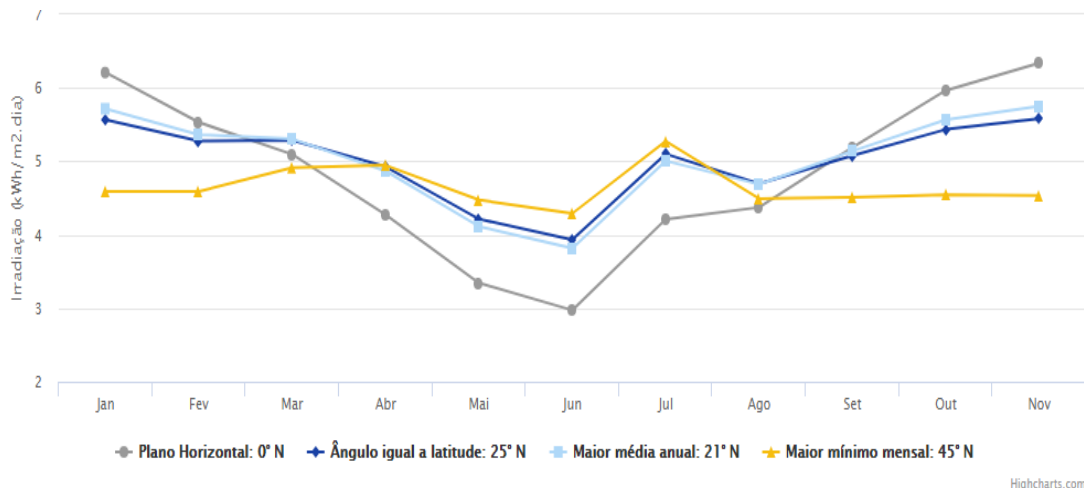


Figura 5: Radiação solar da cidade de Cascavel.
Fonte: SUNDATA, 2016.

Com relação ao efeito da cobertura do céu na eficiência de sistemas fotovoltaicos, para Gnoatto et al. (2008), a eficiência do painel fotovoltaico isolado não apresentou grandes variações durante o ano em qualquer tipo de cobertura de céu.

A radiação solar pode ser usada para a conversão direta de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica. Em conformidade com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010), documentos internacionais reportam para o ano de 2050 quando um percentual de 50% da geração de energia no mundo virá de fontes renováveis. Dessa demanda, 25% serão supridos pela energia solar fotovoltaica. No fim deste século, essa dependência será de até 90% dos quais 70% serão de origem fotovoltaica.

2.2.2. Energia Solar Fotovoltaica

A energia fotovoltaica é a energia elétrica conhecida por ser produzida por meio da luz solar, bem como por ser gerada mesmo em dias nublados ou chuvosos. Dessa maneira, a quantidade de radiação solar é diretamente proporcional à eletricidade produzida. O físico Edmond Becquerel, no ano de 1839, foi o primeiro estudioso a relatar sobre o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A partir disso, muitas contribuições foram realizadas para otimizar o sistema, por

meio de um protótipo mais eficiente da Bell Labs, em 1954, com uma célula que possuía eficiência de 6% (SHANAWANI; MASOTTI; COSTANZO, 2017).

Razykov et al. (2011) apontam a energia solar fotovoltaica como uma das mais crescentes indústrias em todo o mundo quando se trata de uso de materiais, consumo de energia para fabricar esses materiais, design do dispositivo, produção de tecnologias, bem como novos conceitos para melhorar a eficiência das células. Devabhaktuni et al. (2013) apontam que esse futuro promissor e deve ao impulso dos subsídios, incentivos fiscais e outros incentivos financeiros.

Conforme FRAUNHOFER INSTITUTE (2018), o mercado mundial fotovoltaico está crescendo rapidamente. Durante o período entre 2000 e 2015, a taxa de crescimento das instalações fotovoltaicas foi de 41%. Observa-se na Figura 6 que países como a China e Taiwan, desde 2006, possuem um crescimento nas taxas. No ano de 2015, chegaram a obter 71% do total de vendas. Esses mesmos países lideram atualmente o mercado mundial fotovoltaico com crescimento gradativo.

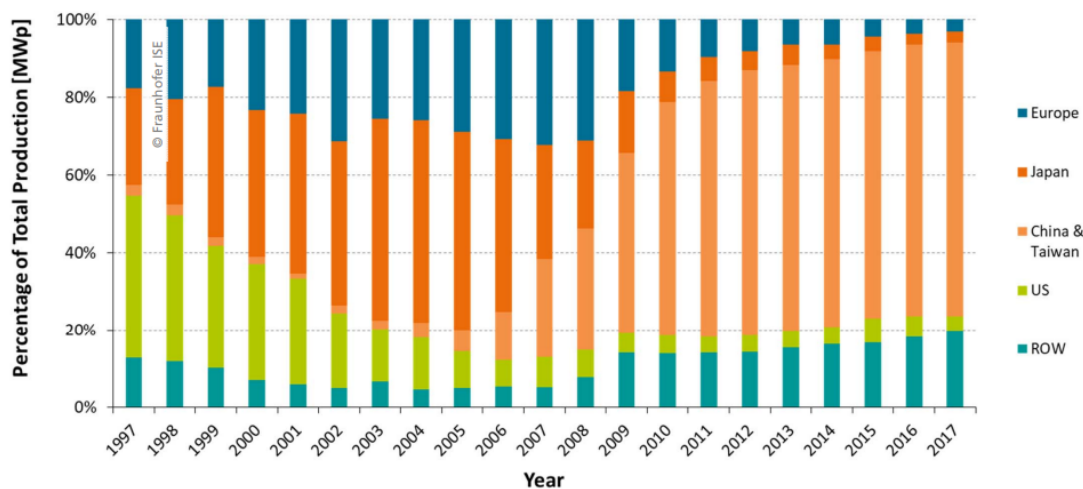


Figura 6: Percentual da produção total (MWp) ao longo dos anos.
Fonte: FRAUNHOFER INSTITUTE, 2018.

Para Sampaio e González (2017), as plausíveis explicações estariam em políticas de incentivo implantadas nos países que lideram o mercado mundial. A Dinamarca, Espanha e os países asiáticos China e Taiwan usaram a tarifa feed-in (FIT), que é um mecanismo político que busca incentivar os consumidores a investir na microgeração renovável. Já os Estados Unidos, o Reino Unido, o Japão e a Suécia, utilizaram o RPS (*Renewable Portfolio Standard*), pois regulariza que parte

da energia consumida seja de fontes renováveis. A Coreia do Sul também utiliza do RPS a fim de minimizar os encargos financeiros para o governo.

Jäger-Waldau (2017) salienta que, em 2016, a energia solar fotovoltaica, cerca 75 GW, foi mais do que toda a capacidade mundial instalada até ao final de 2011. A Tabela 1 demonstra que a China já superou a Alemanha em termos de capacidade instalada acumulada em 2015, seguida pelo Japão, em 2016, pelos EUA no início de 2017.

Tabela 1: Top 10 países para instalações e total capacidade instalada em 2017

Ranking Mundial	Capacidade Instalada		Capacidade Instalada (Acumulativa)	
1	China	53 GW	China	131 GW
2	USA	10,6 GW	USA	51 GW
3	Índia	9,1 GW	Japão	49 GW
4	Japão	7 GW	Alemanha	42 GW
5	Turquia	2,6 GW	Itália	19,7 GW
6	Alemanha	1,8 GW	Índia	18,3 GW
7	Austrália	1,25 GW	UK	12,7 GW
8	Coreia	1,2 GW	França	8 GW
9	UK	0,9 GW	Austrália	7,2 GW
10	Brasil	0,9 GW	Espanha	5,6 GW

Fonte: Adaptado de IEA (2017).

A União Europeia alcançou, no final de 2016, uma capacidade instalada acumulada de 102 GW, o que representa cerca de um terço para a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica total de 312 GW (IEA PVPS, 2017).

ANEEL (2017) evidencia que a energia solar fotovoltaica no Brasil possui grande potencial para crescimento. A capacidade instalada é ainda de apenas 96 MWp nos dados até abril de 2017. Ademais, o Brasil alcançou a marca histórica de 1 gigawatt (GW) de potência instalada em usinas de fonte solar fotovoltaica conectadas à matriz elétrica nacional. Dessa maneira, o país está entre os 30 do mundo, de um total de 195, que possuem mais de 1 GW de fonte solar.

Para Ferreira et al. (2018), o Brasil necessita do planejamento do desenvolvimento de uma indústria fotovoltaica local competitiva e sustentável. Além da implantação de linhas específicas de crédito para a geração solar, pois a distribuição de geração de grade ainda carece de linhas de financiamento com taxas atrativas.

2.2.3. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são componentes do sistema fotovoltaico responsável por captar a energia (irradiação) solar transformando-a em eletricidade. O silício grau metalúrgico é considerado matéria-prima ainda bruta para a produção de painéis fotovoltaicos. Sua utilização ocorre por ser o material mais abundante na Terra, bem como pela larga experiência alcançada pela indústria de microeletrônica, por seu baixo índice de contaminação e por sua alta durabilidade (TESKE, et al., 2016).

Para Machado e Miranda (2015), o silício tem a propriedade de ter comportamento isolante em temperaturas baixas. Assim, com o aumento da temperatura a resistência do material tende a diminuir, tornando o material condutor. Apresenta na sua camada de valência quatro elétrons que se ligam aos seus átomos vizinhos, formando a rede cristalina.

Segundo GREENPO (2004), pelo fato do silício possuir falta de elétrons livres, usualmente, acrescenta-se, por processo de dopagem, certa porcentagem de fósforo (cinco elétrons de valência) e boro (três elétrons de valência).

De acordo com Goetzberger, Hebling e Schock (2003), esse incremento de elementos tem por objetivo criar uma camada de elétrons positivos (tipo P) com o fósforo, e com os elementos de boro, criar camadas de elétrons negativos (tipo N). Com a junção destes elementos, os elétrons livres de silício tipo N tendem a preencher os vazios da estrutura de silício formando um campo elétrico. Na Figura 7 pode ser visto a representação gráfica do efeito fotovoltaico.

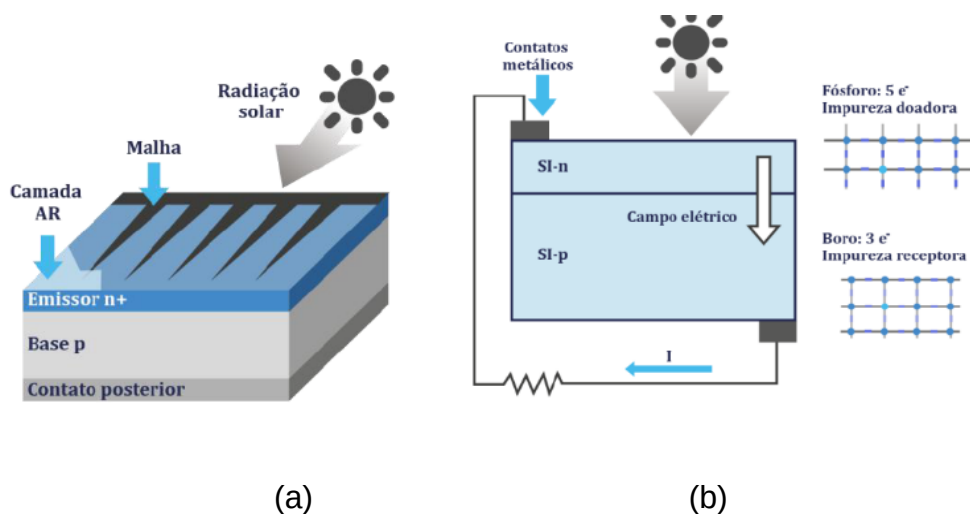


Figura 7: (a) Estrutura típica da célula solar; (b) princípio de funcionamento.
Fonte: ONUDI, (2016).

Na Figura 7 (a), quando a junção P-N é excitada pela luz solar (radiação solar), os fótons da luz se chocam com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Com isso, devido ao campo elétrico, os elétrons fluem da camada P para a camada N (b) por meio de um condutor externo, gerando um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Esse fluxo de corrente dá origem à diferença de potencial entre as duas faces da junção P – N de mesmo valor da região de depleção. Esse é o efeito fotovoltaico. Enquanto a luz incidir na célula, será mantido este fluxo (ONUDI, 2016).

Para Leccisi, Raugei e Fthenakis (2016), nos materiais chamados de semicondutores ocorre o efeito fotovoltaico que possui na sua composição a presença de elétrons em duas bandas de energia. As células fotovoltaicas são produzidas a partir de três tecnologias, classificadas em três gerações conforme seu material e suas características. A primeira geração é composta por silício cristalino (c-Si), que se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), representando 85% do mercado, por ser uma tecnologia de melhor eficiência, consolidação e confiança. A segunda geração, também chamada de filmes finos, é dividida em três cadeias: silício amorfo (a-Si), microamorfo (a-Si/ μ c-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), telureto de cádmio (CdTe) e o seleneto de cobre índio (CIS). Para Battaglia, Cuevas e De Wolf (2016) existem ainda as células orgânicas ou poliméricas, mas ainda estão em estudos experimentais ou sendo feitos em pequena escala comercial.

Os módulos fotovoltaicos mais usuais são de silício monocristalino, Figura 7 (a), obtidos pelo método Czochralski (Cz-Si), formando uma peça cilíndrica uniforme que, posteriormente, é laminada em espessuras de 100 μ m. Oferecem uma eficiência de conversão de irradiação solar em potência elétrica típica entre 17 a 21,5% em módulos comerciais (TOLMASQUIM, 2016).

Para Tyagi et al. (2013), estes tipos de células (m-Si) possuem maior eficiência de conversão, mas apresentam elevados custos de fabricação, maior exigência de energia durante seu ciclo de vida, tempo de retorno mais longo, além de exigir o emprego de materiais em estado mais puro e com uma estruturação de cristal perfeita.

As indústrias fotovoltaicas buscaram novas soluções tecnológicas de cristalização com o objetivo de reduzir custos e aumentar a taxa de produção.

Assim, surgiram as células feitas de multicristais chamadas de silício policristalino (p-Si) representadas na Figura 8 (b) (CHARR; LAMONT; ZEIN, 2011; AVRUTIN; IZYUMSKAYA; MORKOÇ, 2011).

Para Peng, Lu e Yang (2013), as principais vantagens em comparação as células monocristalinas são: melhor aspecto estético; menor consumo de energia durante seu ciclo de vida; tempo de retorno de energia menor; menor emissão de gases estufas; menor consumo de energia em sua fabricação; e a estrutura de cristal não precisa ser perfeita.



Figura 8: Células solares de primeira geração: (a) silício monocristalino (b) policristalino.
Fonte: VIRIDIAN, (2011).

As células solares de filme fino, principalmente a silício amorfo (a-Si) (Figura 9 (a)), vieram também com o intuito de redução de custos. Estes tipos de células exigem muito menos material do semiconductor a ser fabricado, para absorver a mesma quantidade de luz solar, até menos material do que as células cristalinas. As principais características desta tecnologia são: alta flexibilidade, fácil instalação e uma vida útil de 25 anos (MUNDO-HERNÁNDEZ et al., 2014).

Na Figura 9 estão representadas as células solares do tipo filme fino: silício amorfo, disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), telureto de cádmio (CdTe), respectivamente.

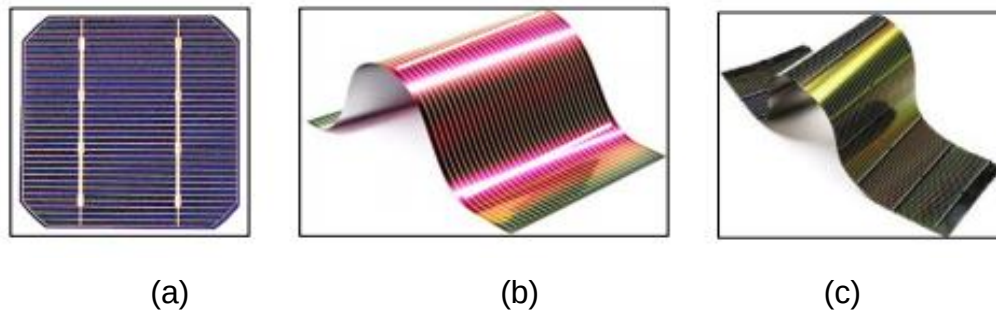


Figura 9: Células solares de segunda geração: (a) silício amorfo; (b) CIGS; (c) CdTe.
Fonte: VIRIDIAN, (2011)

A Figura 10 representa a eficiência em laboratório para as tecnologias de células de filme fino e também silício cristalino.

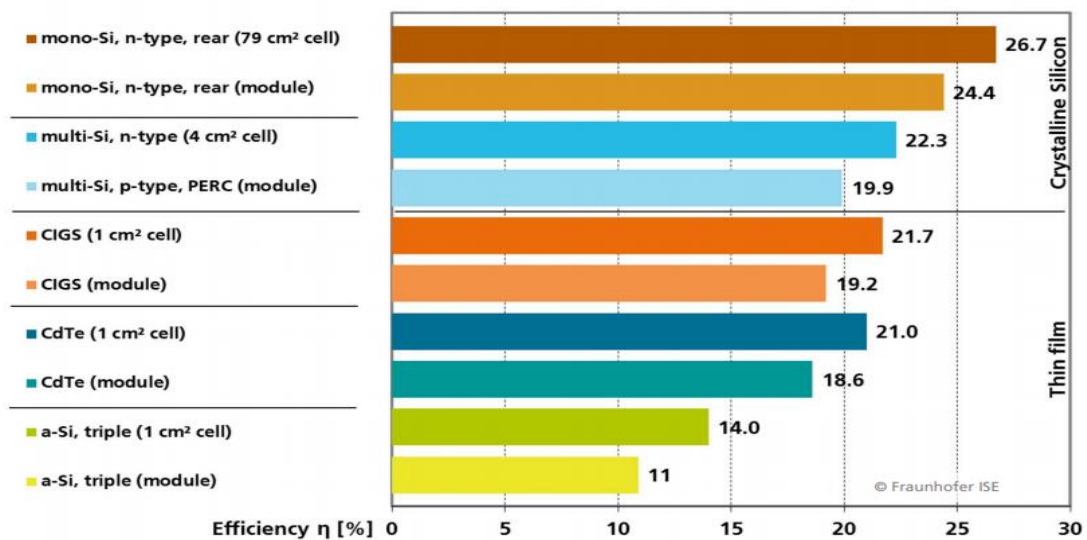


Figura 10: Eficiência em laboratório.
Fonte: FRAUNHOFER INSTITUTE (2018).

O auge de eficiência em células de laboratório é de 26,7% para as de silício monocristalino e 24,4% para a tecnologia de silício policristalino. Nota-se que a maior eficiência para filme fino é de 21,7% para o CIGS (células de índio e gálio-disseleneto) e 21,0% para as células CdTe (células de telureto de cádmio). As células solares do tipo a-Si (silício amorfo) representaram 14,0% de eficiência (FRAUNHOFER INSTITUTE, 2018).

2.2.3.1. Células de Silício Amorfas

A célula de silício amorfo, pertencente à categoria de filme fino, é uma das primeiras e mais conhecidas tecnologias não cristalinas. A sua estrutura possui arranjos desordenados, pois apresenta muitas ligações pendentes e que formam buracos, como representado na Figura 11. Os vazios podem ser recombinados com os elétrons livres presentes, o que prejudica o fluxo de corrente por meio da célula. Assim, é necessário a hidrogenação do silício amorfo para que os hidrogênios ocupem os espaços livres, diminuindo a densidade de ligações pendentes e liberando que os elétrons fluam na célula (HASHIMOTO, 2003).

Para Ibn-Mohammed et al. (2017), o desarranjo estrutural molecular e a mobilidade do hidrogênio ocasionam instabilidade da célula a-Si sob irradiação solar. Esse fenômeno de degradação induzida pela luz é chamado de efeito Staebler–Wronski. Para alcançar uma maior estabilidade, são utilizadas camadas mais finas aumentando a força do campo elétrico do material. Entretanto, isso reduz a absorção de luz e, conseqüentemente, a eficiência da célula fotovoltaica. Como solução, a indústria desenvolveu dispositivos de tripla camada que contenham células p-i-n empilhadas entre si oferecendo uma eficiência de 13,4% para uma amostra de laboratório.

Green et al. (2015) apotam o silício amorfo (a-Si: H) como um semiconductor de absorção óptica, muito mais forte que a de sílcio cristalina. Possui um intervalo de banda bem acima do ideal (1,7 a 1,8 eV), o que reduz o intervalo de comprimentos de onda que podem ser absorvidos.

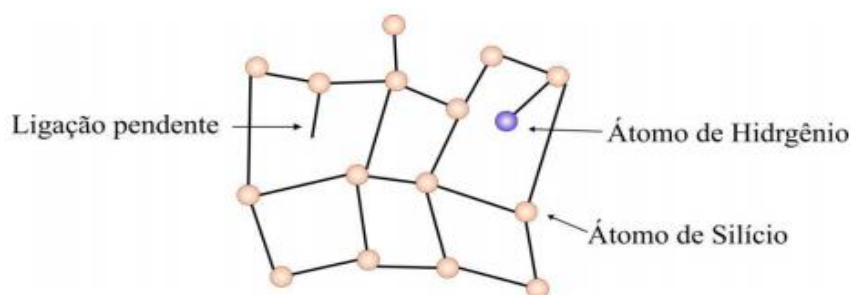


Figura 11: Representação do silício amorfo.
Fonte: Machado e Miranda (2015).

Sudhakar e Baredar (2016) evidenciam que esse tipo de célula fotovoltaica é formado por várias camadas de materiais que são fixados a um substrato, como

demonstra a Figura 12. Elas são feitas por vapor depositando uma fina camada de silício, cerca de 1 μm de espessura, em um material de substrato como vidro ou metal. As células a-Si podem ser depositadas em temperaturas muito mais baixas quanto 300 °C, o que permite a deposição em materiais como o plástico.

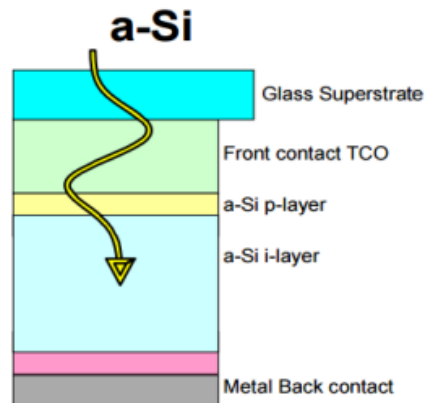


Figura 12: Estrutura da célula de silício amorfo.
Fonte: Shukla, Sudhakar e Baredar (2016).

São consideradas menos eficientes do que as células de silício policristalino. Em contrapartida, o custo do material e da energia utilizada na produção de filmes amorfos são pequenos quando comparados com os materiais cristalinos com a mesma área de utilidade. Isso se deve ao processamento envolvido na produção e wafers monocristalinos, que é mais lento e com altas temperaturas, diferentemente no caso dos filmes amorfos (KILNER et al., 2012).

O a-Si é uma tecnologia que não apresenta redução na potência com o aumento da temperatura de operação. Esta característica é uma grande vantagem sobre todas as outras tecnologias fotovoltaicas, em que o aumento da temperatura ambiente provoca perdas na performance dos módulos fotovoltaicos benéficos para países de clima quente como o Brasil (RÜTHER et al., 2004).

Green et al. (2012) apontam outra característica competitiva, visto que as células a-Si são disponibilizadas flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes e com curvas, o que possibilita a sua implementação em muitos produtos. Podem ser produzidas com uma variedade de formas e tamanhos. Isso o torna uma tecnologia ideal para usar em uma variedade de aplicações, como calculadoras eletrônicas, relógios solares, jardim luzes e para acessórios do carro.

Além disso, por apresentar um caráter mais estético, são muito usadas arquitetonicamente, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.

Para Boyd et al. (2011), alguns painéis solares amorfos também vêm com tecnologia resistente à sombra ou múltiplos circuitos dentro das células, de forma que se uma fileira inteira de células estiver sujeita ao sombreamento completo, o circuito não será completamente quebrado e alguma saída ainda poderá ser obtida. Isso é especialmente útil ao instalar painéis solares em um barco e ideal para áreas rurais ou afastadas.

2.2.4. Módulos solares fotovoltaicos

Para Sharma e Chandel (2013), as células solares podem ser conectadas eletricamente em série e / ou paralelo para fornecer as saídas desejadas de tensão e corrente. Dessa maneira, as células solares são classificadas em diferentes grupos após a fabricação como por sua eficiência e potência de pico. Células solares com valores de eficiência e pico de potência aproximados são unidas eletricamente para formar um módulo fotovoltaico. Isso é feito para minimizar as perdas de um módulo. A junção de vários módulos forma um painel, consequentemente (Figura 13).

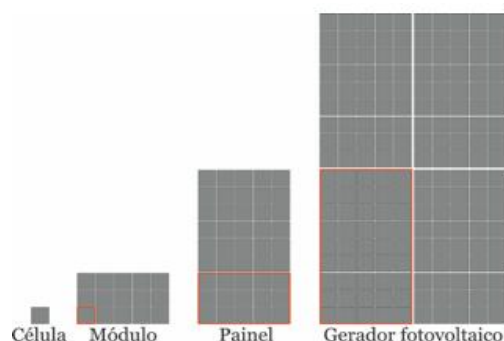


Figura 13: Processo hierarquizado de agrupamento: célula, módulo e painel fotovoltaico.

Fonte: Uminho (2015).

As células solares devem ser protegidas das intempéries do tempo (ciclagem térmica, poeira, chuva, entre outros) para garantir a sua vida útil longa. Assim, para Weiss, Amara e Ménéz (2016) os módulos fotovoltaicos podem ser definidos como multicamadas de materiais semitransparentes (Figura 14). A camada frontal é uma chapa de vidro temperado termicamente de baixo teor de ferro. O lado traseiro do módulo fotovoltaico é coberto com uma folha traseira filme que consiste em um PET (polietileno tereftalato) que tem como objetivo garantir o isolamento elétrico.

Ye et al. (2016) apotam que, atualmente, são vários os exemplares de módulos fotovoltaico produzidos, podendo ser rígidos ou flexíveis, conforme o tipo de célula empregada. O agrupamento de módulos fotovoltaicos do mesmo tipo pode ser efetuado por meio de ligações em série, paralelo ou mista, obtendo-se, assim, diferentes valores de tensão ou corrente (CRESESB, 2014).

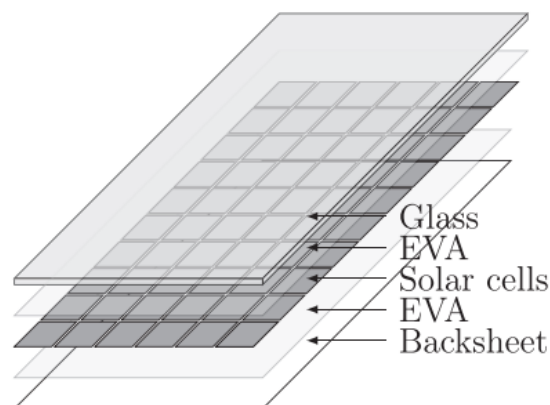


Figura 14: Estrutura Padrão do módulo fotovoltaico.
Fonte: Weiss, Amara e Ménéz (2016).

Os módulos fotovoltaicos ligados em série constituem aquilo que normalmente se designa por fileiras ou no inglês, *string*. É importante realçar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema (SIBAI, 2014). A Figura 15 representa esquematicamente a associação em série de n módulos fotovoltaicos.

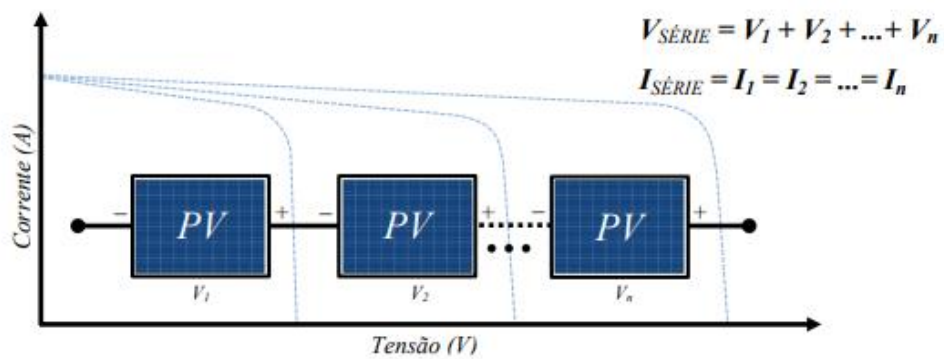


Figura 15: Representação esquemática da associação em série de módulos fotovoltaicos.

Fonte: Fortes (2016)

A Figura 16 representa a ligação em paralelo entre módulos individuais aplicada tipicamente nos sistemas *off* (autônomos). Tal tipo de combinação é realizada quando se pretende obter correntes mais elevadas e manter o nível de tensão estipulada do módulo.

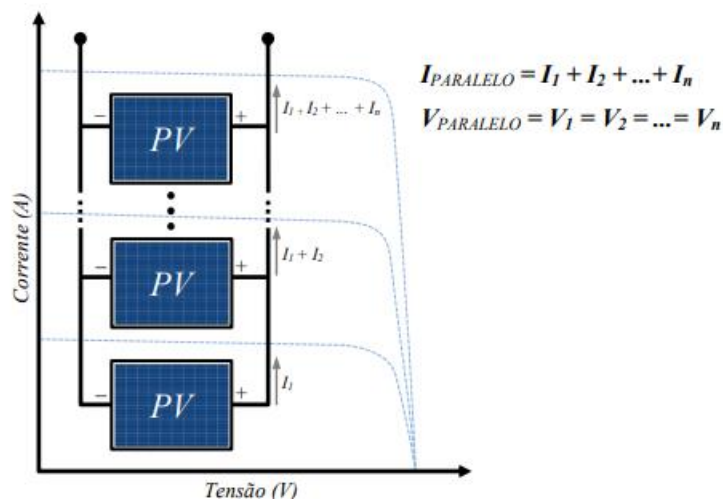


Figura 16: Representação esquemática da associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.

Fonte: Fortes (2016).

Para Vergur (2015), as características como os parâmetros elétricos, térmicos ou mecânicos dos módulos fotovoltaicos são medidas nas condições de referência, STC pelos fabricantes e disponibilizadas na forma de fichas técnicas específicas. Entretanto, mesmo que um módulo fotovoltaico opere em condições de temperatura do ar igual a 25°C, a temperatura do módulo poderá ser superior. Dessa maneira, é especificada a temperatura nominal de funcionamento (do Inglês, *nominal operating cell temperature*, NOCT) do módulo fotovoltaico. Essa

temperatura é a atingida pelas células de um módulo quando sujeitas às seguintes condições: intensidade da radiação solar incidente na superfície igual 800 W/m^2 , temperatura do ar de 20°C e velocidade do vento = 1m/s .

2.2.5 Sistemas solares fotovoltaicos

Além dos geradores fotovoltaicos, o sistema solar fotovoltaico é composto por outros itens importante para o funcionamento total que são (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017):

- **Bateria:** dispositivo conveniente e eficiente para o armazenamento da energia elétrica gerada a partir dos módulos fotovoltaicos, pois o sistema não gera energia durante a noite e, em tal período, existe a necessidade de consumir energia que tenha sido gerada durante o período de insolação;

- **Controlador de Carga:** é um componente eletrônico incluído na maioria dos Sistemas Fotovoltaicos com os objetivos básicos de facilitar a máxima transferência de energia do arranjo fotovoltaico para a bateria ou banco de baterias, protegê-las contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil;

- **Inversor:** é o dispositivo necessário para alimentação de cargas em corrente alternada. A geração do sistema fotovoltaico, assim como a energia fornecida pelas baterias, é em corrente contínua, mas alguns tipos de carga necessitam da corrente alternada para operarem. Nestes casos, o inversor converte a energia contínua em alternada;

- **Equipamentos Complementares:** são todos os sistemas de conexão elétrica (fiação) e outros dispositivos utilizados no aprimoramento do funcionamento geral como, por exemplo, os mecanismos de tracking (rastreamento solar).

De acordo com Lana et al. (2016), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas isolados ou autônomos (off-grid), conectados à rede (on-grid) ou híbridos.

Em países em desenvolvimento como a Índia (SINDHU; NEHRA; LUTHRA, 2016), Colômbia (MAMAGHANI, 2016), Brasil (MENDES; JUNIOR; HOSKEN, 2016) entre outros a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados para suprir a demanda energética em vilas afastadas ou propriedades rurais já foram

implementados ou analisados por programas governamentais (URMEE; ANISUZZAMAN, 2016).

Para Rawat, Kaushik e Lamba (2016), sistemas ligados à rede (on grid) são aqueles que trabalham concomitantemente à rede elétrica da distribuidora de energia. De forma sucinta, o painel fotovoltaico gera energia elétrica em corrente contínua e, após convertê-la para corrente alternada, é injetada na rede de energia elétrica. A conversão se dá pela utilização do inversor de frequência, que realiza a interface entre o painel e a rede elétrica.

Esses sistemas utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, porém não utilizam armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual esta conectada. Todo o arranjo é conectado em inversores e, logo em seguida, guiados diretamente na rede, como na Figura 17. Eles devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada (CRESESB, 2014).

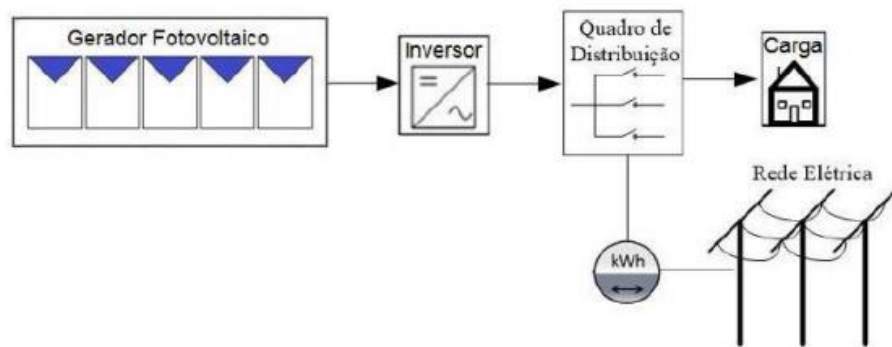


Figura 17: Sistema fotovoltaico conectado à rede com medidor bidirecional.
Fonte: CRESESB (2014).

Sistemas autônomos ou isolado (*off-Grid*) não dependem da rede elétrica convencional para funcionar, sendo possível sua utilização em localidades carentes de rede de distribuição elétrica (GHAFOOR; MUNIR, 2015). A Figura 18 representa esse tipo de sistema.

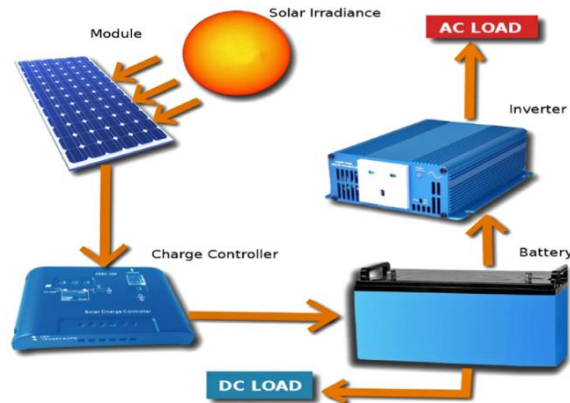


Figura 18: Layout do sistema fotovoltaico off-grid.
Fonte: Ghafoor e Munir (2015).

Segundo CRESESB (2014), o aparelho controlador de carga tem a função de evitar danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC). Já para a alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA), é necessário o inversor. Tal dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida.

Villalva e Gazoli (2012) salientam que existem dois tipos de sistemas autônomos: com armazenamento e sem armazenamento. O primeiro pode ser utilizado em carregamento de baterias de veículos elétricos, em iluminação pública e, até mesmo, em pequenos aparelhos portáteis, enquanto o segundo, além de ser frequentemente utilizado em bombeamento de água, apresenta maior viabilidade econômica, já que não utiliza instrumentos para o armazenamento de energia (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011).

Oliveira (2007) afirma que os sistemas fotovoltaicos são usados em sistemas isolados conforme a necessidade da região. Um dos motivos é a distância das propriedades rurais com as redes de distribuição de eletricidade. Em cidades que se localizam longe das linhas de transmissão, é menos oneroso para a concessionária local usar sistemas fotovoltaicos, principalmente para sistemas de irrigação. Sistemas de irrigação não necessitam de armazenamento por meio de bateria, pois toda água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios.

2.3. Bombeamento de Água com Painel Fotovoltaico

Para Li et al. (2017), a falta de eletricidade e os elevados custos com o diesel influenciam no bombeamento da água comunitária e irrigação. Dessa maneira, a energia solar para bombear a água é uma opção viável quando comparada com o bombeamento baseado em eletricidade e diesel.

Sanyashiv (2018) afirmam que o emprego de diesel ou bombeamento de água à base de propano exigem o uso de combustíveis onerosos, além de gerar ruídos e poluição do ar. O custo inicial de operação e manutenção é, em média, de 2 a 4 vezes maior para a uma bomba diesel que para uma bomba solar fotovoltaica. A taxa de água bombeada depende da radiação solar incidente e do tamanho do painel fotovoltaico.

Vick e Neal (2012) argumentaram que o bombeamento de água com painel fotovoltaico pode ser uma solução para pequenas propriedades rurais brasileiras, especialmente, em regiões áridas e semiáridas. Para isso, é importante o estudo da tensão, corrente e a potência gerada pelo painel. Além disso, as características do conjunto motobomba e a irradiação média da região em todas as estações do ano.

Chandel, Naik e Chandel (2015) concluíram que o desempenho da bomba de água fotovoltaica depende também da taxa de fluxo de água que é influenciada pelas condições meteorológicas do local, principalmente da irradiância solar e variações da temperatura do ar. Outro fator é o desempenho da bomba solar está ligado na necessidade de água, tamanho do tanque de armazenamento de água, água a ser bombeada (m^3), energia virtual do arranjo fotovoltaico (kWh), energia na bomba (kWh), energia fotovoltaica não utilizada (kWh), eficiência da bomba (%), eficiência do sistema (%) e variação diurna na bomba pressão devido às mudanças na irradiância e compensação de pressão.

Os mesmos autores afirmam ainda que o desempenho do sistema de bombeamento de água solar depende da disponibilidade de radiação solar no local; cabeça dinâmica total, soma da cabeça de sucção: altura de ponto de sucção até a bomba), cabeça de descarga (altura da bomba entrada de armazenamento) e perdas por atrito; caudal de água; quantidade total de necessidade de água; e energia hidráulica.

Para Morales (2011), o sistema é constituído basicamente pelo gerador fotovoltaico, equipamentos de condicionamento de potência, conjunto motobomba, sistemas de armazenamento, se necessário, e um sistema de distribuição. Os mais simples possuem um gerador fotovoltaico conectado ao conjunto motobomba em corrente contínua, que se conecta a um sistema de distribuição que pode ser o sistema de geração.

A Figura 19 retrata a realidade do bombeamento de água com painel fotovoltaico, que são utilizados com frequência para a irrigação de culturas, na pecuária e no abastecimento de água residencial (SONTAKE; KALAMKAR, 2016).

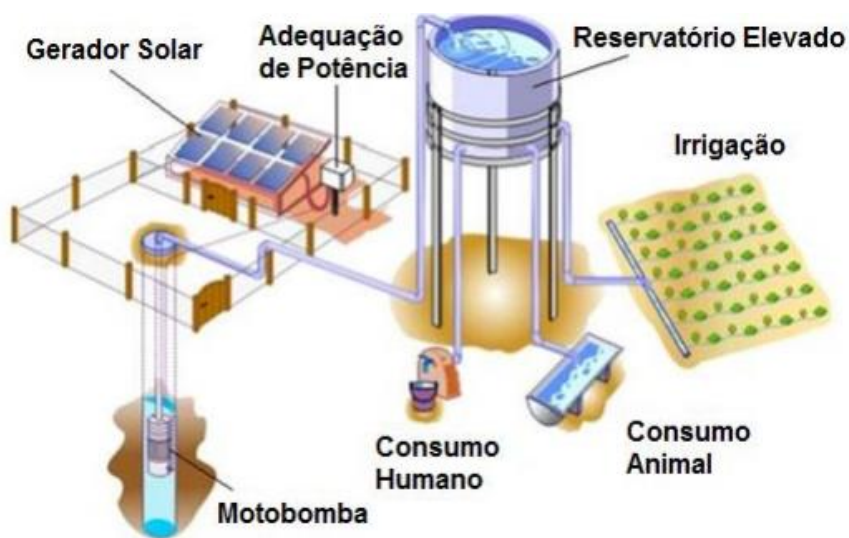


Figura 19. Sistema fotovoltaico de bombeamento para elevação de água com aplicações para consumo humano, animal e irrigação.

Fonte: Adaptado de Valer et al. (2016).

Para Meléndez (2009), os sistemas de bombeamento fotovoltaico podem ser do tipo de baixa potência (50 até 400 Wp), que tem como característica utilizar um motor em corrente contínua acionando uma bomba de deslocamento positivo com diafragma. Entre o gerador fotovoltaico e o motor se instala um conversor (corrente contínua/corrente contínua) para otimizar seu acoplamento. Como exemplo, existem os sistemas Solarjack SDS ou Shurflo 9300, bem como o sistema de média potência (400 até 1500 Wp) formado por duas configurações diferentes: tanto uma bomba centrífuga submersa multiestágios com motor assíncrono acionado por um inversor de frequência variável (sistemas Grundfos com condicionamento de potência tipo SA400 e SA1500), quanto os formados por um motor de corrente contínua sem

escovas (nesta faixa de potências podem ter um rendimento maior do que os motores trifásicos de indução convencionais e muito superior aos motores de indução monofásicos) operando uma bomba de deslocamento positivo helicoidal. Por fim, os sistemas que utilizam de conversor de frequência mais motobomba centrífuga multiestágios ou de deslocamento positivo (ambos de utilização industrial). Esses superam a máxima potência atingida pelos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica (1600 Wp), tornando-se uma solução viável, eficiente e econômica.

Periasamy, Jain e Singh (2015) exibem que o sistema de bombeamento de água pode ser utilizado para muitas finalidades como abastecimento residencial, circulação de água em piscinas, bombeamento de água pluvial, esgotamento de poços artesianos, refrigeração, pecuária e irrigação.

O bombeamento pode ser utilizado tanto na área urbana, quanto na rural. Padmavathi e Daniel (2011) avaliaram diversas opções de painéis fotovoltaicos para um sistema de bombeamento de água e necessidades domésticas de água para Cidade de Bangalore, na Índia. A conclusão foi de que os painéis fotovoltaicos de 60 Wp a 500 Wp são suficientes para edifícios residenciais em Bangalore. A sugestão do trabalho foi de implementação de políticas e regulamentações governamentais para a promoção do uso de bombas de água fotovoltaicas em setor doméstico.

Dal Bem et al. (2017) estudaram o bombeamento em uma propriedade rural localizada em Alta Floresta – MT utilizada na atividade de pecuária de corte para atender ao consumo dos animais. O sistema de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica avaliado era composto por uma bomba de 380 W que opera em 220 V, dois módulos policristalinos de 255 Wp cada conectados em paralelo e um inversor. Encontraram um volume de água bombeado de 3.500 litros por dia, suficiente para a manutenção de 150 bovinos.

Valer et al. (2013) evidenciam que os sistemas de bombeamento fotovoltaico figuram como uma solução viável para o abastecimento de água para produção agrícola, e que vêm sendo usados há muitos anos como uma alternativa para o abastecimento de água no meio rural. A partir disso, o estudo de bombeamento fotovoltaico para irrigação se faz necessário para áreas rurais ou afastadas a fim de otimizar os processos agrícolas recentes.

2.3.1 Uso de Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação

O SPIS (Sistema de Energia Solar para Sistemas de Irrigação) é uma tecnologia de irrigação comercialmente disponível, com baixos custos operacionais e de manutenção (Yu et al., 2011). A Índia, por meio de governos nacionais e estaduais, estabeleceu metas ambiciosas para a implantação da SPIS, apoiadas por incentivos como subsídio de capital e empréstimos concessionais (KULKARNI, 2015). Nestas contas, o mercado global de bombas solares está crescendo rapidamente e espera-se que atinja 1,5 milhão de unidades por ano até 2022 (GRAND VIEW RESEARCH, 2015).

Os sistemas de irrigação que utilizam energia solar figuram como uma forma acessível que faz com que os agricultores possam gerar energia em países em desenvolvimento, como é o caso da África subsaariana, sul da Ásia, América e América Latina. Essa tecnologia deve ser implementada de forma adequada, para evitar o uso desnecessário e o desperdício de água. A rápida expansão da irrigação utilizando energia solar oferece soluções viáveis que abrangem o tripé água-energia-alimento, proporcionando uma grande oportunidade para que os pequenos produtores possam melhorar a sua subsistência, prosperidade econômica e segurança alimentar (IDCOL, 2015; FAO, GIZ, 2018).

Chandel, Naik e Chandel (2015) reconhecem que a energia fotovoltaica (PV) para irrigação é competitiva em termos de custos em comparação com fontes tradicionais de energia para água em uma escala pequena de requisitos de bombeamento. Isso se deve ao aumento do custo do combustível fóssil e a redução no de watt de pico de células solares, em razão da massa de produção. Sistemas de bombeamento de água movidos a PV tornam-se atraente para aplicações pecuárias e agrícolas em locais remotos com acesso limitado à eletricidade convencional.

Kazem et al. (2017) estudaram um sistema de bombeamento de água para irrigação em áreas rurais de Omã. Os autores analisaram a substituição de um gerador a diesel para um sistema fotovoltaico com o objetivo de mitigar as emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente. Observaram que o emprego desta opção elimina cerca de 924 kg / ano de CO₂, 2,28 kg / ano de CO e 0,253 kg / ano de NO_x. O que representa evitar 0,172 kg / ano de HC, 1,86 kg / ano de SO₂ e 20,4 kg / ano de partículas suspensas da emissão ao meio ambiente.

Estudos no mesmo país com Al-Waeli et al. (2017) encontraram um rendimento energético ótimo do sistema fotovoltaico de 0,309 USD / kWh e 0,79 USD / kWh o custo para o motor a diesel a longo prazo.

Francisco, Cardoso e Silva (2015) realizaram a construção de painéis solares artesanais para o funcionamento de bombas d'água para servir a pequenos e médios sistemas de irrigação localizada no semiárido paraibano. Tendo como a problemática da obtenção de água potável para a região semiárida do Brasil.

Widiastuti e Wijayanto (2017) utilizaram um sistema híbrido de energia (solar e eólica) em um lote de fruta pitaya no distrito de Beji, Indonésia. Identificaram que o método de irrigação escolhido foi o de irrigação por gotejamento alimentada por uma bomba com uma combinação de 120 watts sistema fotovoltaico e turbina eólica de 5 lâminas. A conclusão foi de que o método forneceu a quantidade água para cada planta sendo ideal para implantação em um desenvolvimento país tropical.

Burney et al. (2010) estudaram a irrigação por gotejamento movida a energia solar como estratégia para melhorar a segurança alimentar na região rural de Sudano-Sahel África Ocidental. Chegaram à conclusão que a integração destes dois sistemas aumentou significativamente a renda familiar e ingestão nutricional, particularmente durante a seca.

Para Alvarenga, Ferreira e Fortes (2014), o sistema fotovoltaico autônomo para bombeamento de água em sistemas de irrigação por gotejamento vem se tornado uma opção economicamente competitiva para a agricultura familiar, principalmente nas populações localizadas em áreas remotas, como já mencionado. As culturas como pomares, hortaliças e as denominadas culturas orgânicas precisam, além dos nutrientes apropriados, de uma uniformidade na sua irrigação. Permite melhor captação e o uso racional da água, impossibilitando perda da colheita pelo estresse hídrico motivado por uma irrigação descontrolada ou escassa. Assim, com a otimização da energia fotovoltaica pode-se viabilizar todo tipo de cultivo competitivos no mercado consumidor.

2.4. Sistema de Irrigação

Zocoler, Cesar e Vanzela (2004) destacaram que o aumento da produtividade das culturas depende muito da irrigação utilizada, mas, a uniformidade

de distribuição de água tem sido um fator limitante para se alcançar um manejo eficiente do uso da água aplicada.

A irrigação por superfície, aspersão, localizada e subirrigação são os métodos conhecidos. Em cada tipo pode-se empregar um ou mais métodos associados. Para a escolha do método, deve-se analisar diversos fatores, como solo do local, clima, culturas escolhidas, disponibilidade de energia e condições socioeconômicas para as quais o sistema deve ser adaptado (ANDRADE, 2013).

Grah et al. (2018) apontam a irrigação localizada como um método eficiente no uso da água. A água é aplicada por gotejadores ou microaspersores de forma pontual, somente a região da raiz é molhada. As perdas de água por evaporação ou deriva são minimizadas, bem como as doenças fungicidas. O volume de água para irrigação localizada é menor quando comparado aos demais métodos de aplicação, sendo uma vantagem para locais em que os recursos hídricos são escassos ou que enfrentam conflitos pelo uso da água.

2.4.1. Sistema de Irrigação por gotejamento

Segundo Vilas Boas (2016), a irrigação localizada baseia-se na aplicação de água sobre a superfície ou abaixo do solo, usando tubulações pressurizadas e emissores, de modo a molhar somente uma região próxima à planta, conhecida como bulbo úmido. Ainda para o mesmo autor, o gotejamento é o sistema de irrigação mais difundido entre os sistemas de irrigação localizada e são empregados, principalmente, em cultivos com espaçamento amplo. Nesse sistema, a água circula com pressão até chegar aos emissores, cuja função é reduzir a velocidade da água e permitir a saída gota a gota.

Provenzano, Pumo e Di Dio (2005) descrevem que os emissores são chamados de gotejadores que são pequenos orifícios distribuídos ao longo da linha lateral. Aplica-se a água na forma de gotas com vazões em torno de 4l/h (0,5 a 10 l/h) e pressão variável de 2 a 10 mca. Os gotejadores podem ser localizados *in-line* (embutido paralelamente ao comprimento do tubo), *on-line* (o emissor é inserido na tubulação formando um ângulo de 90°) ou em prolongamento por microtubos.

Klar (2018) destaca em seu estudo que as perdas de água nos sistemas por gotejamento são normalmente menores do que na irrigação por microaspersão. A

explicação para isso é o sistema de gotejamento que tem menor área molhada de solo, quando comparado ao sistema de microaspersão no qual a água é lançada ao ar.

Para Andrade (2006), a proporção da área molhada do sistema de irrigação por gotejamento varia de 20 a 80% da área total, resultando em economia de água. Assim, o teor de umidade do solo pode ser mantido alto, por meio de irrigações frequentes e em pequenas quantidades, beneficiando culturas que respondem a essa condição.

Silva et al. (2015) apontam o sistema de gotejamento como eficiente e com boa uniformidade da água, porém o autor destaca que podem ser afetadas em função da variação dos emissores, variação da pressão por perda de carga e desnível geométrico, além de possíveis obstruções nos emissores.

Para Vilas Boas (2011), as vantagens do sistema de irrigação por gotejamento se sobressaem a boa eficiência no uso da água, maior produtividade, maior eficiência na adubação (fertilizantes podem ser aplicados via água de irrigação) e no controle fitossanitário, economia de mão de obra, redução dos gastos com energia e possibilidade de automação. E, como desvantagem, ressalta-se que a instalação exige um alto investimento na aquisição de equipamentos para captação, condução, controle e distribuição da água. Além disso, é preciso também levar em conta os gastos com energia e mão de obra para operação e manejo do sistema.

Da Silva e Da Silva (2005) identificaram, ao comparar a irrigação por gotejamento com outros métodos, a vantagem desse sistema operar sob baixas pressões de serviço e com menor conjunto motobomba e consumo de energia.

2.4.2. Avaliação de desempenho de sistema de irrigação

Conforme Werneck et. al. (2009), a irrigação é composta por várias técnicas que têm por objetivo deslocar a água no tempo ou no espaço a fim de melhorar as atividades agrícolas de cada região. Dessa maneira, corrigindo a distribuição natural das chuvas e, conseqüentemente, maximizando a produção.

Para se avaliar um sistema de irrigação, é comum utilizar coeficientes de uniformidade de distribuição, que expressam a variabilidade de aplicação das lâminas de irrigação (FRIZZONE, 2013). A avaliação do desempenho de um sistema

de irrigação, antes de qualquer estratégia de manejo, é importante para a implantação de um sistema de irrigação. Com efeito, pode-se instalar e ajustar o equipamento e sua utilização em relação aos requerimentos de água dos cultivos utilizados (BERNARDO et al., 2006).

A emissão dos sistemas de irrigação deve apresentar uma boa uniformidade de distribuição, pois está ligada à variabilidade da lâmina de irrigação ao longo da área molhada. Ela é expressa por índices ou coeficientes, sendo os mais utilizados o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (BERNARDO, 1995).

De acordo com Pizarro (1996), quanto maior o valor do CUD mais cara será a instalação de irrigação, exigindo maiores diâmetros de tubulações, menores comprimentos das tubulações laterais e maior investimento em reguladores de pressão.

Para Duarte et al. (2012), é indicado antes e após a instalação de um sistema de irrigação realizar a sua avaliação por meio de testes tendendo garantir sua máxima eficiência. Mantovani et al. (2007) evidenciam que a avaliação de um sistema de irrigação localizada consiste na coleta de lâminas aplicada com o auxílio de provetas e posteriores análises dos resultados por meio de equações matemáticas. Os autores complementam que os dados coletados podem ser utilizados para o cálculo de diversos coeficientes de uniformidade.

Segundo Merriam e Keller (1978), a uniformidade da irrigação está associada ao controle da qualidade nos processos de fabricação, falha no manejo, mudanças físicas dos componentes, envelhecimento e entupimento dos emissores.

A uniformidade de aplicação de um sistema de irrigação (CUD), apresentada originalmente por Keller e Karmeli (1974), indica a uniformidade de aplicação ao longo do sistema e é baseado na razão entre as vazões mínimas e médias dos emissores. A coleta de vazão ocorre em quatro pontos ao longo da linha lateral, ou seja, do primeiro gotejador, dos gotejadores situados a $1/3$ e a $2/3$ do comprimento da linha e o último gotejador.

O método proposto por Denículi et al. (1980) propõe a avaliação de um número maior de pontos ao longo da linha selecionada. A coleta da vazão é feita em oito gotejadores por linha lateral: do primeiro emissor, dos emissores situados à posição, $1/7$, $2/7$, $3/7$, $4/7$, $5/7$, $6/7$, e do último emissor.

Borssoi et al. (2016) avaliaram estatisticamente também a uniformidade em um sistema de irrigação por gotejamento utilizando duas metodologias diferentes: Keller e Karmeli, e a de Denículi. Apontaram que a metodologia de Denículi et al. (1980) mostrou-se mais confiável para a avaliação de sistemas de gotejamento

Ventura et al. (2017) avaliaram a eficiência de aplicação de água em um sistema de irrigação por gotejamento. A avaliação foi realizada na bancada de ensaios (*indoor*) e foram calculados os coeficientes de uniformidade de Christiansen, de distribuição e estatístico. Os autores encontraram em seus estudos os parâmetros CUC, CUD e CUE classificados como excelente e a eficiência de aplicação como aceitável.

De Carvalho et al. (2018) também avaliaram o desempenho de um sistema de irrigação localizada tipo gotejamento instalado em uma área cultivada (*outdoor*) com a cultura da goiaba (*Psidium guajava* L.). O sistema avaliado apresentou uma baixa eficiência, em consonância com os valores dos coeficientes de uniformidade e de eficiência de aplicação, que foram bastante inferiores aos valores recomendados por alguns autores.

2.5. Gráfico de controle de Shewhart

Os gráficos de controle foram originalmente propostos em 1924, por Walter Shewhart, com a intenção de eliminar variações anormais pela diferença entre variações relacionadas com as causas assinaláveis e aquelas decorrente das causas aleatórias. Tem por objetivo monitorar o processo e sinalizar aos analistas a necessidade de investigá-lo e ajustá-lo, conforme o tamanho dos desvios encontrados. Milan et al. (2002) utilizaram o controle estatístico de processo em operações agrícolas obtendo em suas pesquisas dados considerados satisfatórios. Para os autores citados, uma definição aceita para qualidade é a redução da variabilidade, pois quanto menor for, melhor será a confiabilidade e a aceitação do produto ou serviço.

Esses tipos de gráficos, Shewhart, conseguiram êxito em razão de sua simplicidade, pois eles apresentam facilidade na regra de decisão se baseia apenas no exame do último ponto observado. Sendo assim, eles investigam a presença de causas especiais no processo. Entretanto, isso pode ser uma desvantagem pelo fato

de ignorar qualquer dado informado pela sequência anterior de pontos. Dessa maneira, diz-se que o gráfico “não possui memória” fazendo com que o tipo Shewhart seja insensível a pequenas mudanças no processo, da ordem de $1,5\sigma$ (erros padrão) ou menos (MONTGOMERY, 2009).

Klein (2012) aponta que a estatística de controle de qualidade é considerada a ferramenta responsável pelo triunfo na produção de produtos de qualidade. Em seu trabalho utilizou do gráfico do tipo Shewhart para monitorar um processo de aplicação de água em um sistema de irrigação familiar por gotejamento, obtendo boas perspectivas de pesquisas e respostas.

Em resumo, o gráfico de controle consiste na plotagem de três linhas. Representam os limites de controle: um limite de controle superior (LCS), um limite de controle inferior (LCI) e a média de amostras (subgrupos racionais), conhecida como a linha central (LC), que é a média da variável ou o alvo (valor nominal) da característica. A Figura 20 apresenta os principais elementos dos gráficos de controle tradicionais de Shewhart as linhas de controle ficam em uma distância de três erros padrão da linha central (SAMOHYL, 2009).

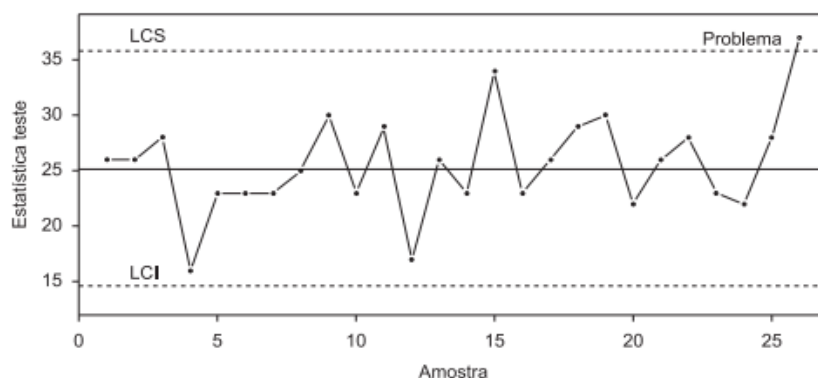


Figura 20: Gráfico de controle em formato conceitual.
Fonte: Samohyl (2009).

Juchen, Suszek e Vilas Boas (2018) avaliaram um sistema de irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais e utilizaram gráficos de controle para verificar os valores de vazões obtidos nos tratamentos com fertirrigações.

Hauptenthal et al. (2018) examinaram o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento, diretamente com energia fotovoltaica, conectado ao

sistema de bombeamento de água por dois coeficientes de uniformidade da irrigação utilizando o gráfico de controle de Shewhart.

O uso de gráficos de controle, para Vilas Boas (2016), pode ser utilizado na irrigação para analisar o atendimento das normas da qualidade de irrigação, no monitoramento de erros (entupimento de emissores), para o cálculo da incerteza da medição na irrigação, na demonstração da qualidade das medições e nas informações quanto ao status do processo de irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Localização da Área Experimental

O trabalho foi desenvolvido no Centro de Análise de Sistemas Alternativos (CASA), Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE (Figura 21), localizado no *Campus* de Cascavel-PR. O sistema de irrigação por gotejamento foi montado *indoor* do laboratório CASA (2) e também *outdoor* nas proximidades (3). A localização geográfica é definida pela Latitude sul (S) 24°59' e Longitude oeste 53°27' (W) e altitude média de 750 metros.



Figura 21: Vista Panorâmica do Centro de Análise de Sistemas Alternativos e da implantação dos experimentos. 1-Sistema de irrigação outdoor; 2- Sistema de irrigação indoor; 3- Painel fotovoltaico do sistema; 4- Reservatório de água com sistema motobomba; 5- Localização do datalogger; N- Norte geográfico do local.

Fonte: Google Earth

O reservatório de água com sistema motobomba, indicado na Figura 28, foi instalada adjacente ao laboratório, próximo do sistema de painéis fotovoltaicos. O datalogger foi instalado no piso superior do laboratório para o armazenamento de dados.

3.1.2 Características Ambientais do Experimento

Segundo o Sistema de Meteorologia do Paraná-SIMEPAR, o clima é temperado, mesotérmico e úmido, com temperatura média anual em torno de 18,2°C. A região está sujeita a geadas, embora não muito frequentes. A umidade relativa do ar gira em torno de 75% e os ventos sopram na direção nordeste/sudeste e leste/oeste com velocidade média entre 33 Km/h e 46 Km/h. O clima é classificado como Cfa, considerado subtropical úmido, pela classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média de 18,2°C e pluviosidade média anual de 1822 mm.

3.1.3 Equipamentos Utilizados na Montagem do Experimento

O experimento do sistema de irrigação por gotejamento fotovoltaico é composto pelos módulos que compõem o painel fotovoltaico, o conjunto motobomba e o sistema de irrigação por gotejamento, resumidamente. A Figura 22 apresenta um *layout* geral da posição dos equipamentos utilizados no experimento.

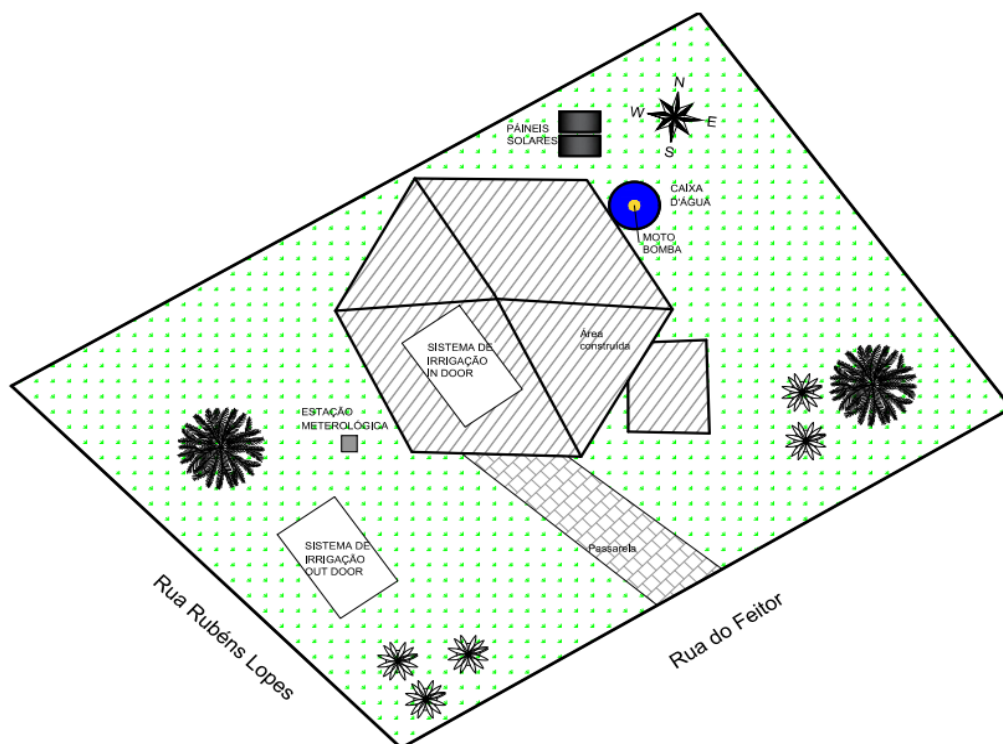


Figura 22: Vista superior com a posição dos equipamentos no experimento. (Sem Escala)

3.1.3.1. Painel Fotovoltaico Utilizado no Experimento

Para gerar energia elétrica ao sistema de motobomba, utilizou-se um conjunto de dois módulos fotovoltaicos, em paralelo, de silício amorfo, como ilustra a Figura 23. Cada módulo possui potência nominal de 40Wp e tensão nominal máxima de 46V, a tensão OC é 61 V, corrente nominal de 0,87 A e a corrente SC de 1,00 A. Os módulos fotovoltaicos foram associados em paralelo, formando um painel fotovoltaico de 120WP.



Figura 23. Painel fotovoltaico de silício amorfo instalado para o experimento na inclinação 35 graus e voltado para o norte geográfico.

As especificações de cada módulo de silício amorfo são apresentadas na Tabela 2. Os painéis foram montados em suportes com inclinação de 35 °C. Este valor é correspondente a latitude local acrescida de 10 °C, fixados com orientação geográfica norte (N). Assim, os painéis são otimizados para a operação no período de inverno.

Tabela 2. Especificações técnicas de módulo JN40F da Solarterra

Característica	Especificação Técnica
Modelo	JN40F
Potência máxima (P _{MAX})	40 WP
Corrente nominal em P _{MAX} (I _{MP})	0,87 A
Tensão nominal em P _{MAX} (U _{MP})	46 V
Corrente de curto circuito (I _{SC})	1,00 A
Tensão de circuito aberto (U _{OC})	61,0 V
Dimensões (CxLxE)	1253 x 643 x 37 mm
Peso	15 kg

Fonte: JN40F(2018).

3.1.3.2. Piranômetro Utilizado no Experimento

Para mensurar a irradiação solar global incidente no plano horizontal dos painéis (direta + difusa), usou-se um piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP3, com $15,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ de sensibilidade. A Figura 24 apresenta o piranômetro instalado e a Tabela 3 descreve suas especificações técnicas.

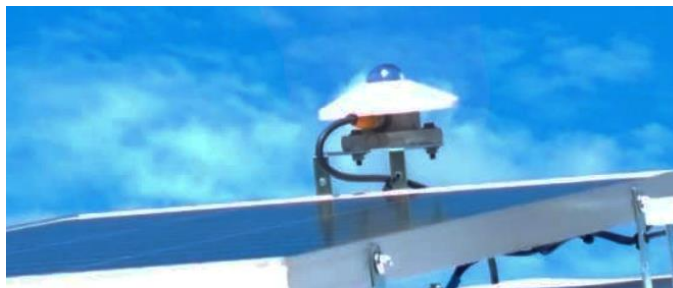


Figura 24. Piranômetro instalado nas mesmas inclinação e orientação do painel fotovoltaico.

O piranômetro foi instalado junto ao painel fotovoltaico, de maneira a permanecer na mesma inclinação do painel.

Tabela 3. Especificações técnicas do piranômetro CMP3 da Kipp & Zonen

Característica	Especificação Técnica
Modelo	CMP3
Sensibilidade	5 a 15,3 $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$
Faixa espectral	300 a 2800 nm
Máxima irradiação	2000 W m^{-2}
Precisão	$\pm 5\%$
Tempo de resposta 95%	18 s
Temperatura de operação	-40 °C a +80 °C
Dimensões	$\varnothing 7,5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$
Peso	543 g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CMP3-L (2018).

3.1.4. Sistema de bombeamento de água do experimento

Para o recalque de água para o sistema de irrigação por gotejamento indoor e outdoor, foi utilizada uma bomba submersa da marca Solarjack, modelo SDS-D-228 do tipo diafragma, a qual é apresentada na Figura 25 (a) e (b) e as especificações técnicas descritas na Tabela 4.



Figura 25. Motobomba. (a) Bomba do tipo submersa marca Solarjack (b) colocação da bomba na caixa d'água.

Tabela 4. Especificações técnicas da bomba d'água SDS-D-228 da SolarJack

Característica	Especificação Técnica
Modelo	SDS-D-228
Tensão nominal	30 V
Corrente nominal	2,6 A
Potência nominal	79 W
Altura manométrica máxima	70 m
Vazão nominal	9 L min ⁻¹
Dimensões	Ø 9,7 cm x 27,4 cm
Peso	6,3 Kg

Fonte: SOLARJACK (2018).

3.1.4.1. Reservatório de água utilizado no experimento

Para o bombeamento de água, a bomba SOLARJACK foi instalada em uma um reservatório com água de 1000L de capacidade (Figura 26), localizado externamente ao laboratório. A água foi bombeada do reservatório de água até o sistema de irrigação por meio de uma mangueira em polietileno de 1/2" de diâmetro.



Figura 26. Reservatório de água utilizado. (a) demarcação do nível d'água empregado (b) mangueira que interliga o sistema motobomba com o sistema de irrigação.

A bomba foi submersa por água e depositada deitada em reservatório como indicado na Figura 26 (a). O reservatório de água foi repostado sempre que o nível d'água baixou consideravelmente, evitando o colapso da bomba.

3.1.4.2. Sensor de fluxo de água utilizado no experimento para a medição da vazão

A medição de vazão foi realizada com um sensor de fluxo de água da marca Yifa, modelo Yf-s201 com rosca de $\frac{1}{2}$ " (Figura 27), que tem como princípio de funcionamento o efeito *Hall*. De acordo com esse efeito, conforme o fluxo de água passa pela câmara de água do sensor, faz movimentar as pás acopladas ao rotor. A medida com que a vazão de água aumenta, a velocidade com que o rotor gira aumenta proporcionalmente.



Figura 27. Medidor de vazão de água Yf-s201.

A Tabela 5 mostra as especificações técnicas pelo fabricante do sensor de fluxo de água empregado no experimento.

Tabela 5. Especificações técnicas do sensor de fluxo de água

Característica	Especificação Técnica
Modelo	Yf-s201
Intervalo de trabalho	1-30 L min ⁻¹
Pressão de água suportada	≤ 1,75 Mpa
Tensão nominal de trabalho (UCC)	5~18 V
Corrente máxima de operação (5V)	15 mA
Temperatura	≤ 80 °C

Fonte: YIFA (2018).

O sensor de fluxo de água era regulado na unidade segundo o número a vazão de pulsos por segundo, instantâneo e/ou médio em um dado intervalo de

tempo. Posteriormente, já na análise e tratamento dos dados, estes pulsos/minuto foram então convertidos em litros/minuto.

3.1.5. Sistemas de Irrigação por Gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento foi ensaiado no laboratório do projeto CASA (*indoor*) e o mesmo sistema foi instalado ao lado externo do laboratório (*outdoor*), com as mesmas disposições técnicas. Foram utilizadas quatro fitas de gotejamento de 5,4 m de comprimento distanciados 40 cm entre si, com gotejadores espaçados a cada 30 cm. A Figura 28 demonstra o sistema de irrigação composto por 18 coletores por linha, totalizando 72 coletores.

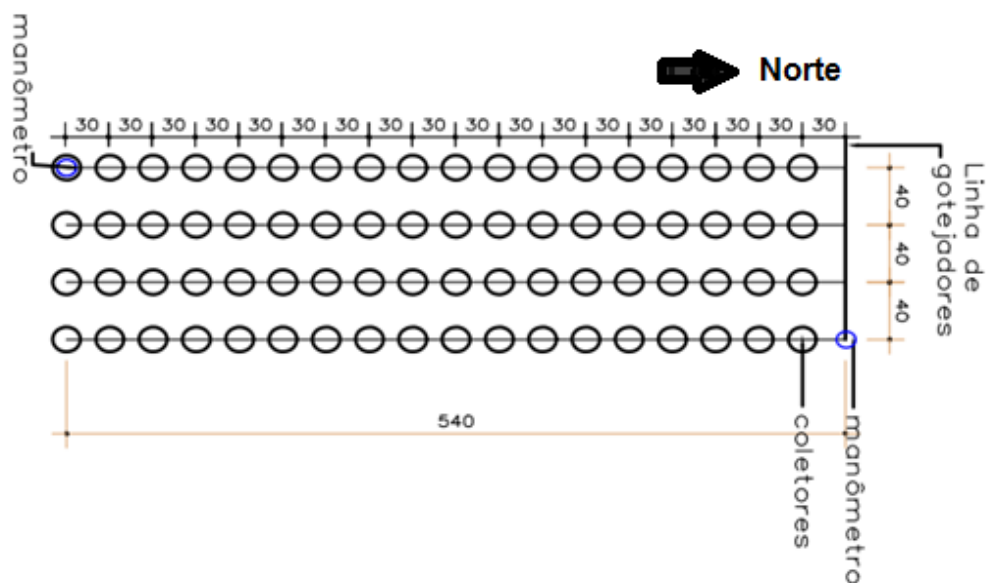


Figura 28. Croqui do sistema de irrigação por gotejamento.

Os tubos gotejadores *in-line* utilizados no experimento foram da marca Netafim, modelo *Micro Drip*, como o apresentado na Figura 29.



Figura 29. Tubo gotejador da marca Netafim, modelo *Micro Drip*.

Para determinar a vazão do emissor, foi utilizada a Equação 1 recomendada pela empresa fabricante:

$$q = k \times H^x \quad (1)$$

Em que:

q = vazão do emissor (l.h⁻¹);

H = Pressão de serviço (Kpa);

k e x = Constantes referentes ao dimensionamento do gotejador ($k=0,2094$ e $x=0,49$)

Os coletores de água utilizados foram do tipo transparentes de resina termoplástica de Polipropileno (PP), com superfície estriada na horizontal, como mostrado na Figura 30. Cada coletor possuía a capacidade de 500 ml, respectivamente. A linha de gotejamento fica distante do chão 17 cm (Figura 30 a). A distância da linha para a abertura do copo é de 5 cm (Figura 30 b) para cada coletor, tanto para o sistema *indoor* e *outdoor*.

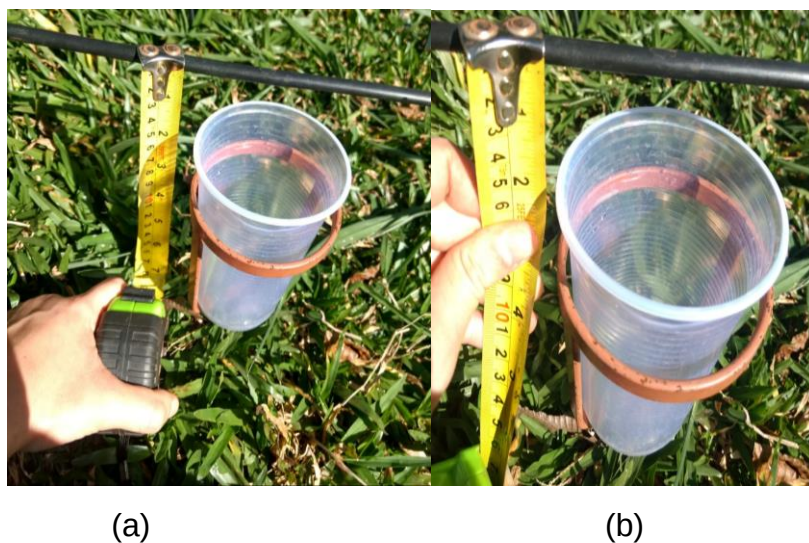


Figura 30. Coletor do sistema de irrigação por gotejamento (a) coletor utilizado com a distância da linha de gotejadores até o solo (b) distância da linha de gotejadores até a abertura do coletor.

Para medir a pressão manométrica, foram utilizados três manômetros de glicerina que medem de 0 a 6 bar de pressão. Como indicado na Figura 31 (b) e (c), foi instalado um manômetro no início das linhas de gotejadores e um no final do sistema, assim se obtendo a variação de pressão d'água ao longo dos tubos gotejadores. Além disso, um terceiro manômetro foi instalado na saída da água, a fim de registrar a pressão inicial do sistema (Figura 31 a).

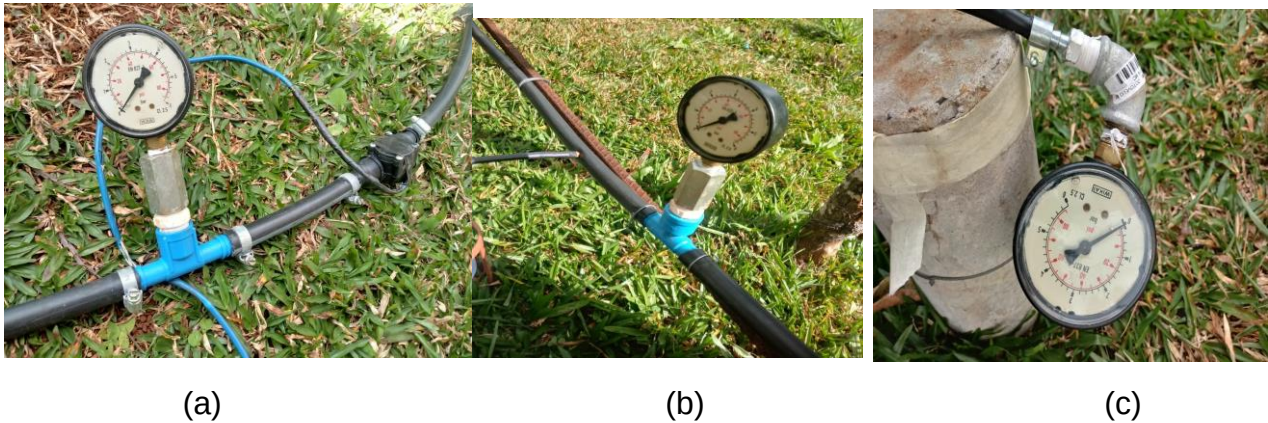


Figura 31. Manômetros utilizados (a) entrada do sistema após a caixa d'água (b) entrada do sistema de irrigação por gotejamento (c) final do sistema de irrigação por gotejamento.

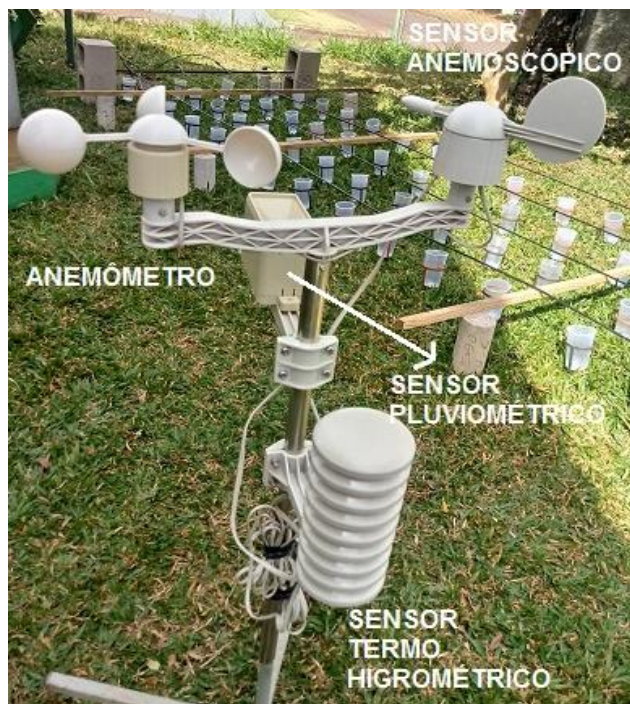
3.1.5.1. Sistema de Irrigação por Gotejamento *outdoor*

O sistema de irrigação instalado nas proximidades do laboratório CASA está representado na Figura 32.



Figura 32. Sistema de irrigação por gotejamento implantado próximo do laboratório CASA.

Para este sistema foi utilizado uma miniestação meteorológica sem fio, da marca Instrutemp-ITWH 1080 para a mensuração dos dados climáticos referentes à temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (atm), velocidade (ms^{-1}) e direção do vento (Figura 33a). Estes dois últimos são importantes para o sistema, pelo fato de estar em campo aberto sofrendo as intempéries do local. O receptor dos dados (Figura 33 b) ficou a 5 metros de distância, programado para receber os dados meteorológicos a cada 10 minutos, via wireless.



(a)



(b)

Figura 33. (a) Estação meteorológica (b) e receptor de dados.

3.1.5.2. Sistema de Irrigação por Gotejamento *indoor*

A Figura 34 mostra o sistema implantado dentro do laboratório CASA. Para este sistema foi medida a temperatura e a umidade relativa do ar interna, por meio do receptor de dados da estação meteorológica.



Figura 34. Sistema de irrigação por gotejamento implantado dentro do CASA.

3.1.6. Datalogger

O datalogger que foi utilizado é da marca CAMPBELL SCIENTIFIC, modelo CR 1000. A Figura 35 mostra o Datalogger e a Tabela 6 apresenta as especificações técnicas do equipamento. Foram coletados e gravados os valores de irradiação, médias de tensão e corrente dos painéis amorfo, também a vazão do sistema pelo fluxômetro.



Figura 35. Datalogger da Campbell Scientific, modelo CR1000.

Tabela 6. Especificações do Datalogger CR 1000, da Campbell Scientific

Características	Especificações
Modelo	CR 1000
Alimentação	9,6 ~ 16 VCC
Temperatura de operação	- 25 ~ 50 °C
Entradas analógicas	8
Entradas controladoras de pulsos	2
Canais de corrente	3
Comunicação	1 CS I/O, 1 RS-232
Faixa de leitura em entrada	± 5 VCC
Precisão	$\pm 0,06\%$ (0 ~ 40°C)
Dimensões	23,9 x 10,2 x 0,85 cm
Peso	1000 g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000 (2018).

O intervalo de leitura do *datalogger* CR1000 em uma entrada analógica é de ± 5 VCC. Em razão disso, foi necessário montar um divisor resistivo entre os terminais de alimentação da bomba de água.

3.2 Métodos

3.2.1 Coleta de dados

As coletas de dados do experimento foram realizadas em 10 dias de céu aberto e 10 dias de céu parcialmente nublado, tanto para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor*, quanto para o *outdoor*. Os períodos coletados foram 9h45min; 11h; 13h:30min e 15h. Cada ensaio teve a duração de 5 minutos nos respectivos horários. As coletas foram iniciadas no mês maio e foram finalizadas no mês de novembro. Dessa maneira, dividiu-se em duas estações: Outono (*indoor* e *outdoor*) e Primavera (*indoor* e *outdoor*).

Os horários foram escolhidos em função dos índices de maior irradiância que ocorrem entre o intervalo das 9h45min e 15h. Optou-se pelo experimento ser realizado no sistema *indoor* e *outdoor*, no sentido de demonstrar e comparar as diferenças de um sistema controlado, simulando um ambiente protegido, e em *loco* a campo, respectivamente. O delineamento estatístico utilizado foi de 4 X10 X 2 X 2 (Figura 36).

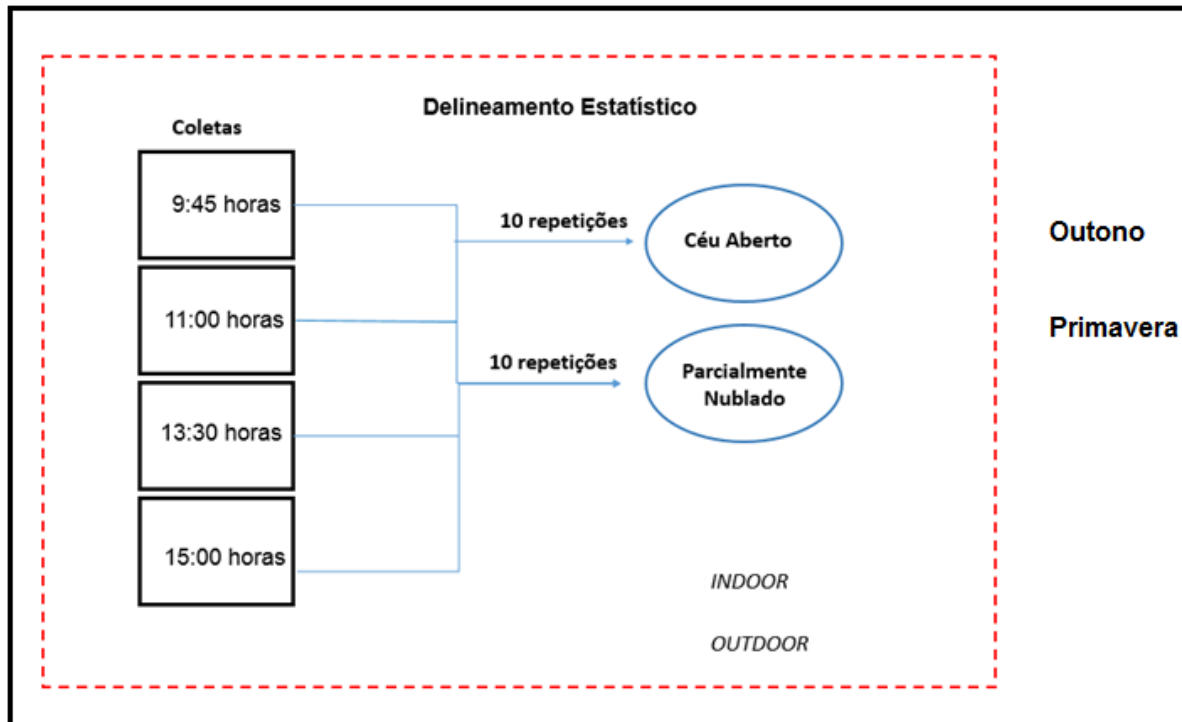


Figura 36. Delineamento utilizado no experimento.

Cada ensaio contou com 72 coletores, dispostos em 4 linhas de chamadas ao longo dos tubos gotejadores. O tubo gotejador possui 18 coletores em linha de gotejamento, respectivamente. Para a medição da vazão de cada coletor, foram realizadas provetas graduadas em milímetros (ml).

3.2.2. Montagem e funcionamento do experimento

A montagem do experimento foi composta pelo piranômetro, módulos fotovoltaicos, circuito de seccionamento e sensoriamento para o *datalogger* e alimentação da bomba d'água, além de todo o sistema hidráulico composto pelo armazenamento e bombeamento da água até o sistema de irrigação e sensoriamento de pressão e fluxo da água bombeada (Figura 37).

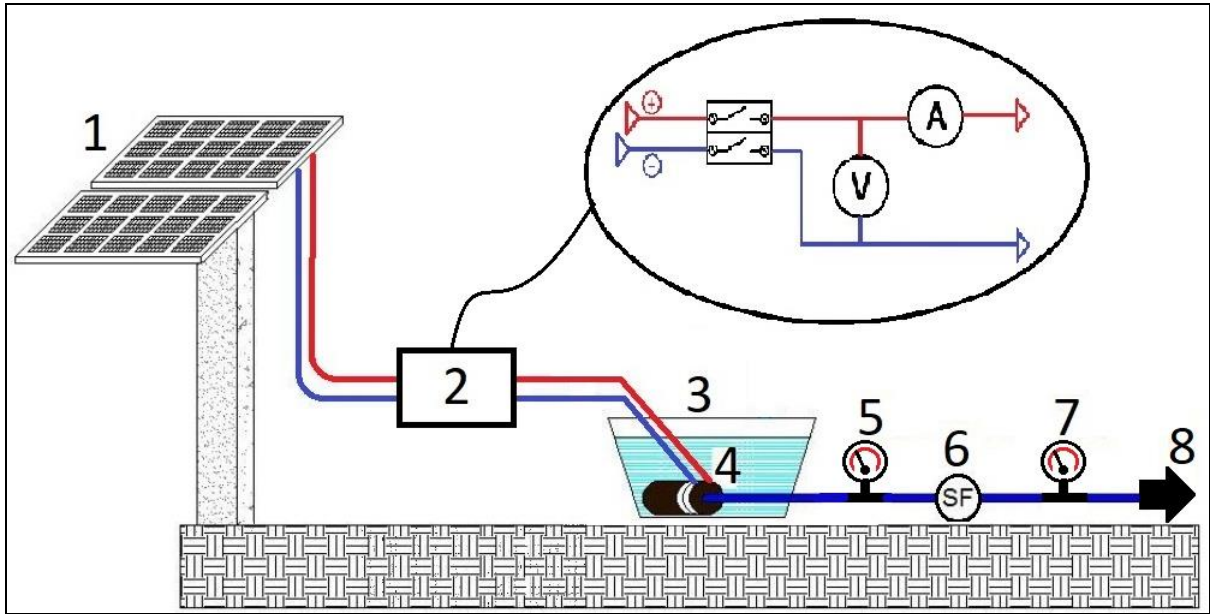


Figura 37. Diagrama geral da montagem experimental. Onde: (1) painel fotovoltaico; (2) circuito de seccionamento + sensoriamento para datalogger; (3) caixa d'água; (4) bomba d'água submersa; (5) manômetro de saída da bomba; (6) sensor de fluxo de água; (7) manômetro de entrada do sistema de irrigação; e (8) sistema de irrigação.

O funcionamento da bomba só ocorreu nos horários de incidência de irradiação solar sobre os painéis, ou seja, nenhum sistema de armazenamento de energia elétrica foi utilizado para que o sistema operasse durante a noite ou dias nublados.

Na Figura 37 pode-se visualizar que o painel fotovoltaico forneceu a energia elétrica para o funcionamento da bomba submersa, esta que impulsionou o curso da água até o sistema de irrigação por gotejamento. Os manômetros aferiram as pressões na saída de caixa de água, início e final do sistema de irrigação por gotejamento. O sensor de fluxo de água mostrou a vazão de água que provinha do reservatório. O piranômetro instalado no painel fotovoltaico mediu a irradiância solar disponível. Todos os dados foram armazenados no aparelho datalogger, exceto os oferecidos pelo manômetro que foram registrados visualmente.

3.2.3. Arranjo dos Módulos fotovoltaicos do experimento

Para atender à potência máxima de 80 W da bomba, foram utilizados no painel amorfo módulos configurados em paralelo de forma a satisfazer a demanda energética da carga nos horários de máxima irradiação solar. A Figura 38 mostra os arranjos montados. A ligação em paralelo dos módulos em silício amorfo é de 80 WP, sendo a tensão e a corrente máximas de 46 V e 1,74 A, respectivamente.

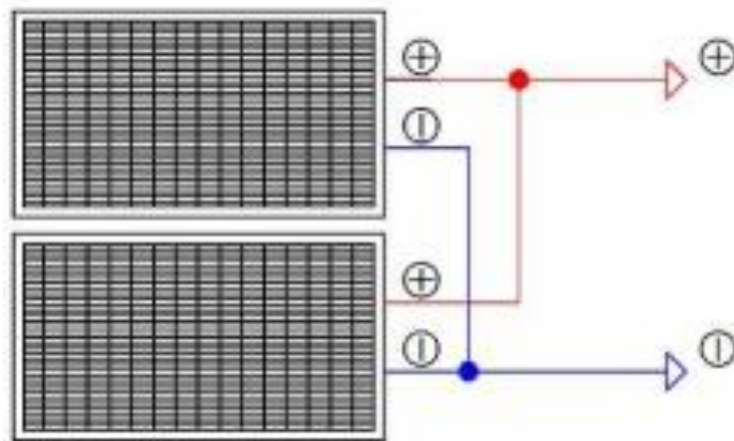


Figura 38. Arranjos dos geradores fotovoltaicos amorfos

3.2.4. Método de aquisição de dados por meio do datalogger

O diagrama elétrico da montagem experimental, como ilustrado pela Figura 39, é composto pelo piranômetro, painel fotovoltaico formado por dois módulos com 40 Wp cada, conectados em paralelo, um disjuntor bipolar (com o simples propósito de seccionar o circuito), medição da tensão elétrica conectada em paralelo à alimentação da bomba d'água, a medição da corrente elétrica conectada em série e a conexão com a bomba d'água.

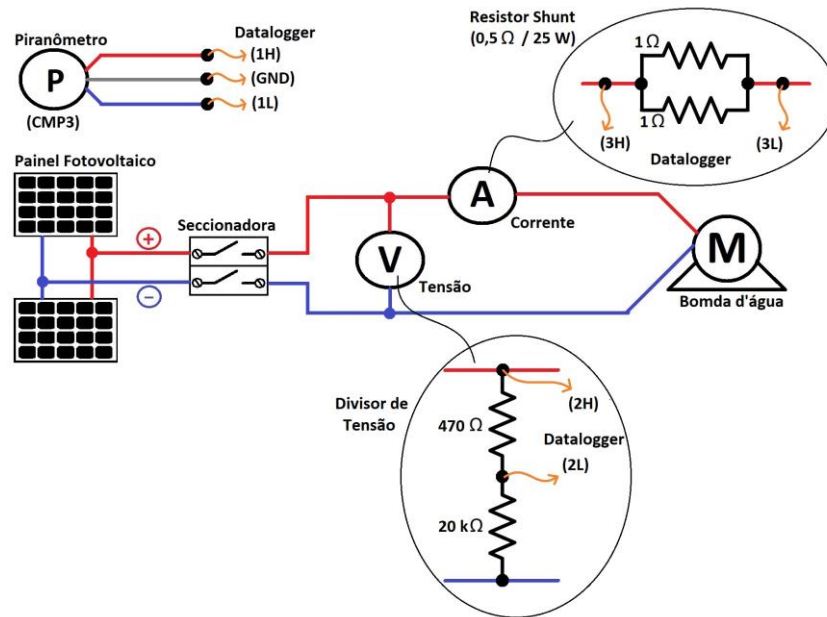


Figura 39. Diagrama elétrico, posicionamento e ligações dos sensores.

Para a medida da corrente elétrica entregue pelo painel fotovoltaico à bomba d'água, foi utilizado um resistor shunt conectado em série com a bomba. Como mostra a Figura 39, este resistor shunt foi montado a partir da conexão em paralelo de dois resistores de alta potência, cada um com uma resistência igual a $1\ \Omega$ resultando, então, em uma resistência shunt de $0,5\ \Omega$. Quanto ao funcionamento deste, a corrente que atravessa o resistor shunt proporciona, entre seus dois terminais (identificados por '3H' e '3L' na conexão com o datalogger), uma queda de tensão elétrica proporcional àquela corrente e, por isso, o interesse em resistor de baixa resistência, pois quanto menor for a resistência, menor será a queda de tensão e, consecutivamente, menor a interferência na alimentação da carga.

Os módulos fotovoltaicos utilizados produzem uma tensão de até $61,0\ \text{Vcc}$ em circuito aberto e as especificações do datalogger CR1000 limitam a tensão de entrada em $\pm 5\ \text{Vcc}$. Dessa forma, foi utilizado um divisor resistivo de tensão para reduzir a tensão produzida pelos módulos a um nível compatível com o datalogger. Então, para tal, foi utilizado o chamado divisor resistivo de tensão, quando a queda de tensão medida entre os terminais do resistor de menor valor (identificados por '2H' e '2L' na conexão com o datalogger) é proporcional à tensão total do circuito.

As portas utilizadas no datalogger foram: piranômetro conectado nas portas "1H", "1L" e "GND"; tensão nas portas "2H", "2L"; corrente nas portas "3H", "3L", respectivamente.

A frequência de coleta de dados foi programada no datalogger CR 1000 para ocorrer a cada 5 segundos, sendo que a cada 5 minutos uma média dos valores obtidos neste período foi realizada e gravada na memória interna para posterior análise compatibilizada no *notebook*.

3.2.4.1. Tensão e correntes reais

Em decorrência da necessidade de adaptar a tensão lida para um intervalo de ± 5 V, compatível com a leitura do datalogger CR 1000, foi usado um divisor resistivo para coletar uma parcela da tensão gerada. Com o mesmo intuito, foi dimensionada a resistência *shunt*, a fim de encontrar a corrente que alimenta a carga.

Sendo $470\ \Omega$ e $20\text{k}\ \Omega$ as resistências usadas no divisor resistivo, com a leitura do datalogger sobre a de menor valor, determinou-se os valores reais de tensão usando a Equação 2.

Da Lei de Ohm, a tensão lida do resistor *shunt* pelo datalogger (dada em mV) foi convertida para a correspondente corrente elétrica pela Equação 2.

$$U = R * I \therefore \text{Corrente (A)} = \frac{\text{Tensão}_{amostra}}{\text{Resistência}_{shunt}} * 1.10^{-3} \quad (2)$$

Relação de tensão do divisor resistivo dada pela Equação 3.

$$\text{Tensão}_{amostra} = \frac{470\ \Omega}{(20.000 + 470)\ \Omega} * \text{Tensão}_{painel\ FV} \quad (3)$$

Como a leitura do *datalogger* é dada em mV (10^{-3} V) a Equação 3 pode ser analogamente descrita pela Equação 4.

$$\text{Tensão}_{painel\ FV} = \frac{(20.000 + 470)\ \Omega}{470\ \Omega} * 1.10^{-3} * \text{Tensão}_{amostra} \quad (4)$$

3.2.4.2. Potência

Com a tensão e corrente reais, determinou-se a potência a partir da Equação 5.

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

Onde:

P: Potência gerada pelo painel fotovoltaico (W).

3.2.5. Energia solar disponível e energia consumida pela carga

A energia solar disponível é a radiação solar incidente sobre a área útil do painel fotovoltaico em um intervalo de tempo. A energia consumida é a potência requerida pela carga em um período delimitado.

Os dados foram coletados a cada 5 minutos, calculou-se as energias médias horárias, disponíveis e consumidas, de acordo com Siqueira (2005) seguindo as Equações 6 e 7 :

$$ED = \sum_{i=1}^n PD_i \cdot t \quad (6)$$

$$EC = \sum_{i=1}^n PC_i \cdot t \quad (7)$$

Sendo:

$$PD = R_s \cdot A \quad (8)$$

$$PC = U \cdot I \quad (9)$$

Onde:

t: $\frac{1}{12} h$;

n: Enésimo valor do conjunto de dados;

ED: Energia solar disponível (W h);

EC: Energia consumida pela carga (W h);

PD: Potência solar disponível (W);

PC: Potência requerida pela carga (W);

R_s : Irradiação solar global (W m^{-2});

A: Área das células fotovoltaicas (área útil) do painel fotovoltaico (m^2).

3.2.5.1. Determinação da eficiência dos painéis, da bomba e do sistema

A eficiência dos painéis fotovoltaicos (%) pode ser encontrada pela Equação 10, tal como apresentam Ceylan et al. (2014)

$$\eta_{PV} = \frac{PC}{PD} \cdot 100 \%$$

(10)

Onde:

η_{PV} : Eficiência do painel fotovoltaico (%).

3.2.8 Avaliação do desempenho do sistema de irrigação por gotejamento

Os critérios utilizados para avaliar o sistema foram o coeficiente de variação (CV) do emissor lateral, a uniformidade de emissão (CUD) e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Além disso, também foi realizada a comparação do método de Keller e Karmeli, Denículi e a medição total de todos coletores para a irrigação estudada.

3.2.8.1. Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

A uniformidade de aplicação de água foi expressa pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), que é um dos mais utilizados, pois adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão, como se pode observar na Equação 11.

$$CUC = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{n_e \bar{q}} \right\} 100 \quad (11)$$

Onde:

q_i : Vazão de cada gotejador ($L \cdot h^{-1}$);

$\bar{q}$: Vazão média dos gotejadores ($L \cdot h^{-1}$);

n_e : Número de gotejadores.

A partir disso, os dados do CUC foram classificados segundo os critérios representados da Tabela 7:

Tabela 7. Critérios para classificação de CUC

Classificação	CUC
Excelente	90-100
Bom	80-90
Regular	70-80
Ruim	60-70
Inaceitável	< 60

Fonte: ASABE (1996).

3.2.8.2. Coeficiente de Uniforme CUD

Para avaliar a uniformidade em função das áreas que recebem menos água, é necessário utilizar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), proposto por Kruse (1978), bem como recomendado pela Normativa 12 da ABNT (1985), dado em porcentagem (%) e expresso pela Equação 12 (CUNHA et al., 2006).

$$CUD = \frac{q_{25\%}}{\bar{q}} 100 \quad (12)$$

Onde:

$q_{25\%}$ = valor médio de 25% das menores vazões ($L \cdot h^{-1}$);

Esse coeficiente é definido como a medida da distribuição da água que relaciona a quarta parte da área total e recebe menos água com a lâmina média aplicada.

Após os dados obtidos, utilizou-se a norma ASABE (1996), apresentada na Tabela 8 e determinou-se a classificação recomendada para os valores de coeficiente de uniformidade de distribuição.

Tabela 8. Critérios para classificação de CUD

Classificação	CUD
Excelente	> 90
Bom	75 – 90
Regular	62 – 75
Ruim	50 – 62
Inaceitável	< 50

Fonte: ASABE (1996).

3.2.8.4. Metodologia de Keller e Karmeli (1975)

Com base na metodologia de Keller e Karmeli (1975), determinou-se as vazões em 16 gotejadores dentro do sistema de irrigação, selecionando quatro linhas laterais ao longo da linha de derivação, que são: a primeira a 1/3 e 2/3 do comprimento da linha de derivação e a última linha lateral (Figura 40).

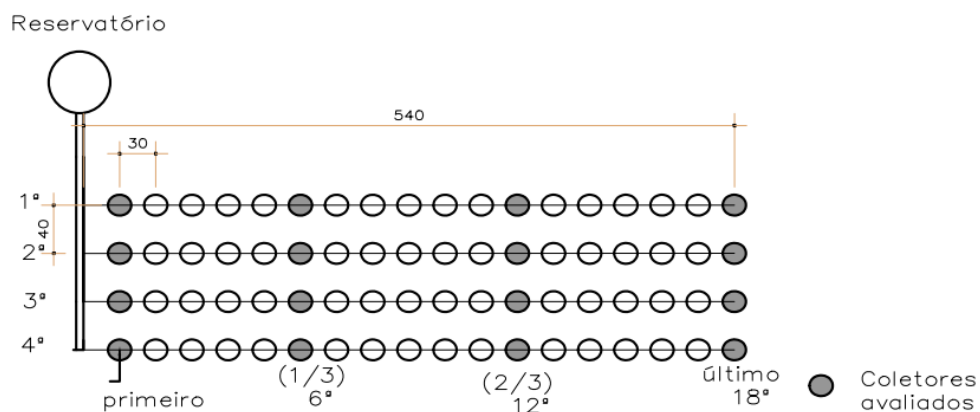


Figura 40. Coletas realizadas na metodologia de Keller e Karmeli para a irrigação.

3.2.8.5. Metodologia de Denículi et al. (1980)

Em conformidade com a metodologia de Denículi et al. (1980), as vazões são determinadas em 32 gotejadores dentro do sistema de irrigação. Selecionaram-se oito coletores por linha lateral: primeiro gotejador, dos gotejadores situados a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e do último gotejador (Figura 41).

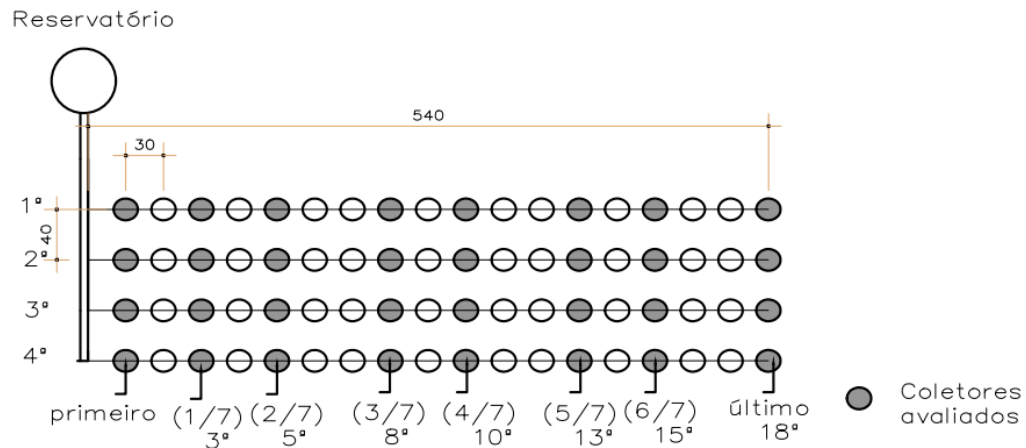


Figura 41. Coletas realizadas na metodologia de Denículi para a irrigação.

Além disso, foram coletadas todas as vazões de todos coletores e comparados com as outras metodologias citadas.

3.2.8.6. Teste de Normalidade

A verificação do formato da distribuição foi realizada pela construção do histograma, separando-se a amostra pelas condições de céu (céu aberto e parcialmente nublado). O histograma é um gráfico de barras justapostas em que no eixo horizontal está a variável de interesse dividida em classes e no eixo vertical a frequência da classe correspondida.

Além disso, analisou-se a normalidade pelo Teste de Anderson-Darling e pelo programa MINITAB, que considera que um conjunto de dados é proveniente de uma determinada distribuição de probabilidade, considerando normal a distribuição que apresentar p-valor maior que 0,05, o que significaria uma probabilidade maior que

5% em cometer erro, ao rejeitar a hipótese de normalidade da distribuição em análise.

Por fim, utilizou a estatística descritiva para a análise de médias, desvio padrão e coeficientes de variação, medianas do relatório resumido gerado pelo programa MINITAB.

3.2.9. Análise de limites por gráficos de Shewhart

O gráfico de controle utilizado no experimento foi o de Shewhart, para medidas individuais, que foi gerado por meio do programa MINITAB.

A finalidade do gráfico de controle para observações individuais consiste em observar pontos fora de controle. Estes são aqueles que estão fora dos limites e também avaliar a ocorrência de configurações indesejáveis como tendências, pontos muito próximos dos limites ou da linha média.

O LCS (Limite Central Superior) e o LIC (Limite Inferior Central) foram estatisticamente determinados pela amplitude média das amostras, visto que estão em função da variabilidade do processo, de acordo com as equações 14 e 15.

$$LCS = \bar{x} + 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (14)$$

$$LIC = \bar{x} - 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (15)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum |x_i - x_{i-1}|}{n-1} \quad (16)$$

Onde:

$\bar{x}_i$: média;

d_2 : constante, depende do número de repetições por ensaio, para $r= 1$, o valor da constante é 1,128;

$\overline{MR}$: média da amplitude;

Foram elaborados gráficos para o monitoramento dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD) no tempo (ensaio).

3.2.10. Análise de vazões médias de distribuição

Analisou-se a distribuição de vazões em $L\ h^{-1}$ por meio de mapas gerados no programa SURFER 2016 para verificar a dispersão pelos horários de coletas (9h45min, 11h, 13h30min e 15h) para as condições de céu aberto e parcialmente nublados na estação do outono e primavera. O mapa foi construído com um *grid* de 72 vazões e usado o interpolador inverso da distância.

3.2.11 Avaliação comparativa entre a eficiência do sistema de bombeamento fotovoltaico e o desempenho do sistema de irrigação por gotejamento

Com os dados da eficiência energética do sistema de bombeamento fotovoltaico e os dados do coeficiente de uniformidade de Christiansen e de distribuição foi desenvolvida uma análise para verificar o efeito da variação da energia fotovoltaica gerada no desempenho do sistema de irrigação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises dos dados meteorológicos do experimento

Os dados referentes à umidade média relativa do ar e temperatura média dos dias dos ensaios caracterizados como céu aberto, tanto para a estação do outono (ensaio 1 a 10), quanto para a estação da primavera (ensaio 11 a 20), estão apresentados na Figura 42. A representação foi disposta por cinco ensaios realizados *indoor* e cinco *outdoors*, respectivamente.

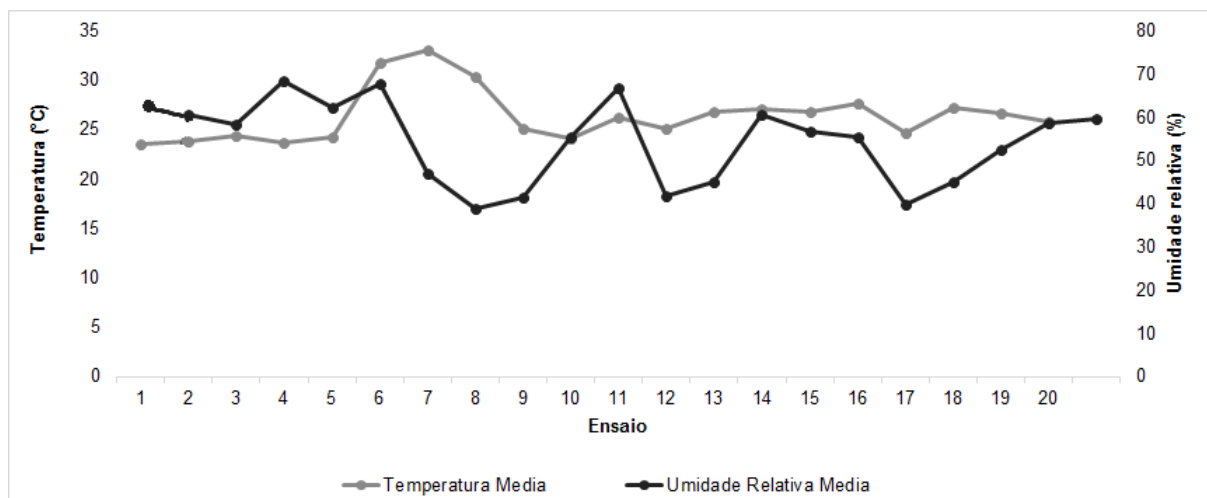


Figura 42. Temperatura média (°C) e umidade relativa média (%) dos ensaios caracterizados como céu abertos para a estação do outono (1 a 10) e primavera (11 a 20).

As médias de umidade relativa do ar para os dias de céu aberto apresentaram 39% de valor mínimo e 68,25 % como média máxima. A temperatura média dos dias de coletas variaram entre 23,65°C a 33 °C, respectivamente. As maiores oscilações de médias entre temperatura média e umidade relativa média aconteceram na estação do outono nas coletas *outdoor* dos dias 12/04/2018 a 04/05/2018.

Os dados indicativos acerca da umidade relativa do ar média e temperatura média, estão representados na Figura 43, para dias de ensaios caracterizados como parcialmente nublado realizados da forma *indoor* e *outdoor* da estação do outono e da primavera, respectivamente.

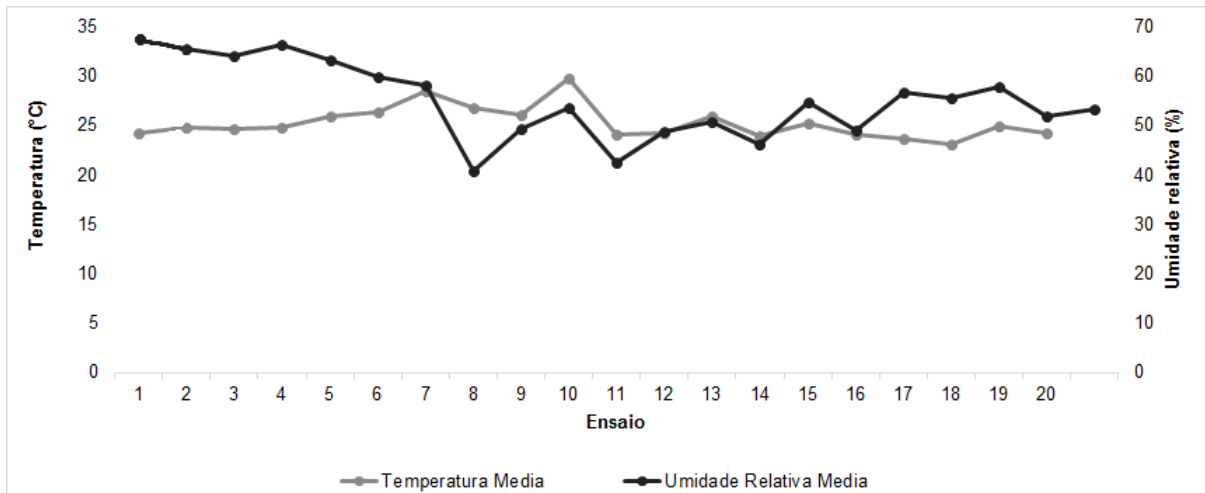


Figura 43. Temperatura média (°C) e umidade relativa média (%) dos ensaios caracterizados como parcialmente nublados para a estação do outono (1 a 10) e primavera (11 a 20).

As médias de umidade relativa do ar apresentaram valor mínimo de 40,75 % e máximo de 66,25 % e para a temperatura média de 23,15°C e 29,75 °C. As maiores médias de umidades relativas do ar e temperaturas ocorreram na estação do outono.

Os dias caracterizados como céu aberto apresentaram temperatura máxima de 38,4 °C, mínima de 24,9 °C; umidade relativa do ar máxima de 38,4 % e mínima de 45 %. Para os dias nublados, a temperatura máxima encontrada foi de 31,2 °C e mínima de 22,5°C; umidade relativa do ar máxima de 66% e mínima de 30%. As altas temperaturas, de acordo com INPE (2018), se intensificaram no ano de 2018 a partir do mês de abril, pois o Oceano Pacífico Equatorial sofreu um aquecimento nos meses de outubro, novembro e dezembro em razão do fenômeno chamado de *El Niño*. Com isso, foi possível explicar as altas temperaturas encontradas neste estudo, principalmente para a Figura 42 referente aos ensaios com condições de céu aberto.

4.2 Análises dos parâmetros do sistema solar

Os dados da variação da corrente real (A) e da tensão real (V) nas estações do ano outono e primavera estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de Tensão Real (V) e Corrente Real (A) encontradas nas estações do ano outono e primavera.

Estação do Ano	Dados	Média (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Outono	Corrente Real (A)	1,50	0,31	0,33
	Tensão Real (V)	32,15	8,12	8,55
Primavera	Corrente Real (A)	1,49	0,23	15,49
	Tensão Real (V)	36,71	6,16	16,78

Os valores de corrente média para a estação do outono foram de 1,50 A e 1,49 A para primavera, o que representa médias similares. Entretanto, a estação da primavera apresentou um maior coeficiente de variação de 16,78 %, o que representa uma maior variação de valores amostrais do que o período do outono (0,31 %). O mesmo comportamento ocorreu para a tensão do sistema solar fotovoltaico, que apresentou maior média para a estação da primavera com 36,71 V com uma variação de 16,78 %, enquanto a estação do outono atingiu a média de 32,15 V a um coeficiente de variação de 8,55 %.

4.2.1 Irradiação solar

Ao verificar os valores de irradiação média, como apresentado na Tabela 10, nota-se que as médias de coeficiente de variações para a estação do outono foram de 24,46 % com 992,88 Whm⁻² e para o período da primavera de 921,07 Whm⁻² com 14,39%. Percebe-se que a estação do outono apresentou maior média geral, porém a amostra apresenta dados menos homogêneos que a estação da primavera.

Tabela 10. Valores de irradiação encontrados nas estações do ano outono e primavera.

Estação do Ano	Dados	Média (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Outono	Irradiação (Whm ⁻²)	992,88	242,87	24,46
Primavera	Irradiação (Whm ⁻²)	921,07	132,51	14,39

4.3 Avaliação do coeficiente de uniformidade para o sistema de irrigação por gotejamento em condições *indoor* e *outdoor* nas estações outono e primavera

4.3.1 Análises da uniformidade do sistema indoor de irrigação por gotejamento e da eficiência do sistema solar fotovoltaico na estação do outono por gráficos de controle

Uma análise descritiva foi realizada com todos os ensaios do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento, independentemente das condições de céu, o que totaliza 40 dados na estação do outono.

Na Tabela 11 são apresentados os cálculos de média, coeficiente de variação, pressão 1 (entrada do reservatório), pressão 2 (entrada do sistema de irrigação), pressão 3 (saída do sistema de irrigação), eficiência do sistema solar fotovoltaico e irradiação em função do CUC e CUD.

Tabela 11. Análise descritiva das variáveis CUC, CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação do sistema *indoor* por gotejamento na estação do Outono.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUC (%)	CUD (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência solar (%)	Irradiação (Whm ⁻²)
Mínimo aceitável	70,00	62,00	*	*	*	*	*
Máximo	98,18	97,13	2,21	2,63	3,00	4,08	1068,17
Mínimo	74,22	52,78	2,20	2,30	2,50	4,11	743,90
Média	89,08	80,21	2,24	2,82	3,17	3,74	869,47
Desvio Padrão	6,02	11,49	0,68	0,80	0,58	1,07	190,39
C. Variação	6,75	14,32	30,41	28,51	18,28	28,56	21,90

Pelos valores de desvio padrão (Tabela 11), pode-se observar que ocorreu dispersão dos dados em algumas variáveis. O coeficiente de variação (CV), que varia de um mínimo de 6,75 % ao máximo de 30,41%. Dessa forma, o coeficiente de variação dos parâmetros estudados variou de baixo para médio. Frigo (2014) encontrou, ao estudar o controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão, pequenos valores de coeficientes de variação para CUC e CUD e para as variáveis externas grandes variações.

O momento em que o CUC foi máximo de 98,18 % e CUD 97,13% ocorreu no horário das 13h30min em um dia de céu aberto. Percebeu-se que a pressão final do sistema de irrigação foi maior de 3,0 bar do que no CUC mínimo encontrado de 2,50 bar. Ainda o comportamento da pressão teve o mesmo comportamento para os CUC e CUD máximo, mínimo e médio, sendo menor na saída do reservatório e variando sucessivamente até o final do sistema de irrigação. Os valores mínimos de CUC e CUD foram 74,22 % e 52,78%, respectivamente, para as 9h45min nas condições de céu parcialmente nublado.

Os dados de eficiência do sistema solar fotovoltaica médio para os 40 ensaios apresentaram valores próximos quando o CUC e CUD eram mínimo e máximo de 4,08 % e 4,11%, respectivamente.

O gráfico de controle para os parâmetros de uniformidade CUC e CUD estão representados na Figura 45. Apesar do coeficiente de variação encontrado na Tabela 12, referente às pressões do sistema terem sido de 30,41 %, 28,51 % e 18, 21 %, respectivamente, foram identificadas médias gerais de 89,09 % para CUC e 80,21 % para CUD. Da Silva, Chaves, Da Silva Filho (2015) concluíram, ao avaliar sistemas de irrigação por gotejamento com duas linhas laterais, que os gotejadores autocompensantes influenciaram em uma menor variabilidade de aplicação de água.

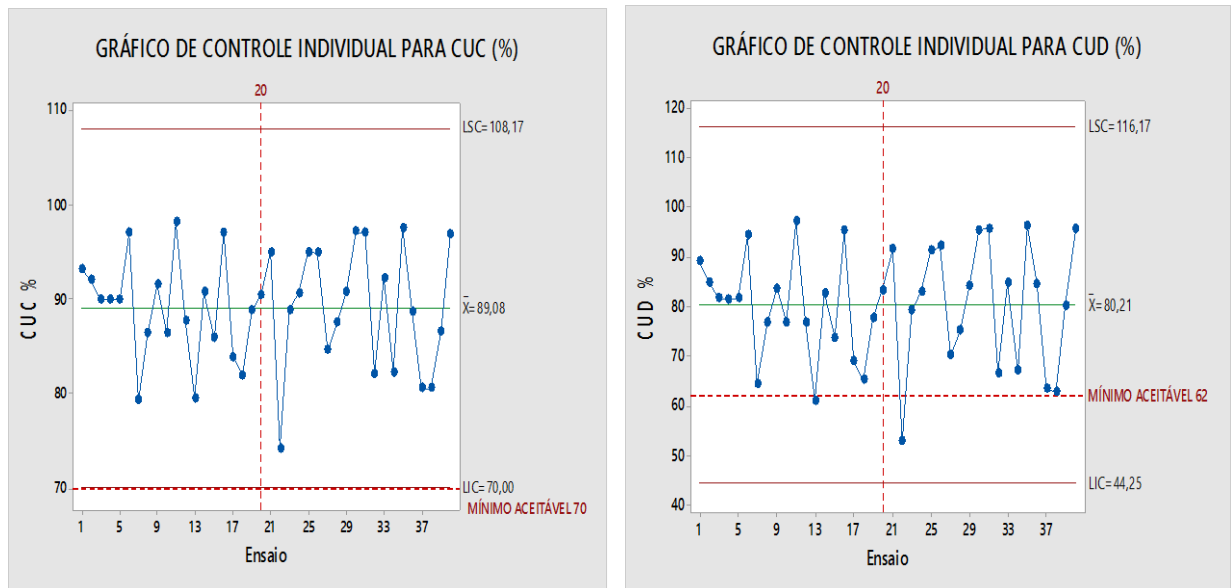


Figura 44. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublado (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na estação do Outono.

Analisando os gráficos de controle verifica-se que todos os valores de ensaios realizados na estação do outono, respectivos a dias de céu aberto e parcialmente nublados, estão dentro dos limites de controle. Os valores de CUC estão dentro da classificação aceitável a excelente (Figura 44).

Examinando a Figura 44 pelas condições de céu aberto, nota-se que uma grande variação em torno da média do limite central LIC tanto para CUC e CUD, quanto para os dias de céu aberto e parcialmente nublado. Diferentemente de Zago (2016), que trabalhou com um sistema *indoor* por gotejamento com bombeamento fotovoltaico policristalino, que não apresentou grandes variações em torno da média no gráfico de Shewhart para dias nublados, parcialmente nublados e de sol.

Os coeficientes de uniformidade de distribuição também apresentaram controle em todos os ensaios do sistema indoor de irrigação por gotejamento. Quando analisado a tabela ASABE (1996) de classificação dois pontos ficaram fora do mínimo aceitável com 61,02 % (ensaio 13) e 52,78 % (ensaio 22). O primeiro aconteceu às 13h30min nas condições de céu aberto e a uma eficiência de sistema solar fotovoltaica de 4,27 % e o segundo às 9h45min de um dia parcialmente nublado, como já citado anteriormente.

Os gráficos de controle para a eficiência do sistema solar fotovoltaica (%) e vazão média (Lh^{-1}) estão na Figura 45.

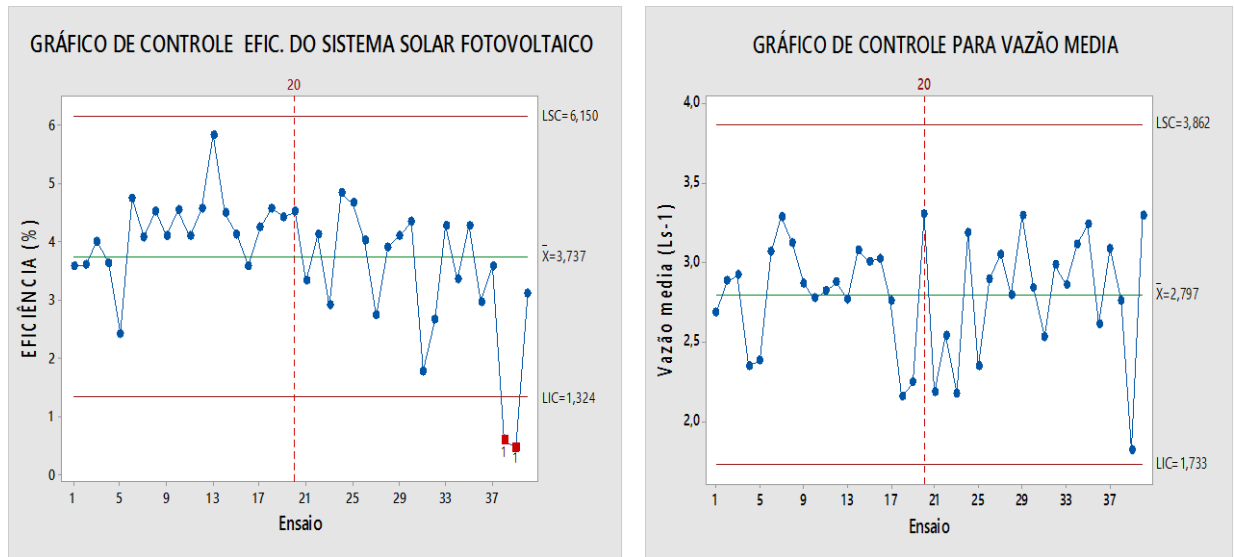


Figura 45. Gráficos de controles individuais para a eficiência do sistema solar fotovoltaica (%) e vazão média (L h⁻¹) para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublado (21 ao 40) do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento montado na estação do outono.

O gráfico da eficiência solar fotovoltaica apresentou dois pontos aleatórios amostrais: ensaio 38 com 0,57 % e ensaio 39 com 0,74%, ambos encontrados no horário das 15h em condição de céu parcialmente nublado. Nota-se que o ensaio 38 para vazão média de 1,81 L h⁻¹ possui uma tendência de estar fora de controle por estar próximo da linha central.

As coletas em dias de céu aberto, Figura 46 (a), apresentaram um p-valor de 0,637, de acordo com o teste de Anderson Darling, a média de 89 % e uma variância de 29 %. Os dias parcialmente nublados apresentaram um p-valor de 0,280 com a média de 89,17 % para CUC e variância de 45,90 %. Demonstrando uma maior normalidade nos dias de céu aberto, com o intervalo de confiança a 95 % de 91,49 % e 86,51 % para CUC (Figura 46 b).

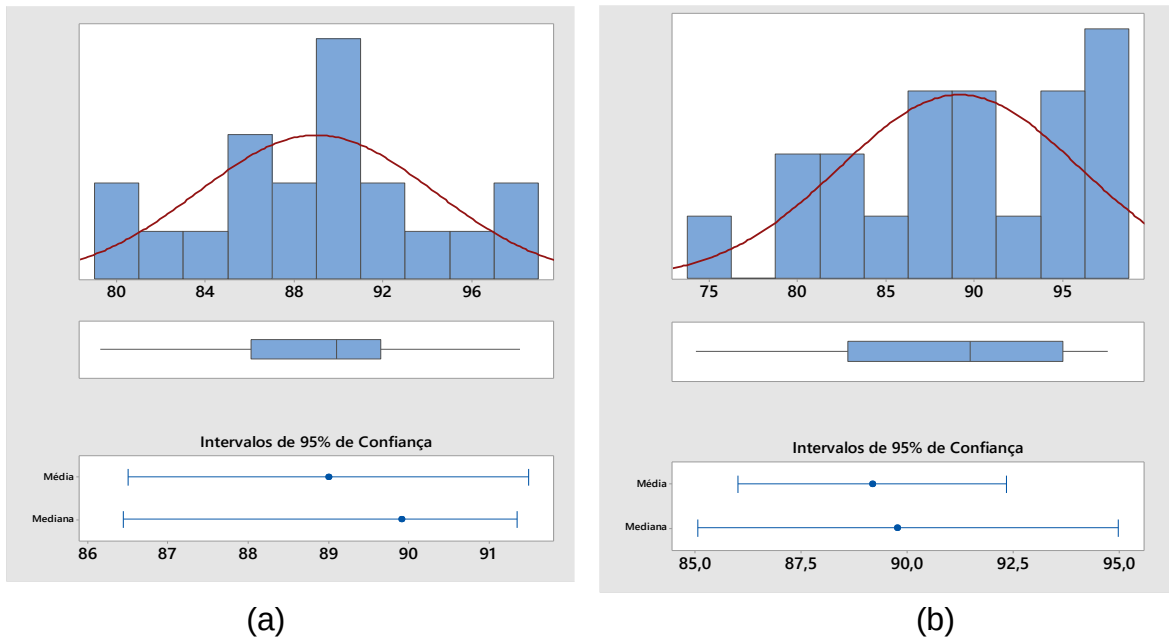


Figura 46. Histograma do CUC do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

O P-valor para a uniformidade de CUD nos dias de céu aberto foi de 0,505 para 0,159 nos dias parcialmente nublados (Figura 47). Com as médias respectivas de 79, 82 % e 80,59 %, com as seguintes variâncias de 99,68 e 170,82. Assim, existe uma maior dispersão e instabilidade dos dados em torno da média nos dias de coletas parcialmente nublados.

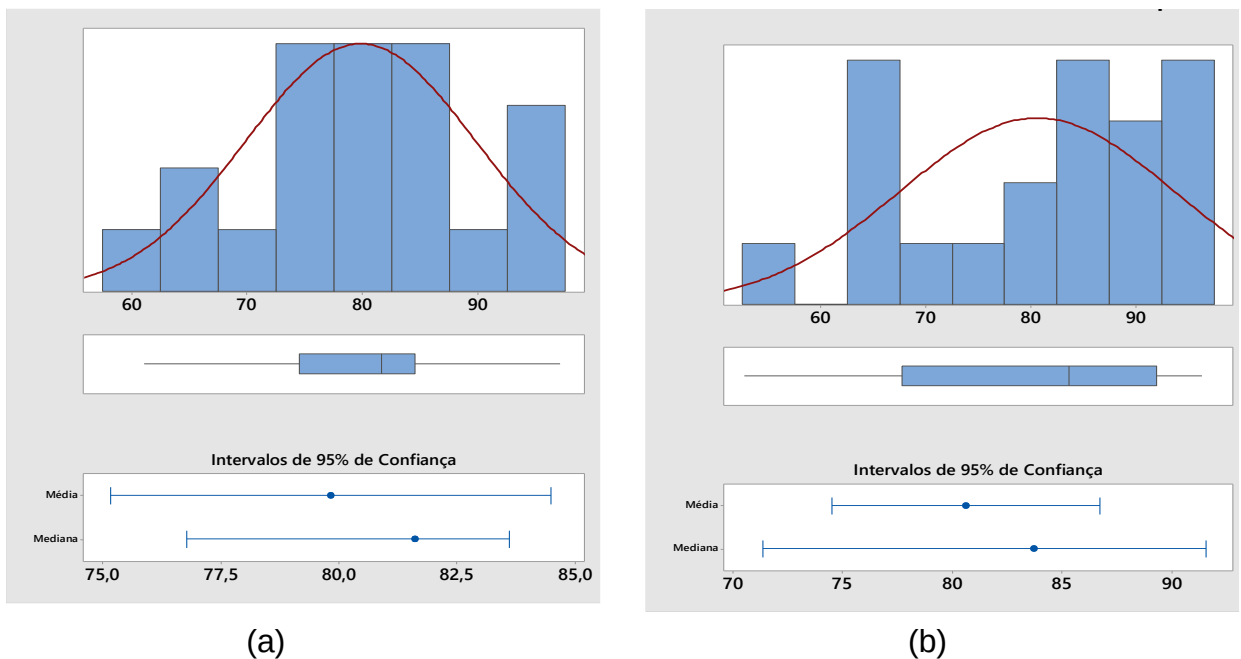


Figura 47. Histograma do CUD do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado no Outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublado.

A distribuição de vazões do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento para os dias de céu aberto para os 4 horários do estudo na estação do Outono (Figura 48).

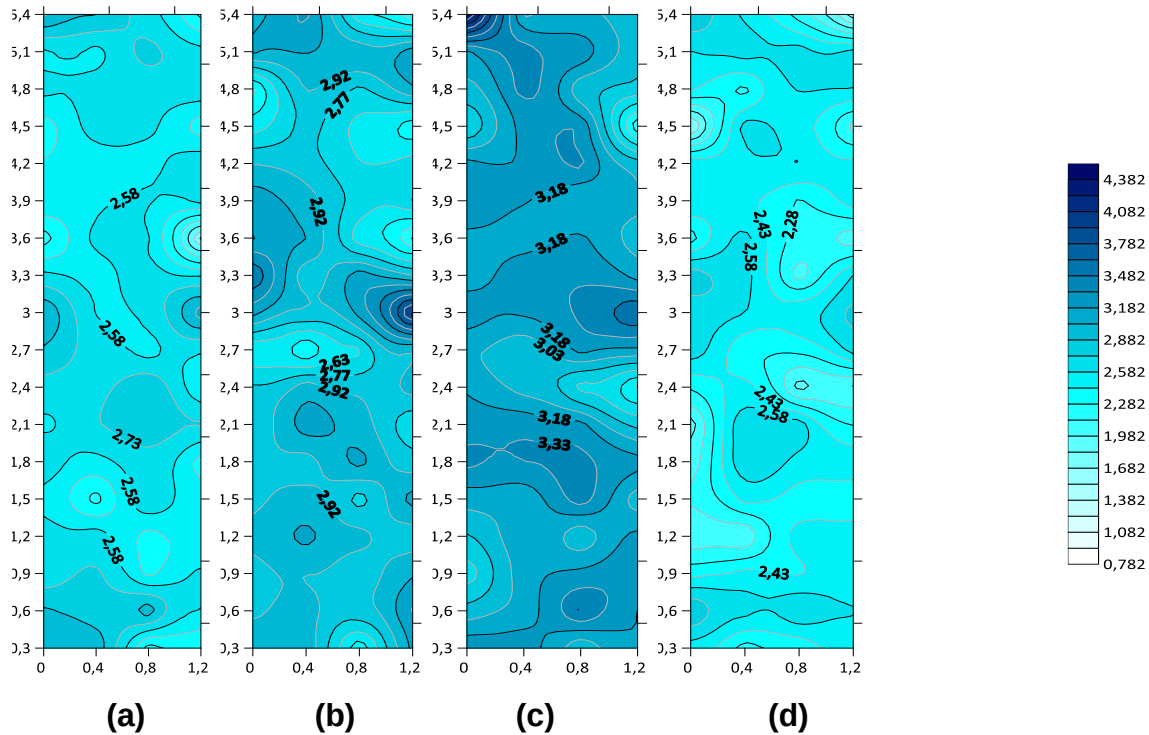


Figura 48. Distribuição média das vazões encontradas no sistema *indoor* de irrigação por gotejamento para os dias caracterizados como céu aberto, no outono, para os horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

As distribuições de vazões (Lh^{-1}) foram superiores no período das 13h30min com o valor superior de 4,452 para o primeiro gotejador da primeira linha lateral e vazão médias de 2,959 Lh^{-1} . O horário das 9h45min e das 15h (c) obtiveram menores valores médios para cada coletor com o mínimo encontrado de 1,651 e 1,567 Lh^{-1} , respectivamente. Dessa maneira, nota-se uma maior homogeneidade de vazões independente do horário coletado.

Nos dias de coletas com céu parcialmente nublado (Figura 49) verifica-se que os dados amostrais para os 4 horários coletados obtiveram maior oscilação entre os valores de vazão média máxima e mínima. Tanto que o primeiro horário da manhã atingiu a maior média de 3,278 Lh^{-1} e também a menor de 1,682 Lh^{-1} .

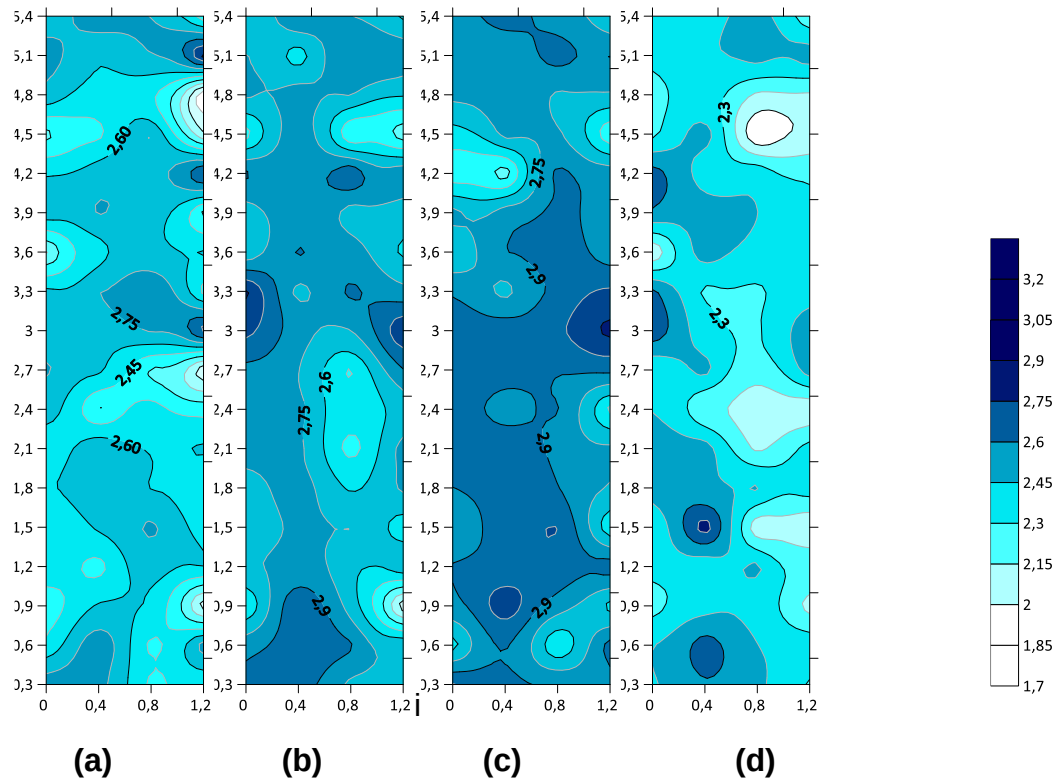


Figura 49. Distribuição médias das vazões encontradas no sistema *indoor* de irrigação por gotejamento para os dias caracterizados como parcialmente nublados, no outono, para os horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

As médias gerais entre todos coletores às 9h45min foi de $2,578 \text{ Lh}^{-1}$; $2,742 \text{ Lh}^{-1}$ para o segundo; $2,839 \text{ Lh}^{-1}$ para o terceiro e $2,364 \text{ Lh}^{-1}$ para o quarto horário. Isso demonstra um comportamento similar a distribuição de dias de céu aberto, pois os horários do extremo (9h45min e 15h) também apresentaram a menor distribuição de vazões médias.

Nota-se valores menores que $1,7 \text{ Lh}^{-1}$ para o último horário do dia, representado pela coloração branca (Figura 49 d), significando uma menor vazão de distribuição para o ponto do gotejador.

Em relação às vazões das Figura 48 e Figura 49, é perceptível que os dias de céu aberto tenderam a ter uma distribuição mais homogênea do que a encontrada em condições de céu parcialmente nublado. Correlacionando com uma maior normalidade dos dados de CUC e CUD nos dias de céu aberto (Figura 46).

Dessa maneira, Klein et al. (2013) ao estudar a uniformidade de irrigação e fertigação por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas, conclui que os mapas gerados no programa Surfer facilitaram a visualização da distribuição da vazão e apontaram as áreas susceptíveis a problemas no sistema, que em seu estudo foi

para cargas de 15 kPa tanto na irrigação, quanto na fertigação. Assim, os dias parcialmente nublados solicitam maior atenção no sistema *indoor* de irrigação por gotejamento na estação do Outono.

4.3.2 Análise da uniformidade do sistema indoor de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação da primavera por gráfico de controles

Os cálculos de média, coeficiente de variação, pressão 1 (entrada do reservatório), pressão 2 (entrada do sistema de irrigação), pressão 3 (saída do sistema de irrigação), eficiência do sistema solar fotovoltaico e irradiação em função do CUC e CUD estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Análise descritiva das variáveis CUC, CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação do sistema *indoor* por gotejamento na estação da primavera.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUC (%)	CUD (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência a solar (%)	Irradiação (Whm ⁻²)
Mínimo							
aceitável	70,00	62,00	*	*	*	*	*
Máximo	92,79	84,48	2	1,95	2,5	4,05	1065,26
Mínimo	68,86	47,65	1	1,2	1,5	2,65	628,37
Média	84,71	70,75	1,82	1,97	2,44	1,94	911,83
Desvio							
Padrão	5,07	8,73	0,49	0,58	0,68	0,75	128,02
C. Variação	5,98	12,33	27,13	29,61	28,01	20,22	14,04

Assim como no sistema de irrigação *indoor* por gotejamento coletado no outono, o sistema de irrigação *indoor* por gotejamento montado na primavera apresentou variação entre coeficientes de variação de 5,98 % a 29,61 %.

O comportamento da pressão média do sistema de irrigação *indoor* do período do outono foi semelhante ao da primavera, visto que a pressão final do sistema foi maior, consequentemente. Zocoler et al. (2015) ao estudarem o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina, concluíram que o comportamento da pressão aumenta ao longo do sistema,

proporcionalmente a vazão média, o que não se encontrou uma alta regressão neste estudo.

O máximo valor de CUC da amostra foi de 92,79 % e 84,48% para CUD, quando a eficiência solar fotovoltaica era de 4,05 % no horário das 13h30min nas condições de céu aberto. O mínimo encontrado de uniformidade para CUC e CUD foi de 68,86 % e 47,65%, respectivamente, no momento em que a eficiência do sistema solar fotovoltaica era de 2,65 % e irradiação de 628,37 Whm⁻².

Para melhor análise descritiva, foram testados um total de 40 ensaios, com 20 ensaios com condições céu aberto e 20 ensaios a parcialmente nublado, respectivamente (Figura 50).

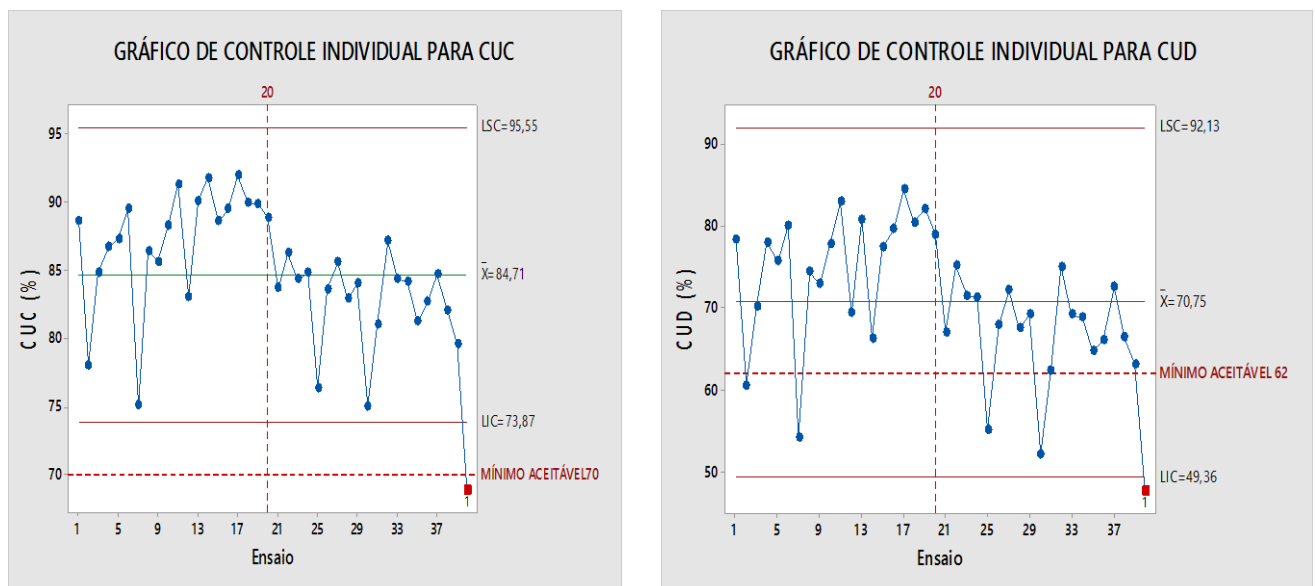


Figura 50. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na estação na primavera.

Os gráficos de controle (Figura 50) demonstram que os dados de uniformidade do sistema de irrigação *indoor* por gotejamento na primavera tanto para CUC e CUD apresentam controle, exceto para o ensaio 40 com valores de 68,86 % e 47,65 % no dia parcialmente nublado ao último horário do dia. Além disso, estes pontos apresentam uniformidade considerada como classificação ruim (CUC) e inaceitável (CUD) para sistema de gotejamento conforme ASABE (1996).

As médias gerais encontradas para CUC e CUD, Figura 50, foram de 84, % e 70, 75 %. Os coeficientes de uniformidade analisados durante a primavera apresentaram uma redução de valores médios, principalmente em dias parcialmente

nublados. Esta diminuição é perceptível quando analisamos as uniformidades encontradas no outono (Figura 44).

O coeficiente de uniformidade de distribuição apresentou também os ensaios 25, 30 e 31 com a mesma classificação de ruim, sendo que as porcentagens foram de 55,07 %, 52,09% e 62,39 %, respectivamente para os dias parcialmente nublados. Para as condições de céu aberto, os ensaios 2 e 7 também apresentaram a mesma classificação com 60,49 % e 54,20 %. Os valores citados são todos classificados como ruins para ASABE (1996), que podem ser comparados com o valor encontrado por Brito, Fonseca e Santos (2016), em um sistema de irrigação por aspersão para o abacaxi com 75% de evapotranspiração.

A Figura 51 representa o gráfico de controle para a eficiência do sistema solar fotovoltaica e a vazão média. Aponta-se que os ensaios para estes parâmetros estiveram dentro dos limites estabelecidos para Shewhart.

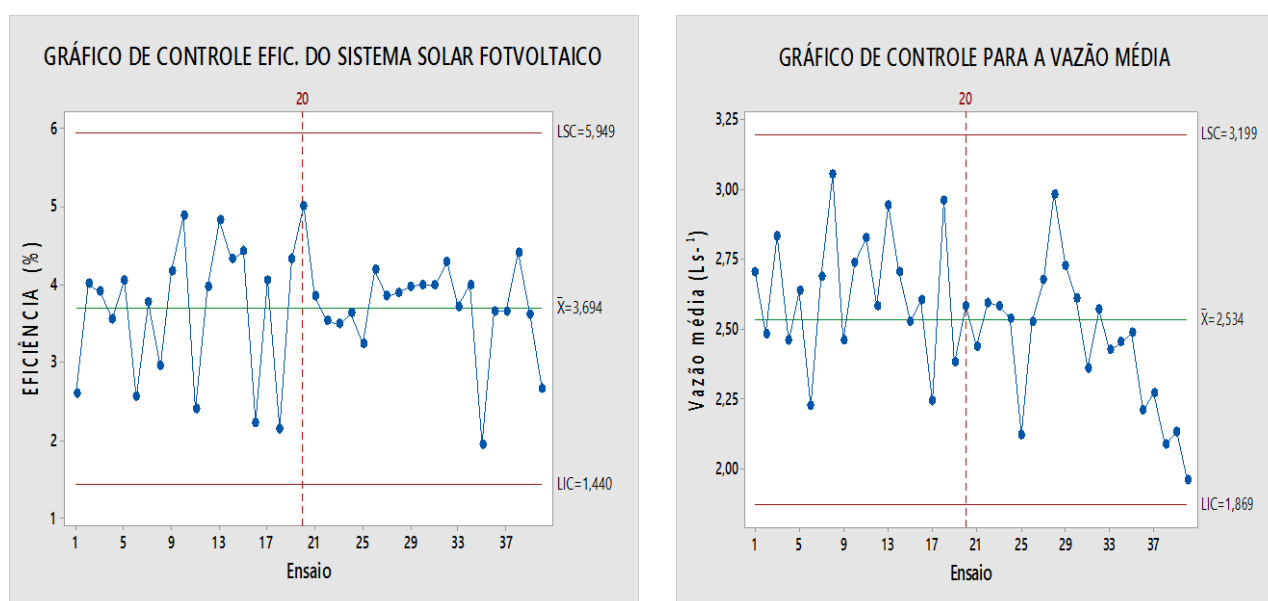


Figura 51. Gráficos de controles individuais para a eficiência do sistema solar fotovoltaico (%) e vazão média Lh^{-1} para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema de irrigação indoor por gotejamento montado na primavera.

A vazão média foi de 2, 53 $L h^{-1}$ e foram decrescentes nos dias parcialmente nublados, atingindo 1,96 $L h^{-1}$ no ensaio 40 no último horário de coleta. Da Silva et al. (2014) ao utilizarem gráficos de controle estatístico na irrigação encontraram para pressões de 2,0 bar também encontram vazões plotadas dentro dos limites do gráfico de controle.

A eficiência do sistema solar fotovoltaica foi de 3,69 % para todo o processo (Figura 51). Ainda apresentou valores com o comportamento constante para os dias parcialmente nublados com média de 3,71 % e com um coeficiente de variação de 15,23 %, para 24,57 % nos dias de céu aberto com a eficiência solar fotovoltaica de 3,68 %. As médias da eficiência solar fotovoltaica pelas condições de céu foram parecidas, porém apresentando diferentes valores de vazões ($L\ h^{-1}$).

Os histogramas para os valores de CUC e CUD, estão representados nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

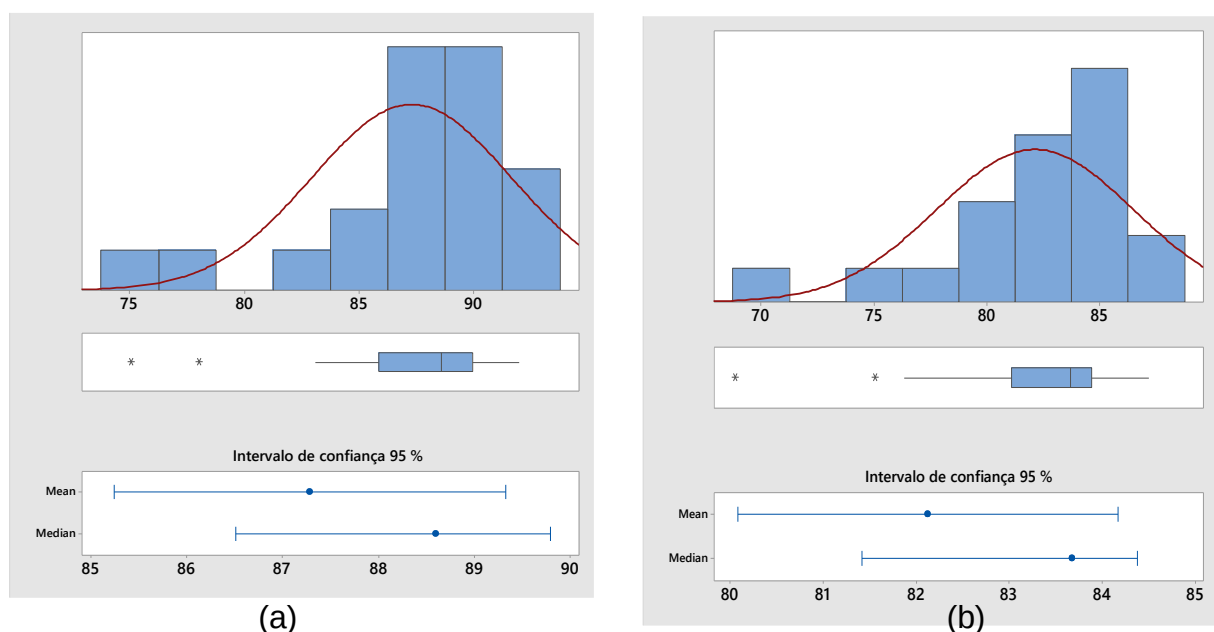


Figura 52. Histograma do CUC do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

Os valores de CUC, tanto para dias de céu aberto, quanto dias de céu nublado indicaram um p-valor $<0,005$, com valores de A-Quadrado de 1,18 e 1,33, respectivamente. Com efeito, as duas amostras não possuem normalidade com dois pontos *outliers*, representados na Figura 52 pelos asteriscos. Os dias de céu aberto foram de 87,29 % com uma variância de 18,94, já nos dias parcialmente nublados a média foi de 82,126 % com variância de 18,96.

O coeficiente de uniformidade de distribuição apresentou o mesmo comportamento de não normalidade com um p-valor de 0,011 para os dias de céu aberto e 0,017 para as coletas realizadas nos dias parcialmente nublados. As médias foram 75,26 % (céu aberto), com a variância de 60,33; e 66,24 % (parcialmente nublados) para uma variância de 53,20 (Figura 53).

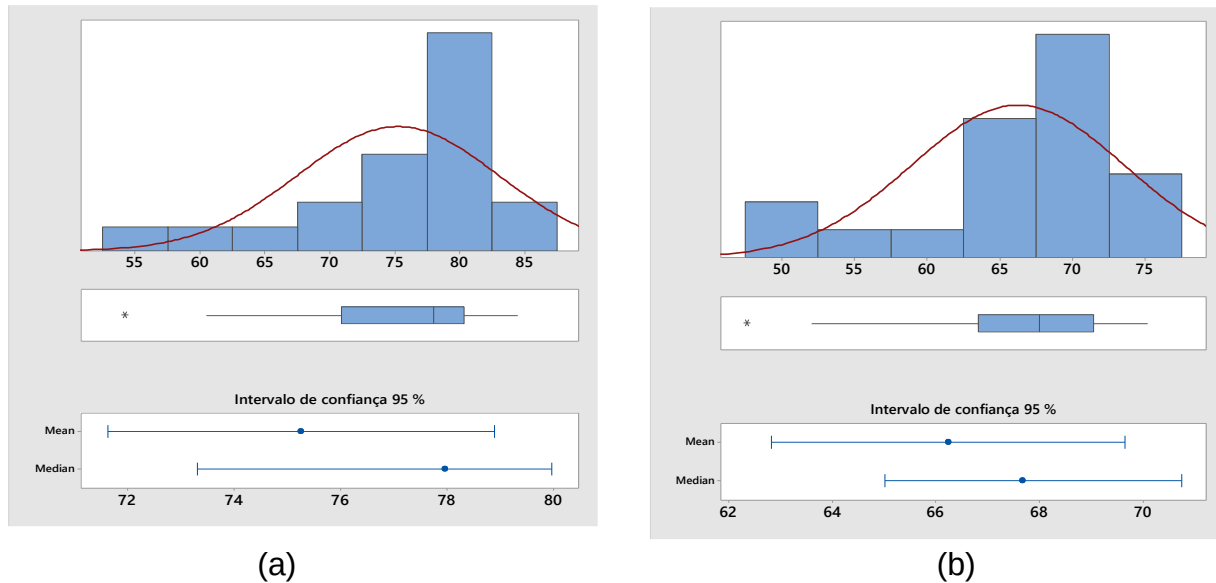


Figura 53. Histograma do CUD do sistema indoor de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

A distribuição média das vazões nos dias de céu aberto do sistema de irrigação *indoor* por gotejamento na estação da primavera estão representadas na Figura 54. O comportamento das distribuições médias das vazões do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento na estação da primavera obteve uma maior oscilação do que as médias do outono, isto é perceptível pela variação percebida pelas tonalidades de azul.

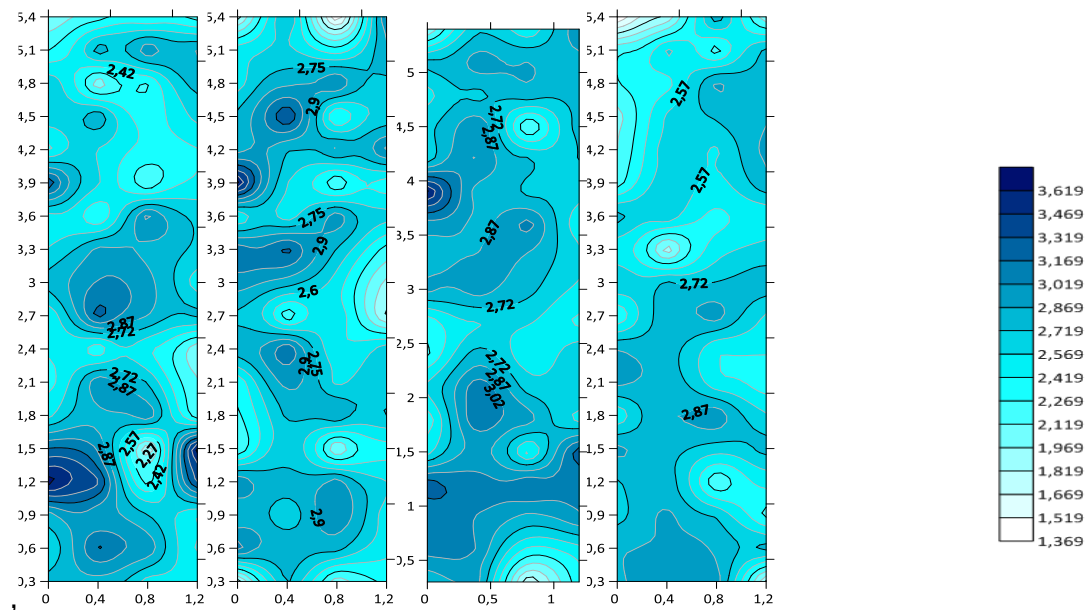


Figura 54. Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação *indoor* por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como céu aberto para os horários: (a) 9h45min; (b) 11h; (c) 13h:30min e (d) 15h.

A maior vazão média encontrada foi de $3,696 \text{ Lh}^{-1}$ para o segundo horário do dia e $3,695 \text{ Lh}^{-1}$ para o primeiro horário do dia. A menor média das vazões foi de $1,369 \text{ Lh}^{-1}$ para o último horário do dia, momento em que a vazão média máxima encontrada foi de $3,017 \text{ Lh}^{-1}$.

A variação entre as vazões das médias da posição de cada gotejador para os dias parcialmente nublados está representado na Figura 55. O maior valor encontrado do sistema *indoor* por gotejamento da estação da primavera ocorreu no terceiro horário com $3,499 \text{ Lh}^{-1}$, momento que também apresentou a menor vazão média de $0,375 \text{ Lh}^{-1}$. Todos os horários apresentaram comportamento similar. No primeiro horário a máxima encontrada foi de $3,491 \text{ Lh}^{-1}$ e mínima de $0,750 \text{ Lh}^{-1}$.

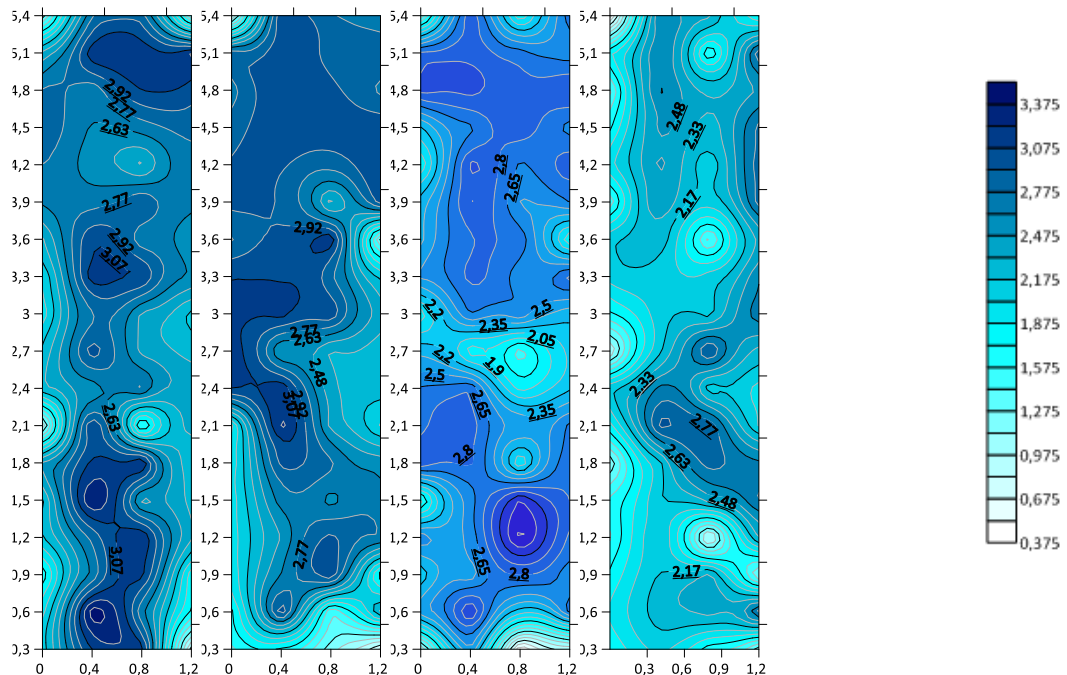


Figura 55. Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação *indoor* por gotejamento na primavera para os dias caracterizados como parcialmente nublados para os horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

4.3.3 Análises das metodologias de coletas para o sistema *indoor* por gotejamento

Os valores de CUC (%) estão apresentados na Figura 56, para as diferentes metodologias de Keller e Karmeli (1975), Denículi et al. (1980) e Total para a

estação do outono, representado pelos ensaios 1 a 40, e no período da primavera, ensaios do número 41 a 80.

A média geral para a metodologia de Keller e Karmeli (1975) para os valores de CUC foi de 82,95 %. No período do outono, o valor de CUC médio foi de 89,03 % com uma irradiação média de 869,47 Wm^{-2} . Para os dias de céu aberto (ensaio 1 ao 20), foi de 87,98 % atingindo uma irradiação média de 910,35 Wm^{-2} e nas condições de céu parcialmente nublado encontrou-se uma média de 90,08 % com a irradiação de 828,59 Wm^{-2} . Além disso, a tendência da irradiação foi inversa aos valores de CUC. Ainda todos os valores de CUC ficaram dentro do estabelecido pela norma com percentuais maiores de 70 %.

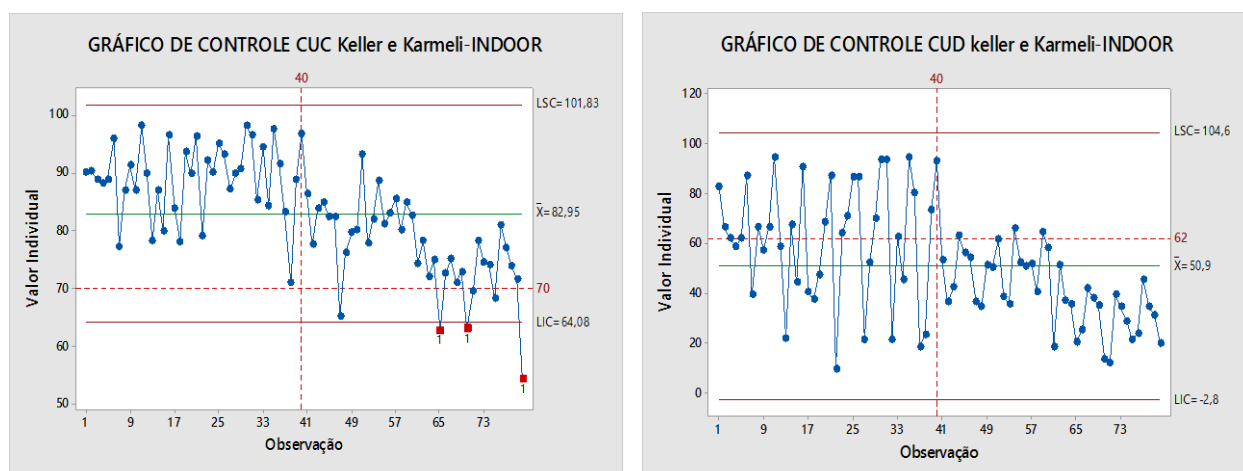


Figura 56. Variação de CUC e CUD (%) do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975) referente ao outono (1-40) e primavera (41-80).

Quando se analisa a parcela dos ensaios 40 ao 80, relacionada com a primavera (Figura 56), percebe-se a sinalização de três fora da linha inferior de controle para as coletas 65, 70 e 80, que também estão abaixo do mínimo aceitável pela classificação assim como os pontos 46, 71 e 74.

A média geral para estação da primavera de CUC foi de 78,47% para uma irradiação média geral de 886,49 Wm^{-2} . Quando analisado a parcela de dias de céu aberto a média para CUC foi de 84,13 % com a irradiação média de 973,15 Wm^{-2} . Para a condição de céu parcialmente nublado, o percentual médio para CUC foi de 76,95 % com uma irradiação de 799,83 Wm^{-2} .

Para a metodologia de CUD, a média geral para o sistema *indoor* de irrigação por gotejamento foi de 50,9 %. Todos os ensaios ficaram dentro do controle

estabelecido por Shewhart, porém a maioria da amostra ficou bem abaixo do estabelecido pela classificação de 62 %, tanto que a média geral foi de 61,75% para o outono e 38,75 % para a primavera. Dessa forma, a primavera apresentou dados com valores muito inferiores aos do outono e este decréscimo pode ser visto na Figura 59.

Na estação do outono os de ensaios na condição de céu aberto (1 a 20), Figura 59, a média para CUD foi de 61,07 %, para 62,43 % quando parcialmente nublado (21 a 40). A primavera apresentou novamente valores inferiores ao outono e o comportamento para dias de céu aberto com maior média (48,10 %) do que parcialmente nublado (30,32 %).

Para a metodologia de Denícúli et al. (1980), a média geral do CUC para o sistema *indoor* de irrigação foi de 84, 93 %, como exposto pela linha média da Figura 57. A estação do outono apresentou como média geral de CUC o valor de 89,25 %, com uma irradiação de 869,47 Wm⁻². Nos dias de céu aberto a média para CUC foi de 89,05 % para uma irradiação média de 910,35 Wm⁻². Já em dias nublados, o percentual foi de 89,45 % com uma irradiação média de 828,58 Wm⁻².

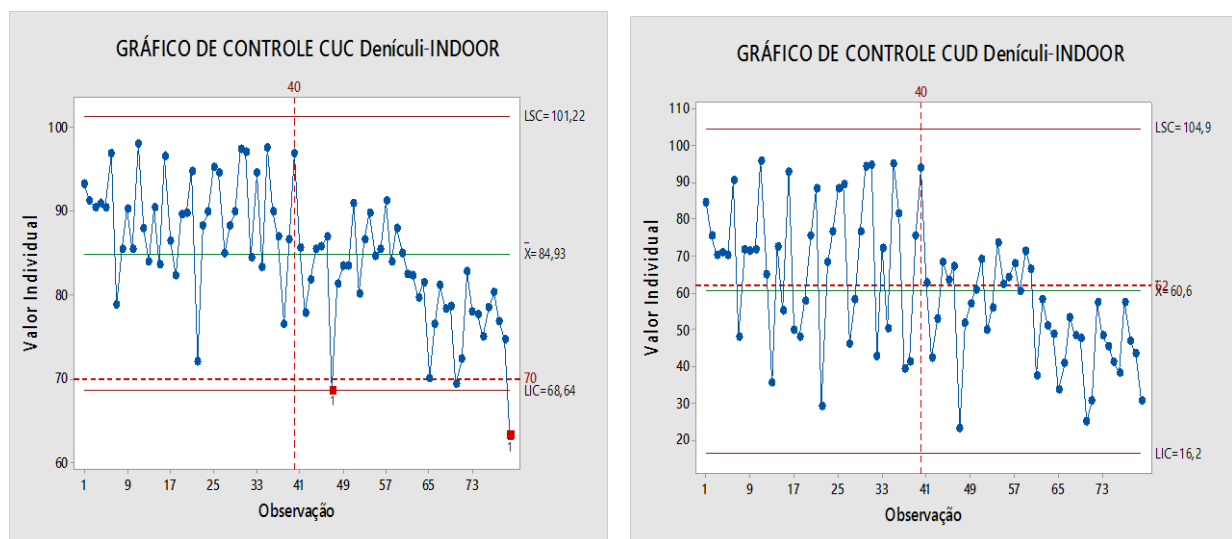


Figura 57. Variação de CUC e CUD (%) do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento conforme a metodologia de Denícúli et al. (1980) referente à estação do outono (1-40) e primavera (41-80).

Para o método de Denícúli et al. (1980), o valor de CUC geral foi de 78, 47 % e, com dois pontos fora de controle (ensaio 48 e 80), que também estão abaixo da linha de aceitável de classificação da irrigação por gotejamento. Nota-se, ainda, dois pontos muito próximos desta classificação que são os ensaios 65 e 70.

Os valores de CUD para o método Denículi et al. (1980) apresentaram (Figura 57), assim como o método de Keller e Karmeli (1975), todos os valores dentro do controle estabelecido pelos limites inferiores e superiores. No entanto, a média geral para o sistema *indoor* por gotejamento foi maior com 60,6 % para o limite central e ainda o limite inferior foi de -2,8 para o valor de 16,2 no gráfico de Shewhart.

A estação da primavera evidenciou valores para CUD na maioria da amostra inferiores ao estabelecido de 62 % apresentando uma média geral de 50,24 % apenas. Nas condições de céu aberto uma média de 58,27 % e parcialmente nublado de 44,08 %. A média geral para o outono foi de 69,36 %, com a média de 68,65 % para os dias de céu aberto e 70,06 % para dias de parcialmente nublados.

O gráfico de controle para 80 ensaios, para a metodologia CUC Total, do sistema *indoor* está representado na Figura 58. A média geral total para este método foi de 86,89 %. A estação do outono (1 a 40) evidenciou a média geral de 80,21 %, com a média para dias de céu aberto de 79,82 % e dias parcialmente nublados de 80,60%. Para estação da primavera, a média geral foi de 68,79 %, com os dados de céu aberto com a média de 74,69 % e parcialmente nublados de 66,24 %.

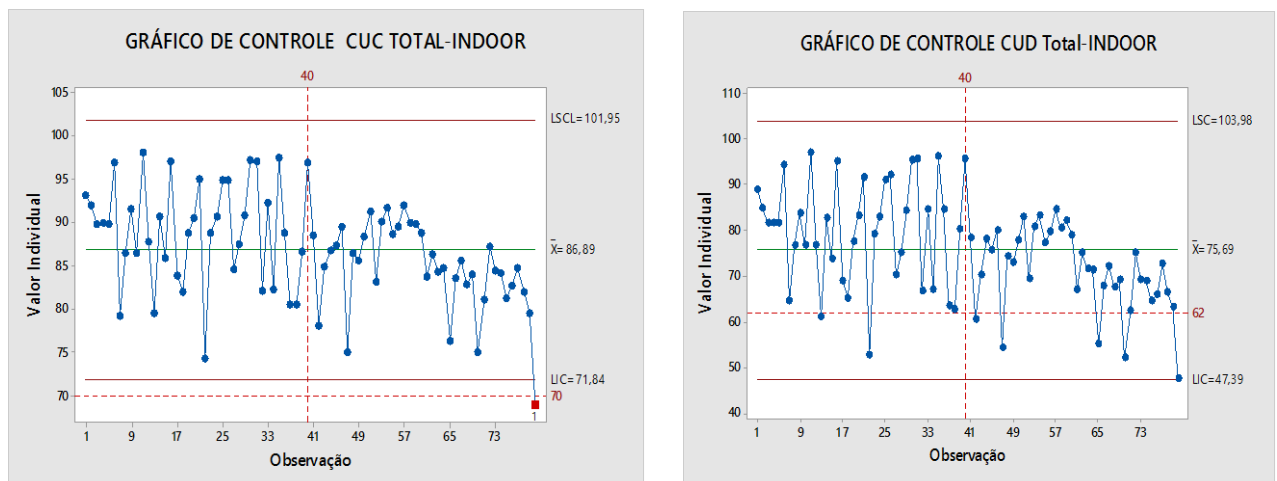


Figura 58. Variação de CUC e CUD (%) do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento conforme a metodologia Total referente ao outono (1-40) e primavera (41-80).

Os valores do CUD Total para a vazão de todos emissores estão representados na Figura 58. Nota-se que a média geral foi superior a todos os métodos com 75,69 %. Além disso, todos os pontos ficaram dentro de controle individual por Shewhart e ainda ocorreu um maior número de ensaios acima do valor estabelecido pela norma de 62 %.

A média geral para a estação do outono foi de 80,21 % e da primavera de 68,79 %. Para a primeira estação, os dias de céu aberto apresentaram média de 79,82 % e, por conseguinte, para os dias nublados de 80, 60 %. Já para a segunda estação estudada, o valor de médio para os dias de céu aberto foi de 74, 69 % e 66,21 % para dias parcialmente nublados.

Em todos os estudos para o CUC do sistema *indoor* por gotejamento, independentemente da metodologia utilizada, apresentou valores maiores para os dados coletados na estação do outono. Percebe-se ainda que nesta estação os valores de CUC para a condição de céu aberto foi superior do que os dias parcialmente nublados. Já para estação da primavera houve uma inversão deste comportamento. A irradiação se comportou com valores maiores nos dias de céu aberto do que parcialmente nublados nas duas estações estudadas, demonstrando assim uma influência direta nos dados da uniformidade.

Segundo Vieira, Mantovani e Cordeiro (2003), apesar do CUD ser mais utilizado para trabalhos que caracterizam a desuniformidade, o CUC é ainda o coeficiente mais conhecido pelos técnicos e produtores em geral. De acordo com Mantovani (2000), isso se deve aos valores de CUC terem maior estabilidade em função de ser menos afetados pelas condições extremas, sendo este um dos motivos pelo qual é mais utilizado para definição da eficiência de irrigação na estimativa da lâmina bruta de irrigação. Dessa maneira, este trabalho também obteve resultados similares quando a oscilação de valores para CUC foi menor quando comparado com o CUD para todos os tipos de metodologia citada.

De maneira geral, a irradiação também não influenciou efetivamente nos valores de CUC e CUD. Além disso, as maiores médias estiveram para CUC Total e sucessivamente Denículi et al. (1980) e Keller e Karmeli (1975); assim como para o valor de CUD, este que foi mais sensível a variação de metodologias aplicadas.

Hauptenthal et al. (2018) ao trabalhar com um sistema de irrigação *indoor* por gotejamento alimentado por um conjunto motobomba fotovoltaico apresentaram resultados similares quando os valores de CUC não sofreram grandes alterações entre os métodos de Keller e Karmeli (1975) e Denículi et al. (1980), diferente para o parâmetro de CUD que apresentou maiores valores no método de Denículi et al. (1980).

Para o gráfico de controle, o valor de CUC obteve maior cuidado, pois os números de pontos fora da linha de controle diminuíram conforme a metodologia utilizada e não apresentaram nenhum valor ruim para a classificação de ASABE (1996). O valor de CUD apresentou comportamento oposto, pois esteve dentro dos parâmetros estabelecidos por Shewhart, independente da metodologia, mas a classificação do gotejamento foi influenciada pelo tipo de metodologia de coleta.

4.3.4 Análise da uniformidade do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação do outono por gráfico de controles

As análises descritivas referentes ao sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento realizadas na estação do outono estão representadas na Tabela 13 com os valores de CUC, pressão 1(saída do reservatório de água), pressão 2 (início do sistema de irrigação) e pressão 3 (final do sistema de irrigação). Na amostra, estão os 40 ensaios de coletas, sendo para céu aberto e também parcialmente nublado.

Tabela 13. Análise descritiva das variáveis CUC, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação e velocidade do vento para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do Outono.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUC (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência solar (%)	Irradiação (Whm ⁻²)	Vento (ms ⁻¹)
Mínimo aceitável	70,00	*	*	*	*	*	*
Máximo	95,24	2	2,4	3,0	3,13	1267,21	0
Mínimo	80,87	2	2,5	3,1	2,43	1068,41	1
Média	91,68	2,07	2,12	2,74	2,65	1091,30	0,92
Desvio Padrão	3,59	0,41	0,39	0,61	0,93	225,31	0,71
C. Variação	3,91	19,87	18,60	22,27	35,24	20,65	77

A média do valor de CUC foi bem acima do mínimo aceitável pela norma de classificação ASABE (1996), sendo considerada como excelente e as pressões apresentaram o mesmo comportamento do sistema *indoor* de irrigação por gotejamento, com o acréscimo de valores do início até o final do sistema.

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) apresentou, dentre a amostra total, o valor máximo de 95,24 %, no momento em que a eficiência do

sistema solar fotovoltaico era de 3,13 % e irradiação de $1267,21\text{Whm}^{-2}$ no horário das 15h em condição de céu aberto, quando não existia a presença de vento. O menor valor de CUC encontrado foi de 80,87% quando a eficiência do sistema solar fotovoltaica era de 2,43% e irradiação de $1068,41\text{Whm}^{-2}$, no quarto horário, em um dia parcialmente nublado e com ventos a 1ms^{-1} .

Os coeficientes de variação variaram a um mínimo de 3,91 % a um máximo de 77% indicando que os dados possuem variação de baixa a muito alta. Pimentel Gomes (2000) ressaltar que os coeficientes obtidos em estudos a campo podem ser considerados baixos, se inferiores a 10 %; médios de 10 a 20 %; quando variam de 20 a 30%, elevados e muito alto se superiores a 30%.

Diferentemente do sistema *indoor* de irrigação, o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento no outono apresentou valores não simultâneos de máximos e mínimos. Dessa maneira, os valores de CUD estão representados na Tabela 14.

Tabela 14. Análise descritiva das variáveis CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica e irradiação para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do Outono.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUD (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência solar (%)	Irradiação (Whm^{-2})	Vento (ms^{-1})
Mínimo aceitável	62,00	*	*	*	*	*	*
Máximo	90,79	2,15	2,3	2,7	3,67	700,56	0,7
Mínimo	64,58	3,1	2,6	3	6,60	627,8	1,4
Média	83,67	2,07	2,12	2,74	2,65	1091,30	0,92
Desvio Padrão	6,95	0,41	0,39	0,61	0,93	225,3077	0,71
C. Variação	8,30	19,87	18,60	22,27	35,24	20,64584	77

O valor máximo de CUD foi de 90,79% e o mínimo de 64,58 %, momento em que a eficiência do sistema era de 3,67 % e 6,60% respectivamente. Vale frisar que ambos aconteceram em dias parcialmente nublados, porém no terceiro horário e segundo horário. O valor máximo de eficiência solar fotovoltaica encontrada assemelha-se a Nogueira et al. (2015) que obtiveram eficiência média de 6,57% em painéis policristalinos e nos ensaios para bombeamento de água.

Quando o CUD era máximo, o valor de vento foi de $0,7\text{ms}^{-1}$ e, quando mínimo, de $1,4\text{ms}^{-1}$. O gráfico de controle para o fator vento está representado na

Figura 59, que apresentou apenas 1 ensaio fora do limite de superior e inferior, o ensaio 21 com $3,1 \text{ ms}^{-1}$, que aconteceu em um dia parcialmente nublado com a eficiência do sistema solar fotovoltaica de 2,18 % e CUC de 88,49 % e CUD de 76,59 %.

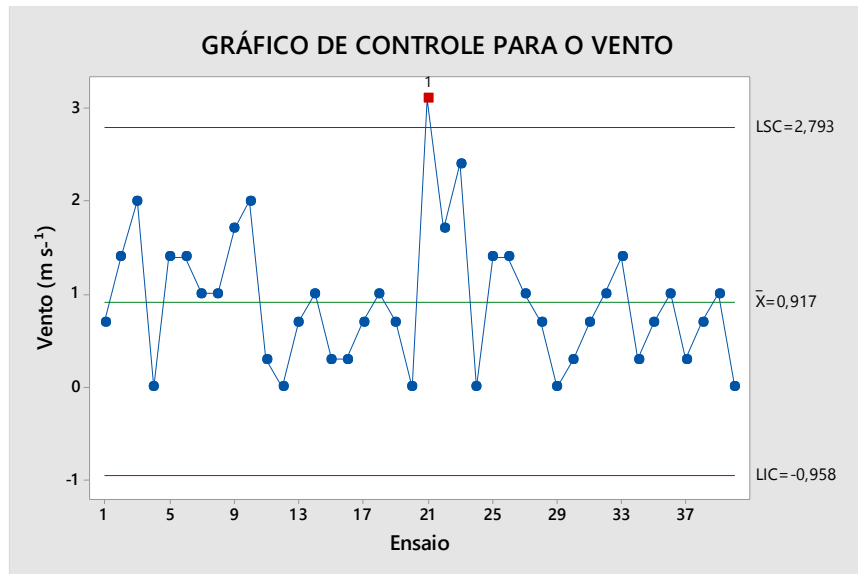


Figura 59. Gráficos de controles individuais para o vento para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono.

A velocidade do vento (ms^{-1}) não influenciou de maneira direta no desempenho dos coeficientes de uniformidades representados na Figura 59. Andrade e Brito (2018) apontaram argumentos condizentes com este estudo ao afirmar que a irrigação por superfície localizada não sofre a influência direta na distribuição da água pelo parâmetro velocidade do vento. Diferente do que ocorre na da irrigação por aspersão em que Frigo et al. (2013) observaram visualmente a correlação negativa entre CUC e o vento nas irrigações diurnas ou noturnas nos gráficos de controle.

O gráfico de controle para os valores de CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento da estação do outono estão representados na Figura 60. Nota-se que a maioria dos dados para o parâmetro CUC ficaram com valores próximos da linha central que são de 91,68%, o que é considerado excelente na classificação de irrigação. Zocoler (2005) estima que, em sistemas por gotejamento,

o ideal é que a uniformidade atinja um valor de CUC superior a 90% e CUD entre 85 e 90%.

Para CUD, nota-se que os dias parcialmente nublados apresentaram, em alguns momentos, menores valores da amostra como nos pontos: 26 (64,58 %), 31 (66,92 %), 36 (73,38) e 39 (74,77 %). Tais valores são considerados pela classificação de irrigação por gotejamento como regulares. Coelho et al. (2015) ao trabalhar com sistema de gotejamento regulado para agricultura familiar no plantio da melancia encontraram valores de CUD regulares.

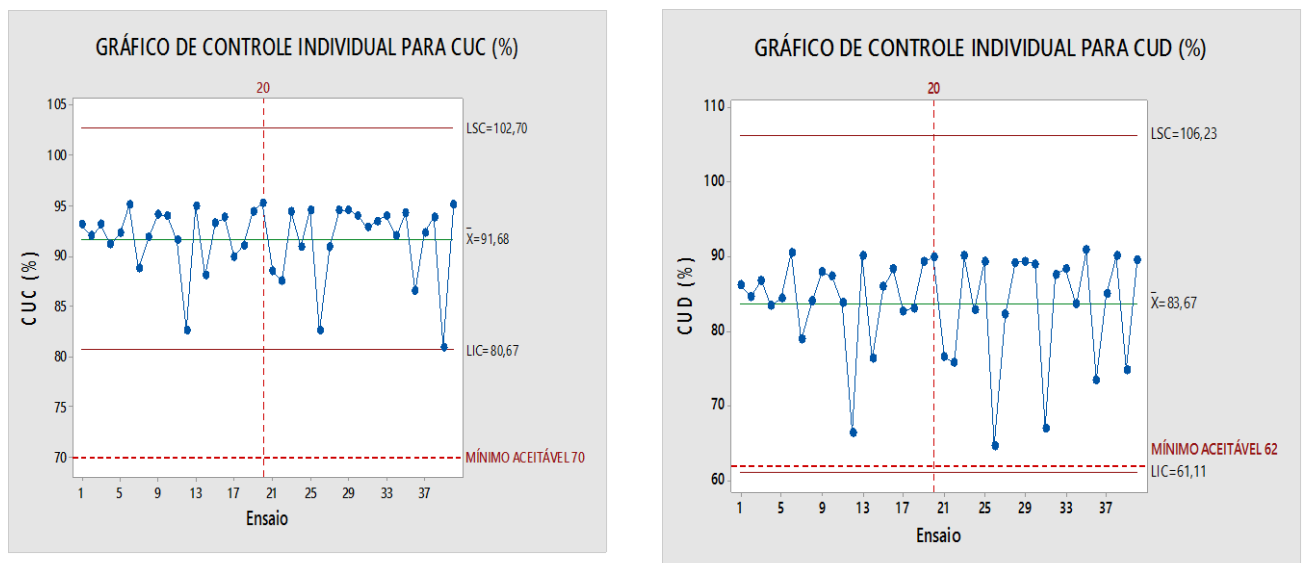


Figura 60. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).

A Figura 60 apresentou dados com comportamento condizente com Juchen et al. (2013) que aplicaram controle gráficos para irrigação por gotejamento para a cultura da alface e obtiveram todos os resultados dos testes sob controle para CUC e CUD.

Os valores da eficiência, Figura 64, apresentaram um decréscimo nos ensaios parcialmente nublados com um ponto *outliers* no ensaio 26 com o valor de 6,59 %, valor máximo obtido em todo o trabalho, no segundo horário do dia, quando a irradiação era de 627,01 Whm⁻² e os valores de CUC e CUD de 82,49 % e 64,58 %, respectivamente. Zilli (2017) ao estudar o mesmo modelo de painel amorfo encontrou resultados similares com uma eficiência máxima de 5,46% a uma irradiação de 691,4 Whm⁻².

As eficiências do sistema solar para os momentos de céu aberto apresentaram comportamento mais homogêneo com a média de 2,87 % e coeficiente de variação a 18,85 %, enquanto que nos dias parcialmente nublados a média foi de 2,43 % e um alto coeficiente de variação de 48,61 %.

As vazões médias encontradas no sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do Outono estão representadas na Figura 61. Percebe-se que para os dias parcialmente nublados a maior incidência de pontos abaixo da média, como o ensaio 39 com 1,61 de Ls^{-1} , valor próximo do limite inferior de controle, estando próximo de estar fora do controle.

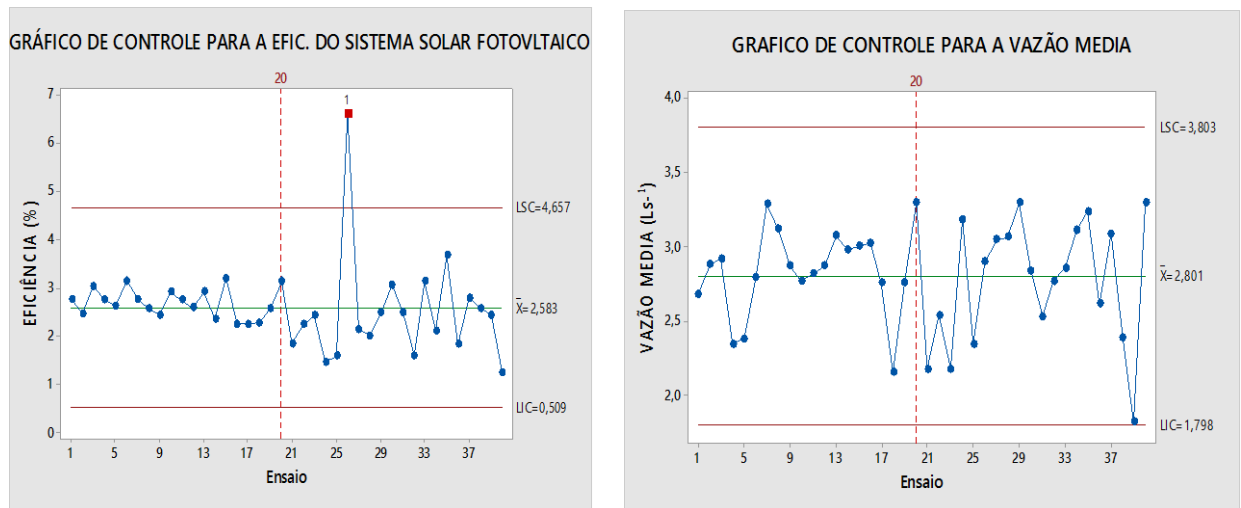


Figura 61. Gráficos de controles individuais para a eficiência solar (%) e vazão média $L h^{-1}$ para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40) do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do Outono.

Os histogramas apresentados na Figura 62 e 63 são respectivos ao CUC e CUD para dias de céu aberto e parcialmente nublados.

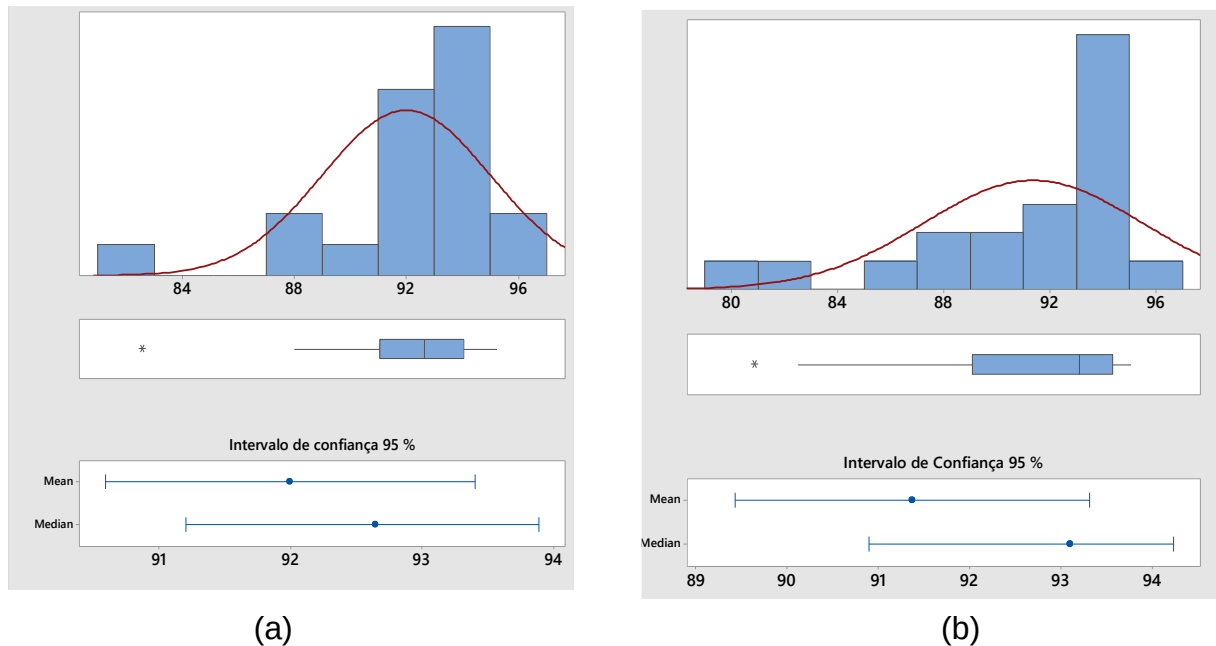


Figura 62. Histograma do CUC do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

Diferentemente do sistema de irrigação *indoor* por gotejamento montado no outono, o sistema *outdoor* não apresentou normalidade para os valores de CUC, tanto para céu aberto, quanto para parcialmente nublado. O P-valor foi de 0,028 com uma média de 91,99 % para CUC (céu aberto) e variação de 9,01 em torno da média, consequentemente, com o P-valor $<0,005$ com média de 91,367 % para CUC (parcialmente nublado) e a variação de 17, 16, respectivamente. Além disso, as duas amostras apresentaram um ponto *outliers* representado pelo asterisco.

Os valores de CUD, Figura 63, também apresentaram não normalidade. Para os dias de céu aberto, o P-valor foi 0,009 para um CUD de média 84,47 % e variação de 31,59. Para dias parcialmente nublados apresentaram um P-valor $<0,005$ com a média de 82,89 % e variação de 66,18.

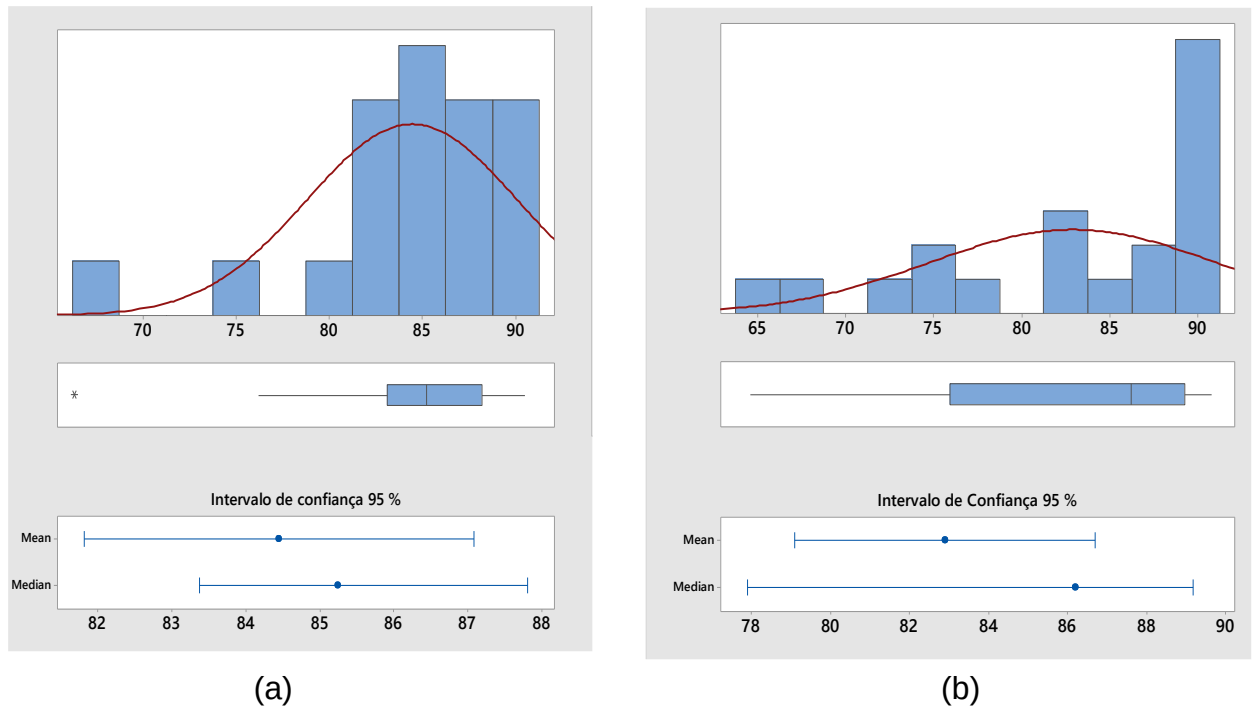


Figura 63. Histograma do CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento montado no outono para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

As distribuições médias de vazões por cada gotejador estão representadas na Figura 64 para dias de céu aberto. A maior vazão encontrada foi 3,864 Lh⁻¹ no horário das 13h30min, momento de maior irradiação média horária de 1278,81 Wm⁻². No entanto, notou-se uma oscilação de valores com vazões de 2,25 Lh⁻¹.

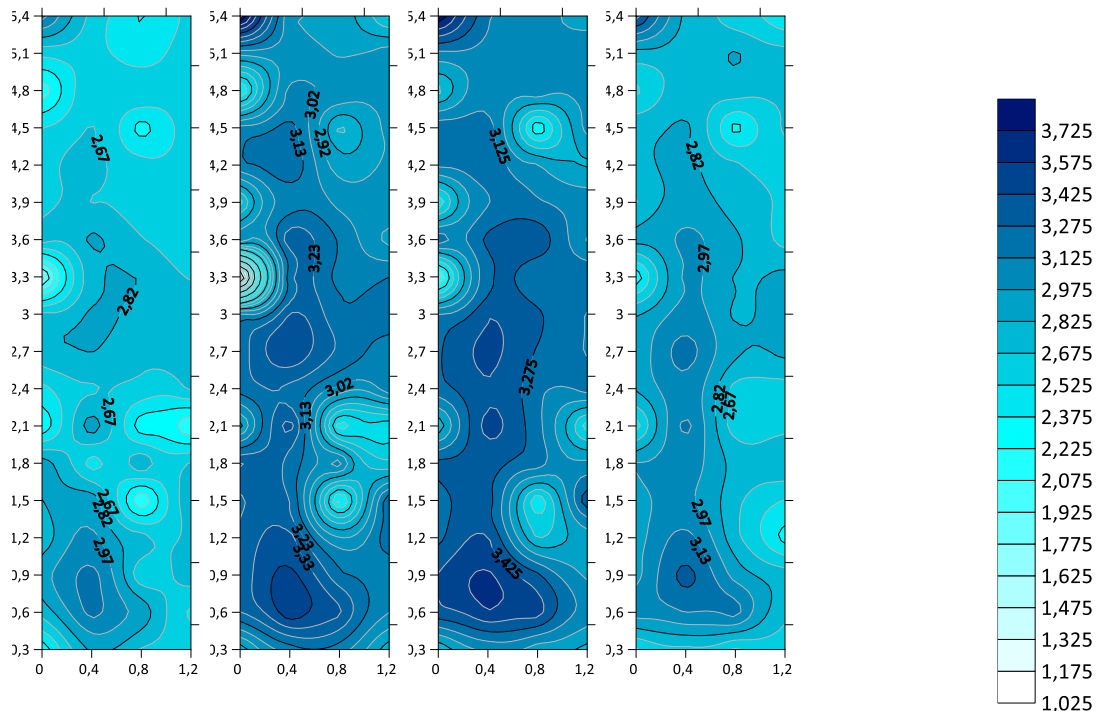


Figura 64. Distribuição médias das vazões encontradas no sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação do outono para os dias caracterizados como céu aberto para os horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

O menor valor de vazão ocorreu no segundo horário com $1,025 \text{ Lh}^{-1}$. O primeiro horário apresentou as menores médias de vazão no geral com o máximo de $3,192 \text{ Lh}^{-1}$ e mínimo de $1,68 \text{ Lh}^{-1}$. O último horário evidenciou a maior mínima com $2,242 \text{ Lh}^{-1}$ e o máximo de $3,492 \text{ Lh}^{-1}$.

Na Figura 64, percebe-se que alguns emissores apresentaram similaridades de comportamento que estão localizadas na primeira linha com as coordenadas (0;5,4), (0;3,3) e (0;2,1). Na segunda linha com (0,4; 0,6) e na terceira linha (0,8;4,5) e (0,8;1,5).

Conforme a Figura 65, a distribuição das vazões médias apresentou diferença em função do horário coletado. Percebe-se que os horários das 11h e 13h30min tiveram maiores valores, sendo de $3,857 \text{ Lh}^{-1}$ e $3,864 \text{ Lh}^{-1}$. De modo semelhante, o menor valor também foi encontrado às 11h com $1,025 \text{ Lh}^{-1}$.

A distribuição média das vazões foi diferente para dias de céu aberto e parcialmente nublados, pois podemos verificar uma maior regularidade na primeira situação evidenciada. Os horários das 11h e 13h30min tiveram os maiores valores de vazões nos dois casos de condições de céu.

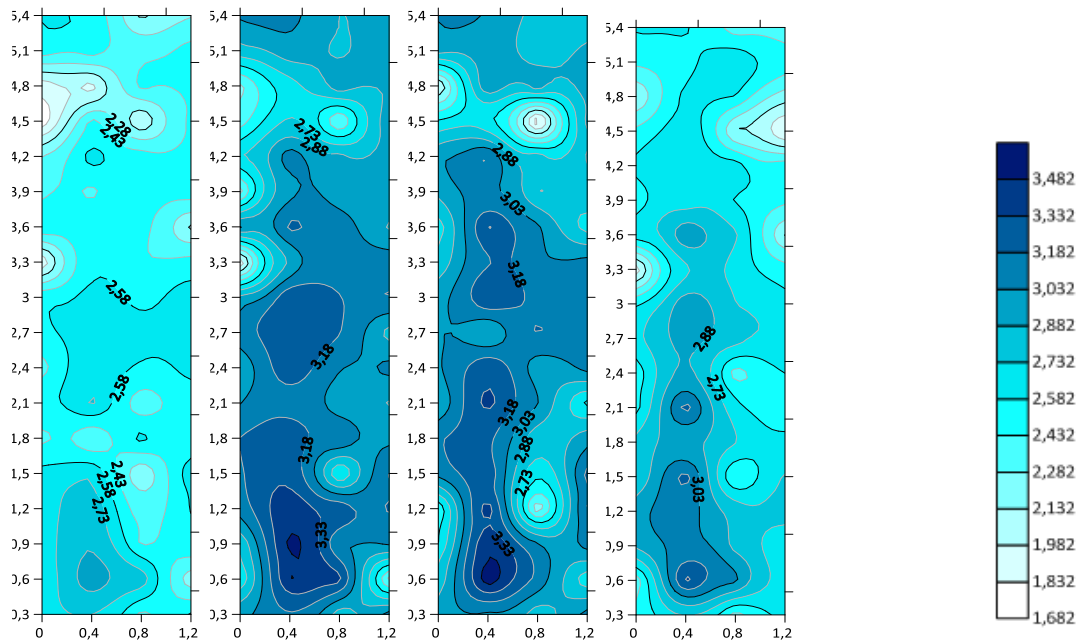


Figura 65. Distribuição média das vazões encontradas no sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação do outono para os dias caracterizados como parcialmente nublados para os horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

4.3.4 Análise da uniformidade do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento e do sistema solar fotovoltaico na estação da Primavera por gráfico de controles

A análise descritiva dos valores de CUC (Tabela 15) e CUD (Tabela 16) e, consequentemente, pressão 1 (saída do reservatório de água), Pressão 2 (início do sistema *outdoor* por gotejamento), pressão 3 (saída do sistema *outdoor* por gotejamento), eficiência solar fotovoltaica (%), irradiação em Whm^{-2} e a velocidade do vento em m s^{-1} .

Os coeficientes de variações para CUC foram os maiores encontrados neste trabalho, demonstrando menor homogeneidade amostral com 14,41 %. Outrossim, a velocidade do vento apresentou um elevado valor de coeficientes de variação com 52, 71% para o sistema de irrigação *outdoor* na primavera, corroborando com o sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento deste estudo.

Tabela 15. Análise descritiva das variáveis CUC, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica, irradiação e velocidade do vento para um sistema *outdoor* por gotejamento na estação da primavera.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUC (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência solar (%)	Irradiação (Whm ⁻²)	Vento (ms ⁻¹)
Mínimo							
aceitável	70,00	*	*	*	*	*	*
Máximo	94,97	1,56	2,0	2,5	3,30	950,54	1,0
Mínimo	70,96	1,6	1,65	2,6	2,61	1095,20	0
Média	87,65	1,78	1,93	2,95	3,70	927,81	0,94
Desvio Padrão	13,66	0,41	0,39	0,61	0,67	133,66	0,50
C. Variação	14,41	19,87	18,60	22,27	18,14	14,41	52,71

Notou-se que a pressão de saída teve o maior coeficiente de variação e que os valores foram graduais de 1,60 bar, 1,65 bar e 2,6 bar, para o máximo de CUC encontrado, assim como para o valor mínimo de CUC com 1,6 bar; 1,65 bar e 2,95 bar.

O valor de CUC foi máximo com 94,97 %, em um dia de condições com céu parcialmente nublado e às 15h, momento em que a irradiação era de 950,54 e a eficiência do sistema solar era 3,30 %. Já para o valor mínimo de 70,96 % para CUC, a eficiência do sistema solar fotovoltaico foi de 2,61 % com 1095,20 Wm⁻² de irradiação para o primeiro horário de um dia com céu aberto.

O valor máximo da amostra de CUC não foi simultâneo com o de CUD, somente para o valor mínimo. Dessa maneira, a Tabela 16 destaca a análise descritiva para CUD.

O valor máximo de CUD foi de 83,40% (bom) e de 44,19 % (ruim), sendo este valor o menor encontrado em todo o estudo. A média dos coeficientes de uniformidade de distribuição foi de 74,65 %, o que é considerado regular para ASABE (1986). Apesar da grande diferença dos extremos valores de CUD, o coeficiente de variação foi de 10,23 %, concluindo que o valor mínimo não foi frequente na amostra.

Tabela 16. Análise descritiva das variáveis CUD, Pressão 1, Pressão 2, Pressão 3, Eficiência solar fotovoltaica, irradiação e velocidade do vento para um sistema *outdoor* por gotejamento na estação da primavera.

Análise de 40 ensaios de irrigação por gotejamento	CUD (%)	Pressão 1 (bar)	Pressão 2 (bar)	Pressão 3 (bar)	Eficiência solar (%)	Irradiação (Wm^{-2})	Vento (ms^{-1})
Mínimo aceitável	62,00	*	*	*	*	*	*
Máximo	83,40	1,0	1,5	1,8	2,75	864,92	2,0
Mínimo	44,19	3,1	2,6	3	2,61	627,8	1,4
Média	74,65	1,6	1,65	2,6	2,61	1095,20	0,94
Desvio Padrão	7,64	0,41	0,39	0,61	0,67	133,66	0,50
C. Variação	10,23	19,87	18,60	22,27	18,14	14,41	52,71

Conforme a Figura 66, analisa-se que todos os valores de velocidade do vento em m s^{-1} ficaram dentro do controle estabelecido por Shewhart, com uma média de $0,94 \text{ m s}^{-1}$. O seu comportamento não apresentou mudanças discrepantes entre os dias de céu aberto (21 a 30), diferente dos dias parcialmente nublados (30 a 40) que tiveram maior amplitude entre os dados explicitando a mínima de 0 m s^{-1} e máxima de $1,7 \text{ m s}^{-1}$.

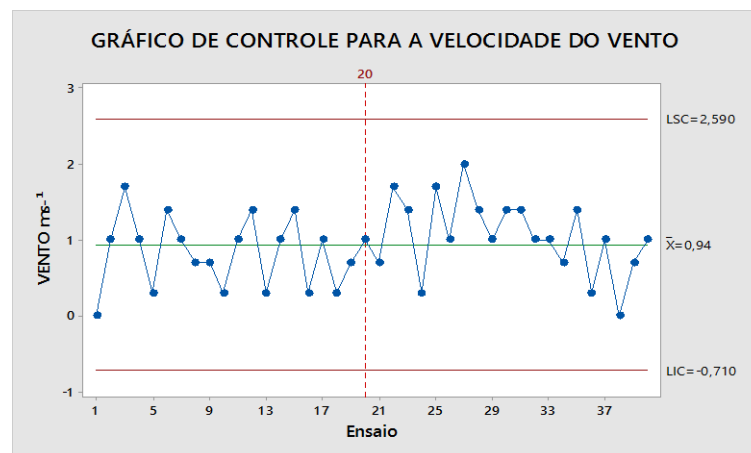


Figura 66. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).

A Figura 67 destaca valores de CUC e CUD para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na primavera que tiveram respectivas médias de 87,65 % e 74,65 %. Assim, nota-se que os dois parâmetros para a uniformidade estiveram

dentro do mínimo aceitável nas coletas, exceto no ensaio 1 e 36 para o CUD, que, além de terem sido classificados como ruins, foram pontos discrepantes do sistema, naturalmente também para o CUC. Isso confirma uma maior sensibilidade de classificação para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição.

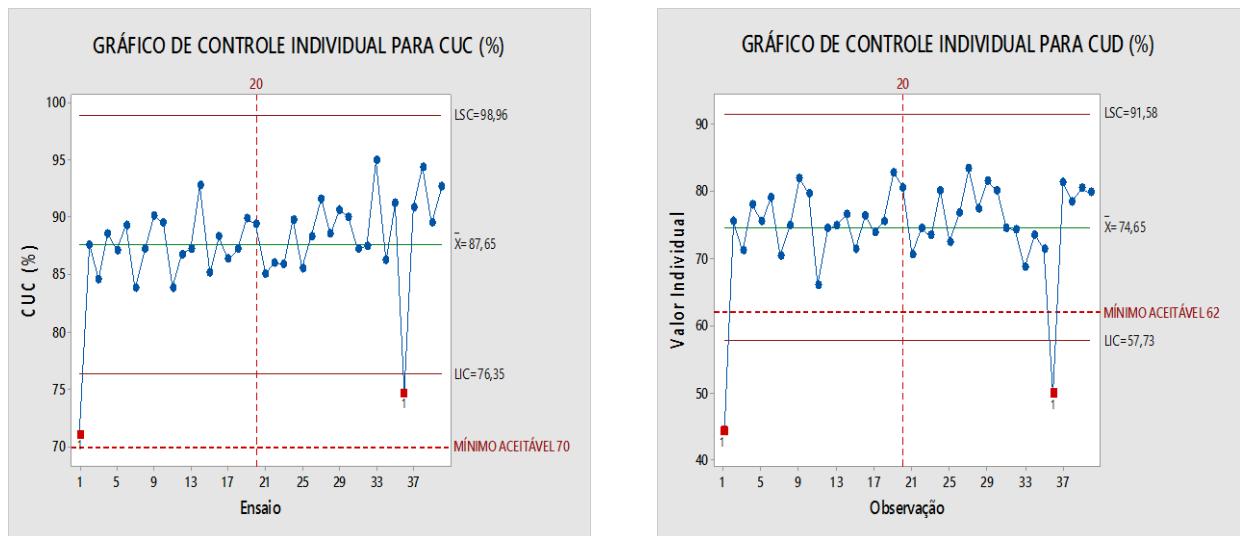


Figura 67. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).

Hermes et al. (2015) encontraram, ao analisar a irrigação por gotejamento baseada em gráficos de controle por Shewhart, a ocorrência de valores abaixo do controle do limite inferior. Suszek (2014) identificou, ao estudar irrigação por gotejamento pós-quimicação para valores de CUD, valores também abaixo da linha central com valores abaixo do mínimo aceitável.

Os gráficos de controle referentes à vazão média do sistema e a eficiência do sistema solar fotovoltaico estão representados na Figura 68, com médias de 2, 5 Lh⁻¹ e 3,7 %, respectivamente. A vazão média teve o comportamento dentro do controle dos limites estabelecidos com a maior encontrada de 3,08 Lh⁻¹ no ensaio caracterizado como parcialmente nublado e a mínima encontrada foi em um dia de céu aberto com 2,0 Lh⁻¹.

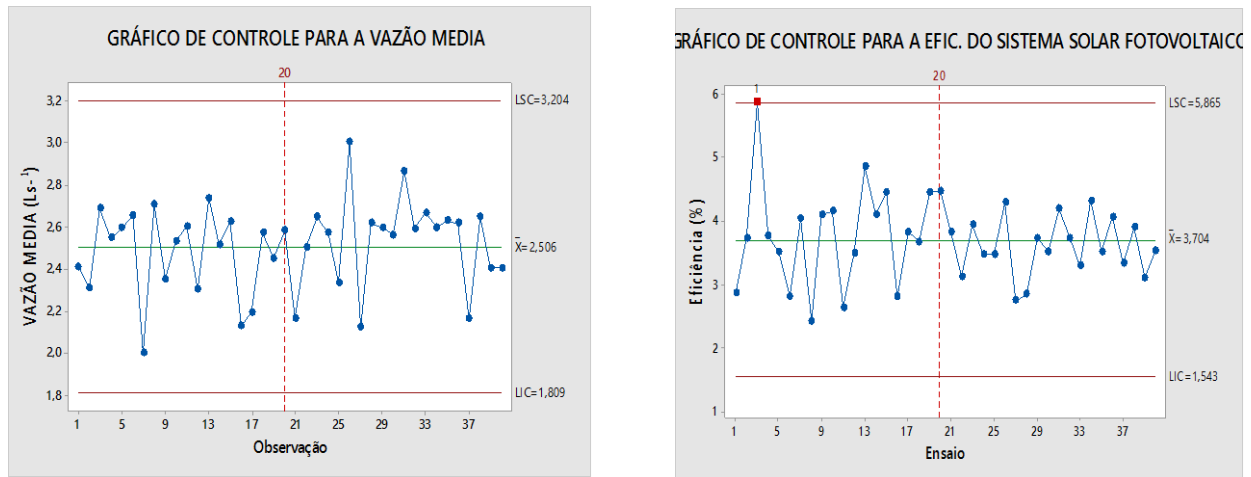


Figura 68. Gráficos de controles individuais para o CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação da primavera para dias de céu aberto (1 ao 20) e parcialmente nublados (21 ao 40).

Ao fazer referência à eficiência do sistema solar fotovoltaico, Figura 71, verificamos que o ensaio 3 relacionado com a condição de céu aberto apresentou estar fora de controle para Shewhart. Entretanto, assim como para CUC e CUD, os valores máximos encontrados representam uma melhor resposta do sistema. Dessa maneira, aponta-se o valor de 5,58 %. No momento em que a eficiência do sistema solar fotovoltaico foi maior, foram encontrados os valores de CUC com 84,56 % e CUD 71,141. Sendo assim, valores considerados maiores que a classificação bom e regular, porém com eficiências menores do sistema solar fotovoltaico que atingiram parâmetros de uniformidade iguais ou maiores. Reiterando a não influência direta do sistema fotovoltaico no sistema hidráulico, diferente dos resultados encontrados por Zago (2016), que analisou um sistema de irrigação por gotejamento por bombeamento fotovoltaico. De modo semelhante ao que fora encontrado por Andrade (2016), quando analisou a microaspersão e identificou a influência do sistema de armazenamento de energia na irrigação ao comparar o mesmo sistema sem baterias.

Os histogramas estão representados na Figura 69 e 70, que representam os valores de CUC e CUD, respectivamente.

Os valores de CUC para dias de céu aberto, no histograma da Figura 69, a média encontrada foi de 86,78 % com um P-valor de 0,005 com a variância de 18,99. Nos dias parcialmente nublados (b) o P-valor foi de 0,084, com uma média de 88,52 % e com a variância de 18,95. Para as duas condições de céu, os valores de CUC apresentaram pontos *outliers*, porém, conforme o P-valor para dias de céu

parcialmente nublados foi maior que 0,05, sendo considerado uma distribuição normal.

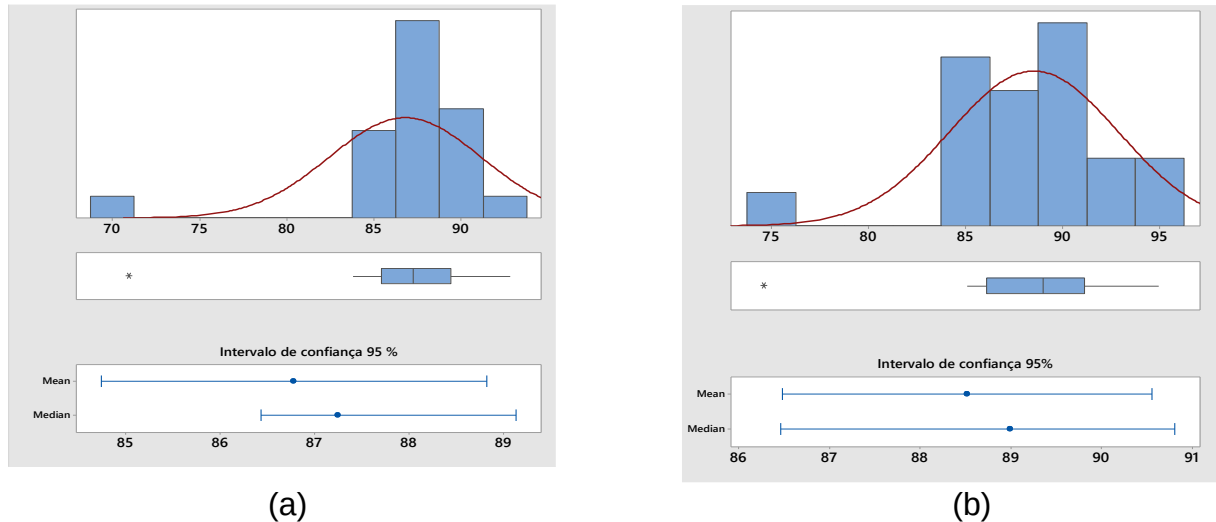


Figura 69. Histograma do CUC do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

Os valores de CUD para as condições de céu aberto salientaram um P-valor < 0,005 com a média de 74,17 % com a variância de 66,40 e A-quadrado de 1,67. Nos dias parcialmente nublados o P-valor foi de 0,005 com uma média de 75,14 %, variância de 52,85 e A-quadrado de 1,12 (Figura 69). Dessa maneira, apresentou apenas normalidade de dados nos dias parcialmente nublados para valores de CUC e também em CUD.

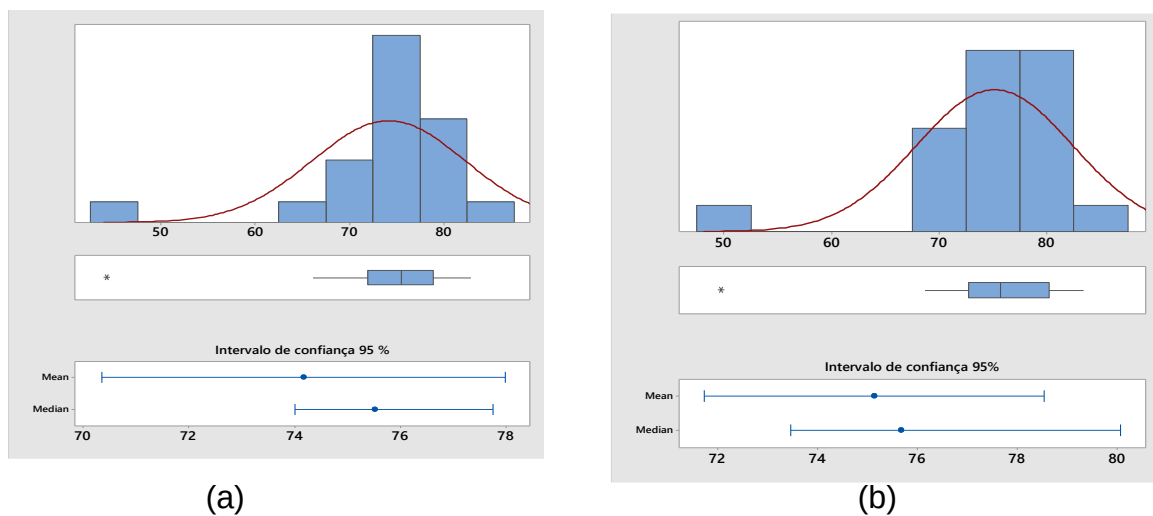


Figura 70. Histograma do CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento montado na primavera para: (a) dias de céu aberto e (b) parcialmente nublados.

A distribuição média das vazões encontradas no sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação da primavera está representada na Figura 71, para céu aberto, e 72, para parcialmente nublados.

A maior média de vazão atingida aconteceu no terceiro horário com $3,63 \text{ L h}^{-1}$ e também a mínima no mesmo momento com $0,782 \text{ L h}^{-1}$ (Figura 71). Independente do horário, encontrou-se um comportamento similar de distribuição média de vazões. Ainda são analisadas menores vazões localizadas na primeira linha e últimas nos gotejadores iniciais e finais.

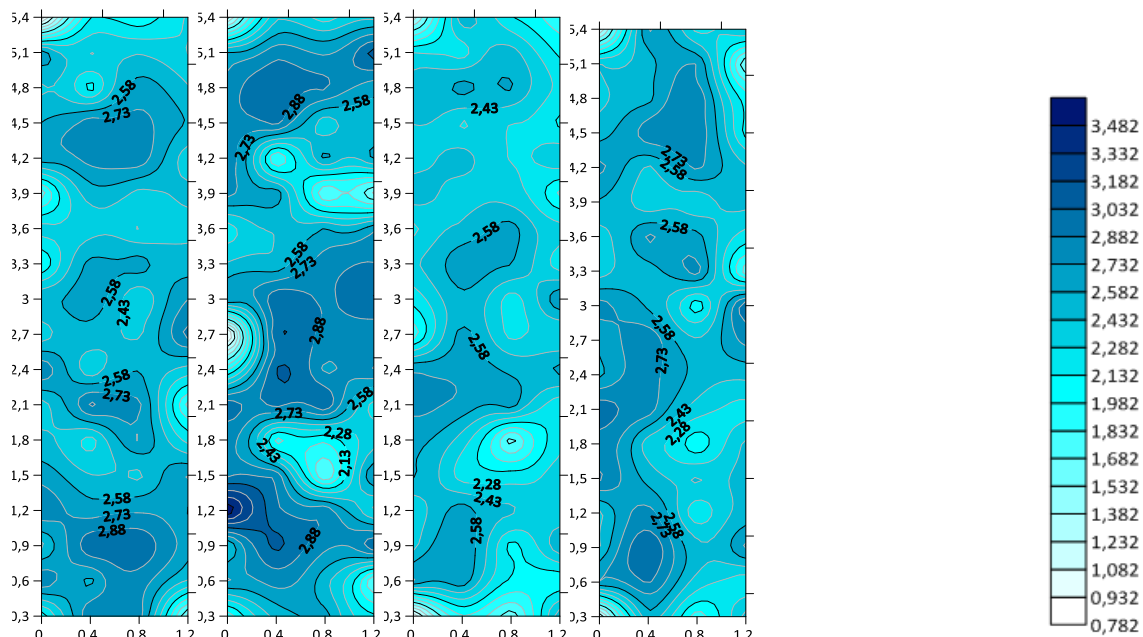


Figura 71. Distribuição média das vazões encontradas no sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como céu aberto nos seguintes horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

Para Cararo et al. (2006), a vazão média de gotejadores é um bom parâmetro para avaliar alterações quanto ao funcionamento, seja em razão dos possíveis entupimentos, ou por conta de outros problemas.

A maior distribuição média ocorreu no segundo horário para os dias parcialmente nublados da Figura 72 com $3,257 \text{ L h}^{-1}$ e o mínimo para este mesmo horário de $1,006 \text{ L h}^{-1}$. Ainda se nota que o último horário apresentou os menores valores de $2,399 \text{ L h}^{-1}$ e $0,520 \text{ L h}^{-1}$.

Os gotejadores extremos, Figura 71 e 72, isto é, o primeiro e o último da primeira linha, assim como o último da quarta linha apresentaram as menores vazões em todos os horários, isso se deve em razão da água se deslocar na linha atingindo os gotejadores periféricos.

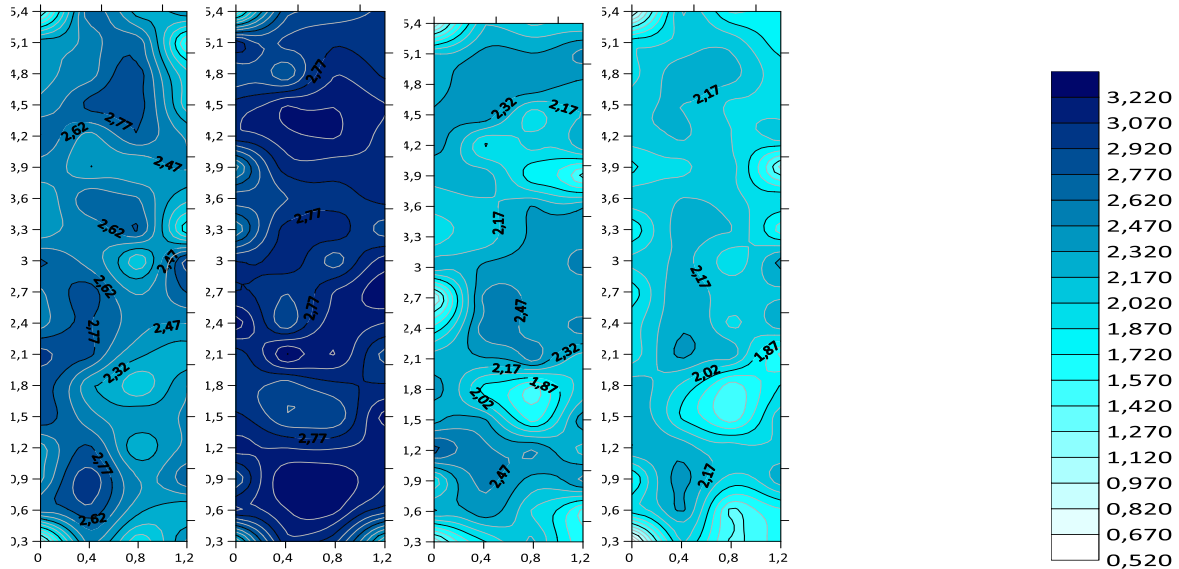


Figura 72. Distribuição média das vazões encontradas no sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação da primavera para os dias caracterizados como parcialmente nublados nos seguintes horários: **(a)** 9h45min; **(b)** 11h; **(c)** 13h30min e **(d)** 15h.

4.3.5 Análises das metodologias de coletas para o sistema *outdoor* por gotejamento na Estação do outono e primavera

A Figura 73 apresenta o valor de CUC para a metodologia de coleta, segundo Keller e Karmeli (1975), com as coletas do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento para a estação do outono (1 a 40) e da primavera (41 a 80).

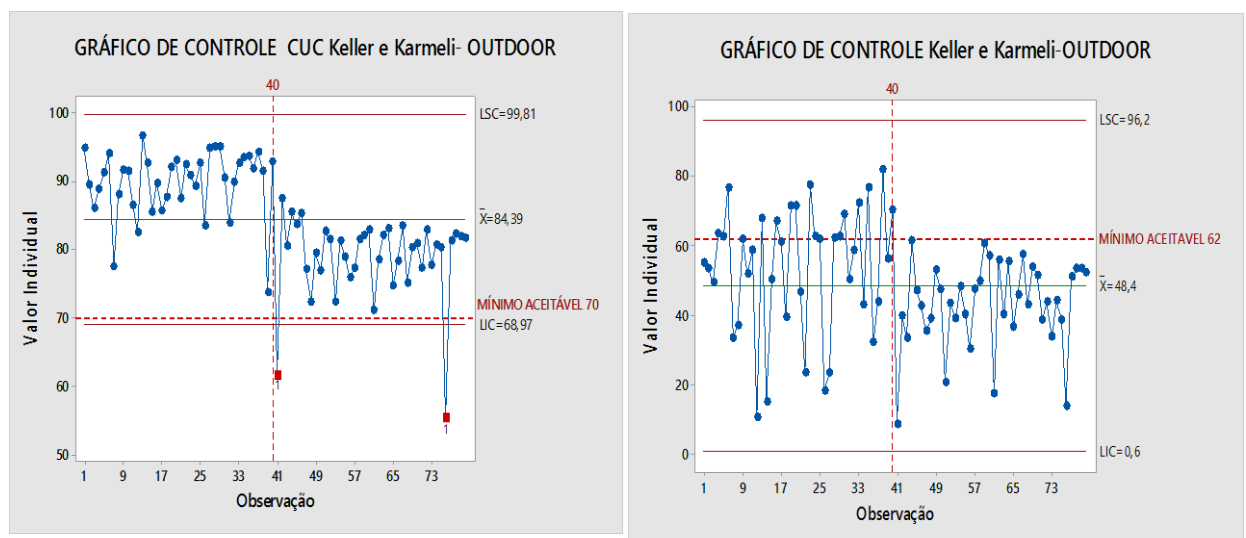


Figura 73. Variação de CUC e CUD (%) do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento, conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975), referente à estação do outono (1-40) e primavera (41-80).

A média geral encontrada para o valor de CUC (Figura 73) foi de 84,39%, valor considerado como Bom para a classificação ASABE (1996). O valor médio apenas para os valores coletados na estação do outono foi de 89,90 % (bom) com uma irradiação média de 1091,299 Whm⁻². Para a estação da primavera, a média foi de 78,88 % para uma irradiação média de 927,82 Whm⁻².

Analisando o gráfico de controle de CUC pelo método de Keller e Karmeli (1975), é perceptível que, para a estação do outono, todas as coletas estiveram dentro dos limites estabelecidos para Sherwhart e ainda acima do mínimo aceitável para o gotejamento de 70 %. Para a estação da primavera, os valores foram na maioria dos casos abaixo da linha média, porém superior ao mínimo aceitável e, consequentemente, com dois pontos aleatórios (ensaio 42 e 76).

Os dias de céu aberto (Figura 73), na estação do outono, apresentaram uma média de 89,28 % para CUC e também a média de irradiação de 1185,78 Whm⁻². Os dias parcialmente nublados para a mesma estação tiveram uma média de 90,52 % com uma irradiação média de 996,83 Whm⁻². Os dias de céu aberto tiveram a média, para a estação da primavera de 79,31 %, classificada como regular para gotejamento, com uma irradiação média de 995,83 Whm⁻². Os dias parcialmente nublados atingiram uma média de 78,45 % com uma irradiação média de 859,880 Whm⁻².

O parâmetro analisado coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) para a metodologia de coleta, segundo Keller e Karmeli (1975), está apresentada na Figura 73 com uma média geral de 48,4 %, o que é representado como abaixo do mínimo aceitável de 62 %.

Observa-se que toda a amostra do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento encontra-se dentro dos limites de controle inferior e superior. No entanto, com a maioria dos ensaios abaixo do mínimo aceitável de 62 %, principalmente quando evidenciamos a estação da primavera. Isso é perceptível pelas médias baixas encontradas de CUD no período que são: 43,06 % geral, 42,18 % para dias de céu aberto e 43,95 em dias de céu parcialmente nublado. O outono também apresentou uniformidades consideradas ruins para a classificação: 53,73 % para a geral, 52,88 para dias de céu aberto e 54,58 % em dias de céu parcialmente nublado (Figura 73).

Os valores de CUC, de acordo com Denículi et al. (1980), estão apresentados na Figura 74, com uma média geral de 86,38 %, considerada boa para a classificação. Os dados estão dentro de controle para a estação do outono e, na primavera, figuraram dois pontos discrepantes do processo (ponto 42 e 76) que, além disso, estavam abaixo do mínimo aceitável para o sistema de irrigação por gotejamento.

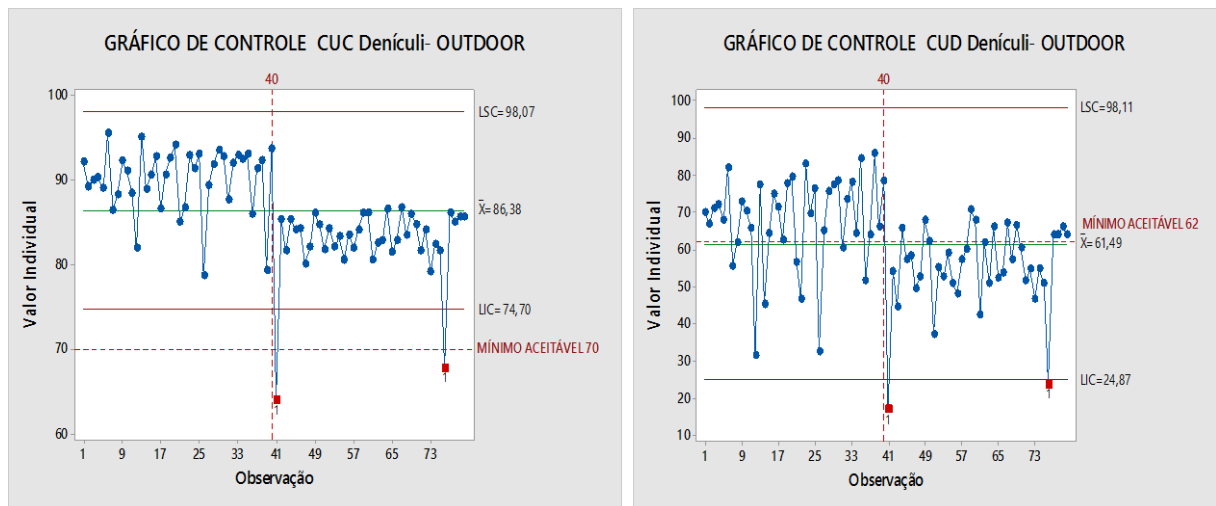


Figura 74. Variação de CUC e CUD (%) do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento, conforme a metodologia de Denículi et al. (1980), referente à estação do outono (1-40) e primavera (41-80).

Ainda, para a Figura 74, aponta-se as seguintes médias para o sistema *outdoor* de irrigação implantado na estação do outono: geral de 90,06 %, para dias de céu aberto com 90,31 % e 89, 80 % para dias parcialmente nublados. Todas essas porcentagens são classificadas com parâmetros bons para o gotejamento. Por conseguinte, para a estação da primavera as médias de: geral com 82,71 %, para dias de céu aberto com 82, 58% e dias parcialmente nublados com 82, 85%.

O gráfico de controle para o método de Denículi et al. (1980) para CUD apresentou uma média geral de 61,49 %, o que é abaixo do mínimo aceitável de 62 %. Diferentemente da Figura 73, tal método evidenciou apenas o controle para a estação do outono, que exibiu uma média de 67, 80 %. Entretanto, para a estação da primavera, com a média geral de 55, 18 %, dos pontos ficaram fora dos limites de controle estabelecidos (ensaio 42 e 76), os mesmos encontrados fora de qualidade para CUC.

Quando separado por amostras de acordo com as estações do ano e pelas condições de céu (Figura 74), temos que: para a estação do outono, nos dias de céu aberto, a média geral foi de 67,14 % para dias de céu aberto e 68,46 % para dias parcialmente nublados; já para a estação da primavera, as médias foram de 54,41 % e 55,95%, respectivamente.

O CUC pelo o método de coleta Total revelou um aumento na média geral para 89,67%, conforme representado na Figura 75. Ademais, todo processo do sistema indoor de irrigação por gotejamento está dentro de controle novamente para a estação do outono. Já quando se refere à primavera é possível apontar os mesmos valores *outliers* (42 e 76) para o gráfico de controle, porém com a diferença de toda a amostra estar dentro do mínimo determinado em norma de 70 %.

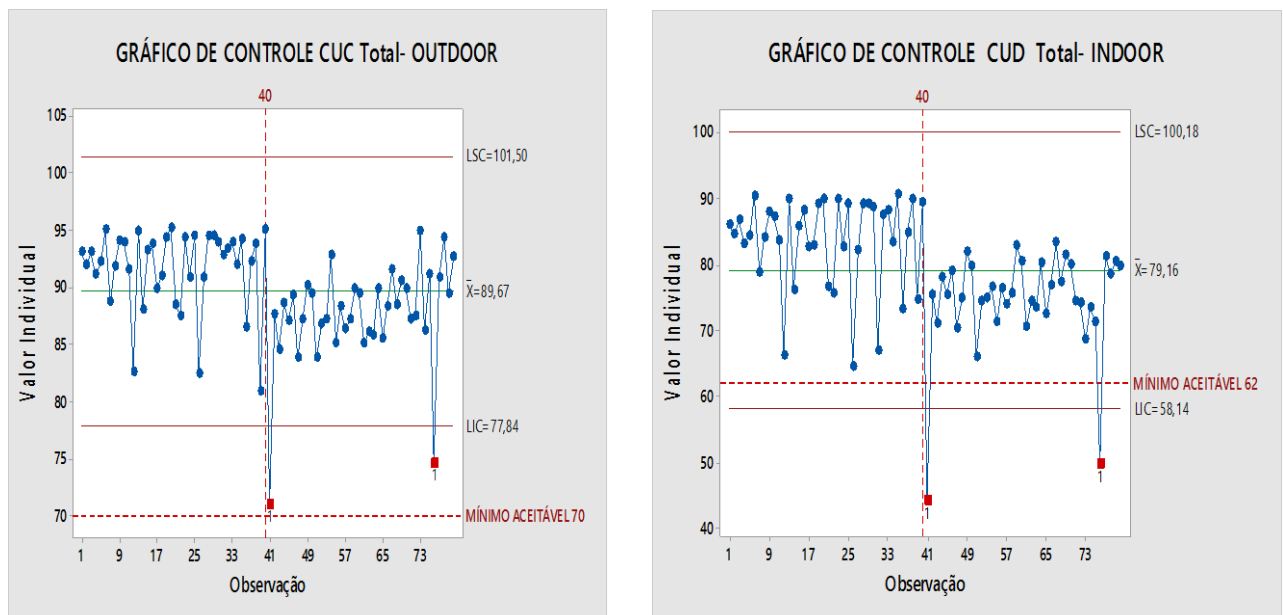


Figura 75. Variação de CUC (%) do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento, conforme a metodologia Total referente à estação do outono (1-40) e primavera (41-80).

Em conformidade ainda com a Figura 75, nota-se que a diferença entre as médias do CUC da estação do outono entre a primavera diminuiu para 86,97 % e 83,64 %, respectivamente. Na estação do outono, os dias de céu aberto apresentaram a média de 87,24 % e 91,36 em dias parcialmente nublados. Na estação da primavera, a média foi de 82,31 % em dias de céu aberto e 88,52 em dias parcialmente nublados.

Indiferente da metodologia de coleta utilizada, foi possível perceber uma não responsabilidade direta da irradiação com os valores de uniformidade. Constatou-se

ainda que os valores para CUC no outono foram mais elevados do que na primavera. De modo semelhante, a metodologia Total, independente da estação analisada, destacou maiores valores seguidos pelo método de Denículi et al. (1980) e Keller e Karmeli (1975).

Por fim, a média do CUD para metodologia de coleta Total (Figura 75) foi de 79, 16%, também com controle para a estação do outono e para a primavera com dois pontos fora de controle (ensaio 42 e 76), estes que são os únicos abaixo da linha mínima aceitável para sistema de irrigação por gotejamento.

As médias para a estação do outono foram respectivamente: 83, 67 % para a geral, 84,45 % para os dias de céu aberto e 82,90% para dias parcialmente nublados. Na estação da primavera, foram de: 74, 65 para o geral, 74, 17% para dias de céu aberto e 75, 14% para parcialmente nublados.

Para os valores de CUD, o comportamento da irradiação também não apresentou influência efetiva. Além disso, os valores para o CUD na estação do outono foram maiores do que na primavera. As oscilações, assim como também citado no sistema *indoor* do sistema de irrigação por gotejamento são maiores para os valores de CUD do que para CUC.

A uniformidade CUD também apresentou diferenças de valores nas diferentes metodologias de coletas sendo a ordem de médias maiores para: Total; Keller e Karmeli (1975) e, por último, por Denículi et al. (1980).

Fernandes et al. (2013) aplicaram em um sistema de irrigação por gotejamento as duas metodologias citadas. A uniformidade do sistema de irrigação foi classificada como razoável 78% para Keller e Karmeli e regular 77% para Denículi. Ainda concluíram que, quando o comprimento das linhas laterais é acima de 100m, é recomendada a utilização de 32 pontos (Método de Denículi) como forma de assegurar resultados mais representativos da uniformidade de distribuição de água.

Para Vieira e Mantovani (2004), tanto para o cálculo de CUD, quanto de CUC, em condições em que o sistema de irrigação tem uma manutenção constante, é admissível realizar as avaliações de apenas 16 gotejadores. Entretanto, quando o sistema de irrigação está com problemas, como o entupimento dos gotejadores, é necessário que se faça uma amostragem maior, com 32 pontos.

4.4.1 Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação *indoor* por gotejamento com um sistema de bombeamento fotovoltaico amorfo

4.4.1.1 Análises do sistema de irrigação por gotejamento *indoor* montado na estação do outono

As médias horárias para os coeficientes de uniformidade CUC e CUD e irradiação encontrados no sistema *indoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono estão representadas na Tabela 17.

Tabela 17. Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema *indoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto e para dias nublados.

Horário (horas)	Condições do céu	CUC (%)		CUD (%)		Irradiação Wm ⁻²	
		Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV
9:45	Céu aberto	91,01	1,70	83,73	3,90	716,30	18,70
11:00		88,13	7,49	79,20	13,81	922,52	3,71
13:30		88,43	7,72	78,20	16,85	1055,11	9,87
15:00		88,44	6,73	78,09	15,31	947,48	10,52
9:45	Parcialmente nublado	88,75	9,64	79,57	19,98	696,48	11,72
11:00		91,00	5,68	83,45	12,91	924,18	5,85
13:30		90,24	8,47	82,05	17,87	965,71	26,55
15:00		86,68	7,83	77,33	18,29	727,98	33,53

O comportamento da eficiência do sistema solar fotovoltaico e uniformidade de CUC e CUD, tanto para os dias de céu aberto quanto para dias parcialmente nublados, em relação aos valores de uniformidade, estão apresentados na Figura 76. Identifica-se que todos os valores de CUC estiveram dentro ou próximo da faixa de 90% classificada como excelente para ASABE (1986), indiferentemente do horário de coleta e irradiação incidida. Ainda para CUD, verifica-se que todos os

valores estiveram dentro da faixa de 75 a 90 %, o que é considerado como “bom” (Tabela 17).

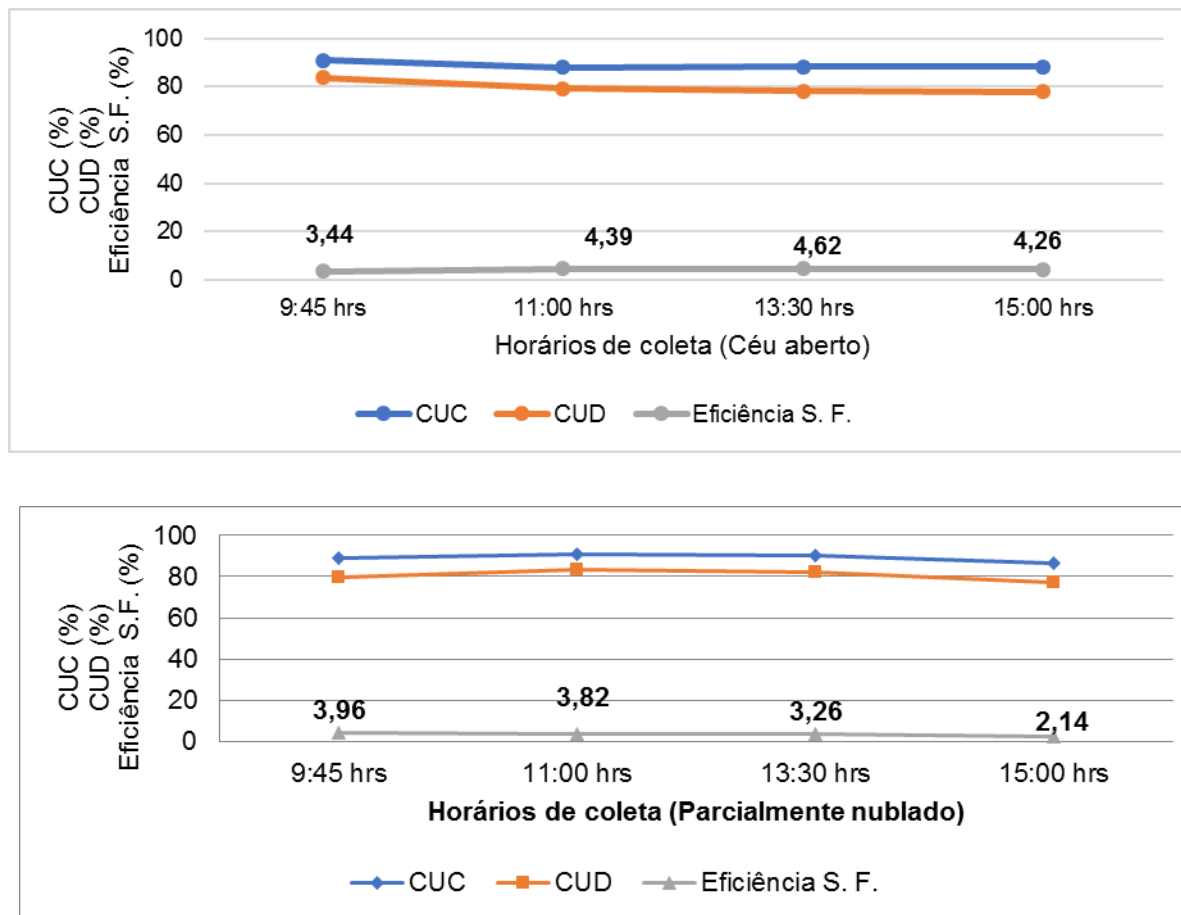


Figura 76. Médias do CUC (%), CUD (%) e Eficiência do Sistema Fotovoltaico (%) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* no Outono.

Os valores de uniformidade CUC e CUD no sistema de irrigação por gotejamento na estação do outono nos dias de céu aberto apresentaram, ao longo dos horários diários, comportamento semelhantes quanto às variações de energia consumida e eficiência. Sendo que os menores valores foram de 88,130 % para o segundo horário do dia e 78,09 % para o quarto horário. Os maiores valores de CUC e CUD foram encontrados no primeiro horário com 91,00% e 83,73%, respectivamente, momento em que a energia consumida era de 2,0 (Wh.m⁻²) e a eficiência de 3,44 (%).

As médias de CUC e CUD para os dias caracterizados como parcialmente nublados foram maiores no horário das 11h com 91,01% e 83,45 %. Em tal momento, a eficiência encontrada foi de 3,82 %. Os mínimos de médias ocorreram

para as uniformidades no último horário do dia com 86,68 % e 77,33% para CUC e CUD, ainda a menor eficiência também foi encontrada neste horário com 2,14 % menor valor identificado para todos os ensaios desta análise.

A eficiência do sistema solar fotovoltaico (Figura 76), independente das condições de céu, não influenciou diretamente no desempenho do sistema de irrigação por gotejamento. Os maiores valores de eficiência geral aconteceram nos horários de coletas de 11h e 13h:30min para dias de céu aberto com 4,39 % e 4,62 %, consecutivamente. Entretanto, vale frisar que não apontaram maiores valores para CUC e CUD. Os valores de eficiência solar fotovoltaica foram inferiores ao encontrado por Mateo et al. (2018) que, em condições de campo, encontrou uma eficiência de 5,18% para o mesmo tipo de painel.

Os dados da Figura 77 são relativos à energia consumida pelo sistema fotovoltaico e a comparação com o desempenho da uniformidade do sistema de gotejamento *indoor* da estação do outono.

Os valores de energia consumida (Wh.m^{-2}) e eficiência do sistema solar fotovoltaico (%), para os dias caracterizados como de céu aberto e parcialmente nublados, apresentaram comportamento semelhante. Os maiores valores médios de energia consumida para os dias de céu aberto aconteceram no terceiro horário com $4,02 \text{ Wh.m}^{-2}$ e para dias parcialmente nublados no segundo horário com $2,93 \text{ Wh.m}^{-2}$. Os mínimos encontrados foram de $2,0 \text{ Wh.m}^{-2}$ para o horário das 9h:45min e $1,47 \text{ Wh/m}^2$ para às 15h, respectivamente (Figura 77).

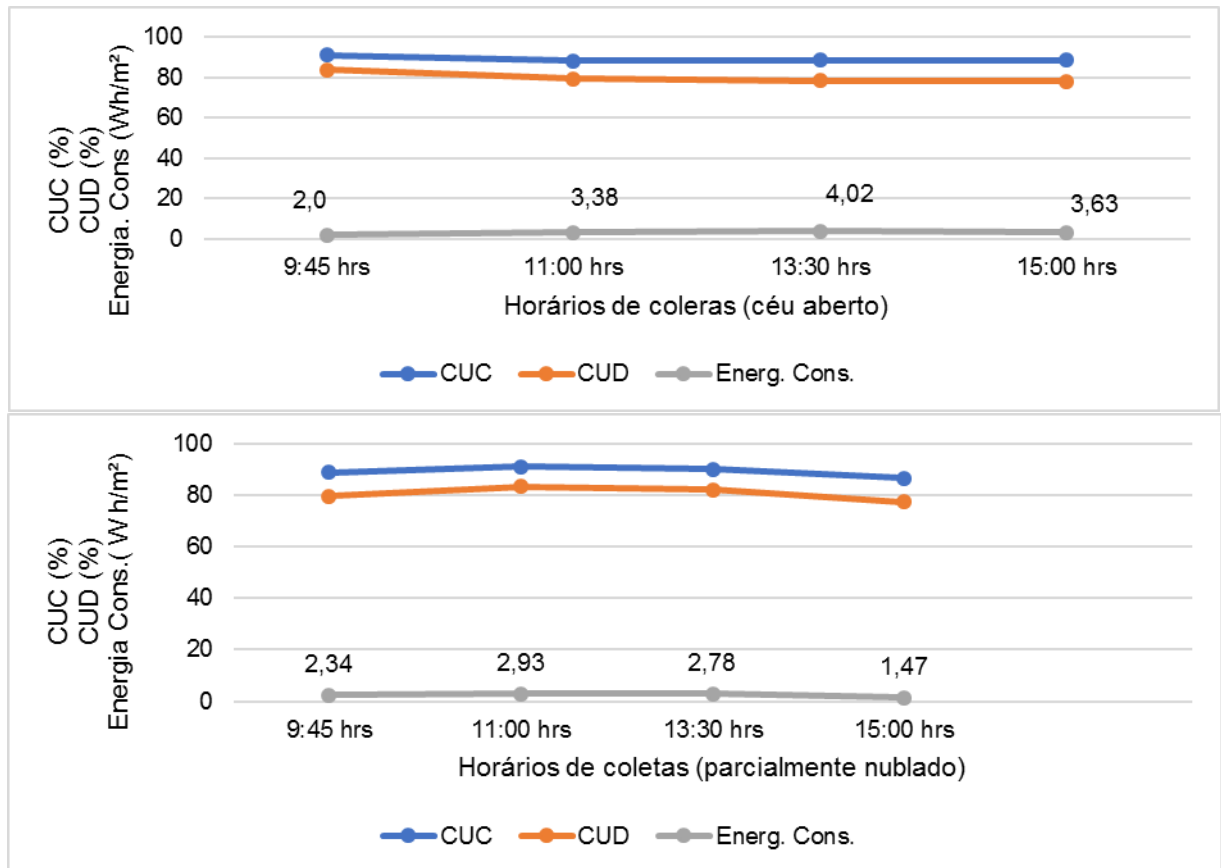


Figura 77. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh.m^{-2}) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublados para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* no outono.

O menor valor de energia consumida ($2,0 \text{ Wh.m}^{-2}$) nos dias de céu aberto aconteceu nos momentos de máxima uniformidade do sistema de irrigação para CUC e CUD às 9h45min. o que demonstra a não relação direta do sistema fotovoltaico com o sistema de irrigação por gotejamento. Para a condição de céu parcialmente nublado, o menor valor de energia consumida ($1,47 \text{ Wh.m}^{-2}$) resultou na menor uniformidade de CUC e CUD, porém essa tendência não aconteceu nos outros horários de coleta.

Na Figura 78 estão os dados de energia disponível para cada período de coleta nas duas condições de céu (aberto e parcialmente nublado).

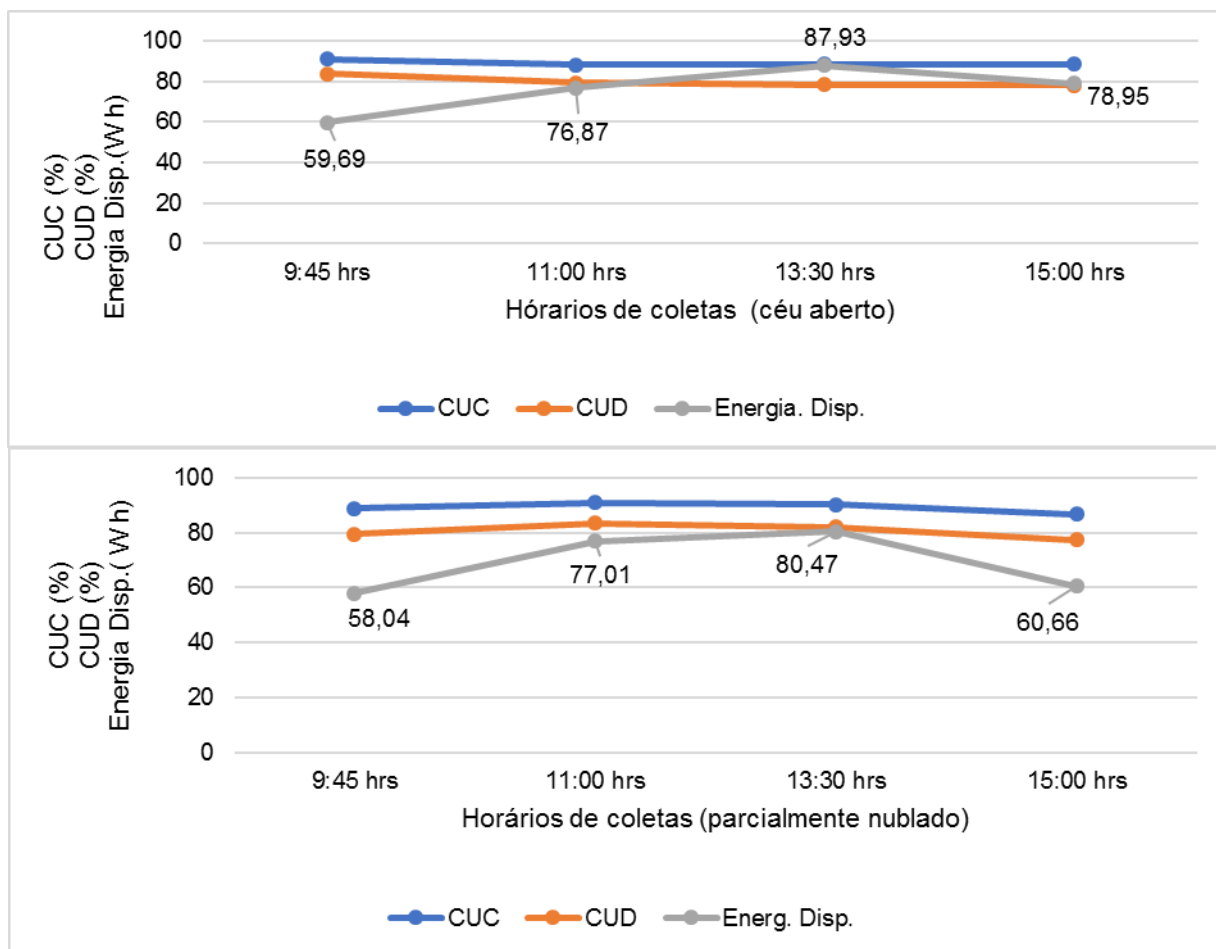


Figura 78. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia disponível (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* no outono.

O pico de energia disponível do sistema solar fotovoltaico aconteceu no horário das 13h30min horas, tanto para dias de céu aberto e parcialmente nublados com 87,92 Wh/m² e 80,47 Wh/m². O menor valor de energia disponível também aconteceu no mesmo horário das 9h45min com 59,69 Wh/m² e 58,04 Wh/m². O maior valor de energia disponível do sistema fotovoltaico nos dias de céu aberto resultou no maior valor de uniformidade de CUC e CUD, na menor energia consumida e na menor eficiência do sistema solar fotovoltaico.

A energia disponível do sistema solar fotovoltaico nos dias de céu aberto, apesar de possuir a mesma tendência de valores, foram superiores em relação aos dias parcialmente nublados em todos os horários do dia de coletas. Todavia, o menor valor de energia consumida encontrado às 9h45min obteve os maiores valores de CUC e CUD, respectivamente.

4.4.1.2 Análise do sistema de irrigação por gotejamento *indoor* montado na estação da primavera

As análises descritivas de CUC, CUD e Irradiação pelos horários de coletas estão representadas na Tabela 18. Consta-se que todas as variáveis apresentaram coeficientes de variação baixos, ainda mais por se tratar de uma coleta a campo, com o maior valor 17,64 %.

Os valores de CUC para o sistema de irrigação *indoor* apresentaram valores menores do que na estação do outono, porém todos estavam classificados para ASABE (1986) entre bom e excelente. A discrepância ocorreu, na mesma comparação, para os valores de CUD que ficaram entre 75%, o que é considerado como regular para a mesma classificação, exceto de 81,15 % (bom) para o último horário de coleta.

Tabela 18. Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema *indoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto e dias nublados

Horário (horas)	Condições do céu	CUC (%)		CUD (%)		Irradiação Whm ⁻²	
		Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV
9:45	Céu aberto	85,11	4,91	72,57	10,35	962,66	9,70
11:00		85,01	6,77	71,90	14,30	1024,43	6,60
13:30		88,99	3,95	75,39	9,65	884,25	9,07
15:00		90,04	1,30	81,15	2,73	959,42	12,02
9:45	Parcialmente nublado	83,09	4,69	67,99	11,43	858,16	15,32
11:00		82,25	5,04	66,78	11,97	854,34	5,77
13:30		83,60	3,02	68,03	7,12	849,55	20,15
15:00		79,56	7,86	63,16	14,76	801,84	17,64

A maior irradiação ocorreu no segundo horário para céu aberto com 1024, 43 Whm⁻² e às 9h45min para os dias parcialmente nublados com 858,16 Whm⁻² de irradiação. Percebe-se que a irradiação não influenciou diretamente no

comportamento de valores de CUC (90,04 %) e CUD (81,15 %), estes foram máximos quando a irradiação foi de 959,42 Whm⁻². E, uniformidade mínimas, com 79,56 % e 63,16%, quando a irradiação foi mínima 801,84 Whm⁻².

A variabilidade apresentada entre os valores máximos e mínimos de CUC e CUD neste trabalho pode ser observada também em Frigo et al. (2016), sendo que o mínimo foi de 74,60 e o máximo 93,73 em um trabalho com aspersores utilizando energia eólica. Essa variação se justifica pela intermitência do vento, bem como por consequência da geração energética.

O desempenho do sistema de irrigação por gotejamento *indoor* CUC e CUD e eficiência do sistema solar fotovoltaico para a estação da primavera estão apresentados na Figura 79.

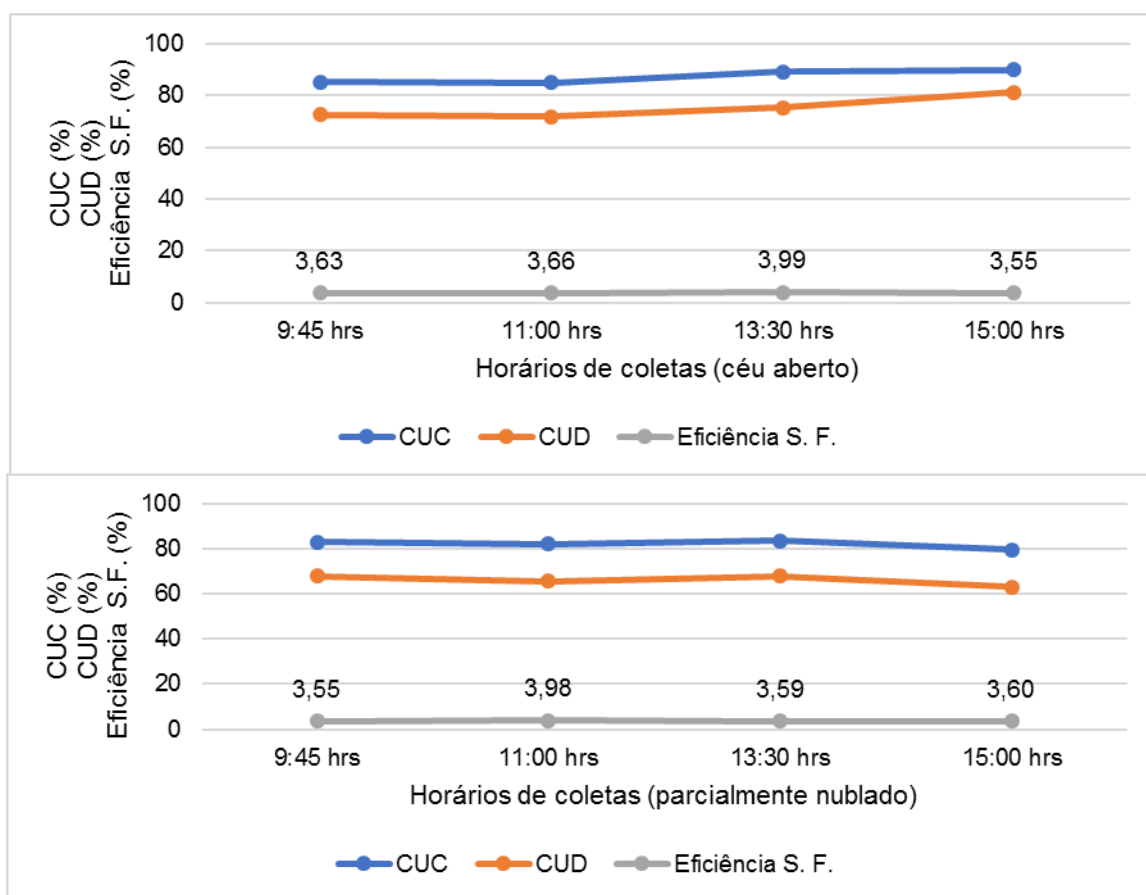


Figura 79. Médias do CUC (%), CUD (%) e Eficiência solar fotovoltaica (%) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* na primavera.

Os maiores valores de uniformidade de CUC e CUD do sistema de irrigação *indoor* por gotejamento, para dias de céu aberto, aconteceram no horário de 15h 90,04 % e 81,15 % e, conseqüentemente, apresentaram a menor eficiência do

sistema solar fotovoltaica de 3,55 %. Para os dias parcialmente nublado os valores de uniformidade foram de 83,60 % e 68,03 %, respectivamente, e neste momento a eficiência do sistema solar fotovoltaica 3,59 %.

No segundo horário, nos dias de céu aberto, foram encontrados os valores de 85,01 % e 71,904 para CUC e CUD. Nesse caso, a eficiência do sistema solar fotovoltaico foi de 3,67 %. Nas condições de céu parcialmente nublado, os menores valores de CUC e CUD ocorreram no último horário com 79,56 % e 63,16 % com uma eficiência de sistema solar fotovoltaica de 3,60 %.

Em relação à eficiência do sistema solar fotovoltaico, identificou-se porcentagens aproximadas que apresentaram diferentes valores de CUC e CUD, apontando uma não correlação entre as variáveis estudadas. O mesmo ocorreu para a energia consumida pelo sistema fotovoltaico representado na Figura 80.

Observou-se que os valores de energia consumida em dias de céu aberto foram maiores que em dias parcialmente nublados. Entretanto, essa diferença entre as condições de céu foi mínima, como no trabalho de Zago (2016), que encontrou 15 Wh (céu aberto) e 11 Wh (nublado).

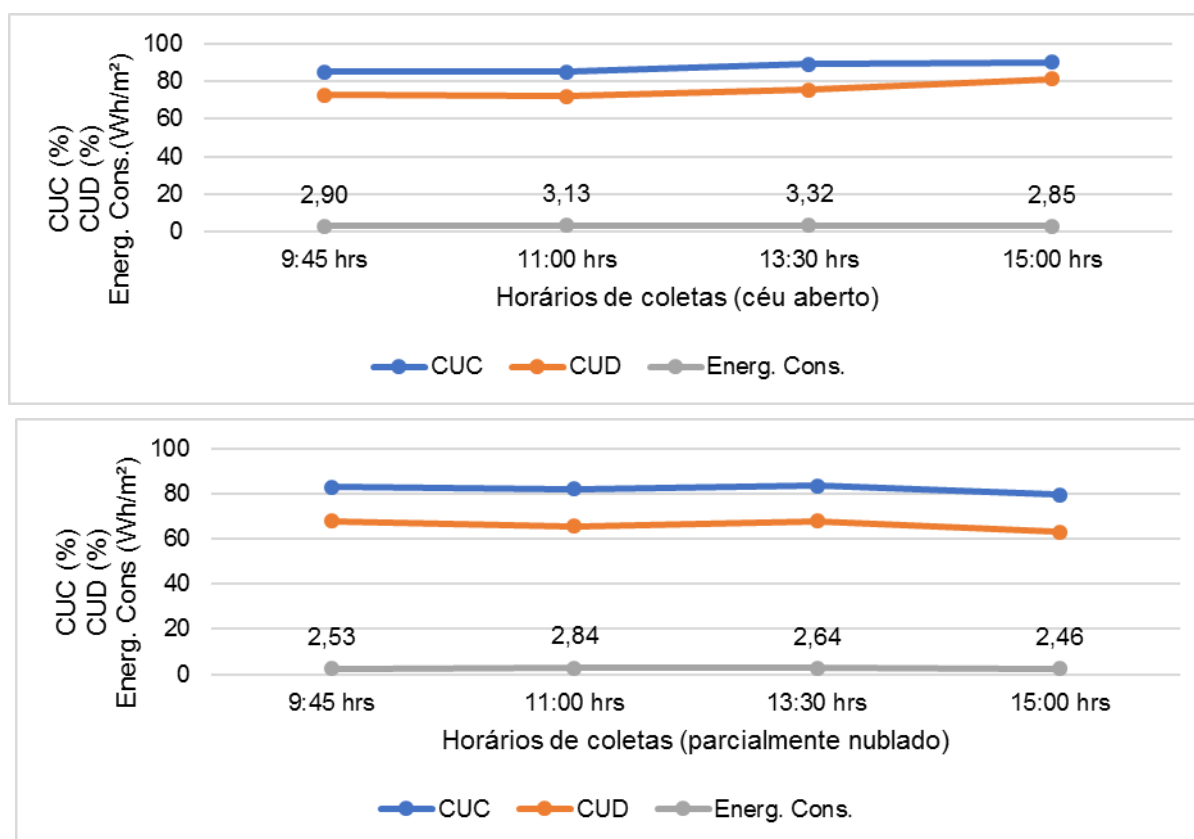


Figura 80. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* na primavera.

As variáveis energia consumida e a eficiência solar fotovoltaica para as condições de céu aberto foram similares para a estação da primavera, pois a maior média de $3,32 \text{ Wh.m}^{-2}$ para o terceiro horário também foi o momento de maior eficiência com $3,989 \%$. Nos dias de condição de céu parcialmente nublado, a energia consumida foi maior no segundo horário com $2,838 \text{ Wh.m}^{-2}$, momento em que a eficiência do sistema solar fotovoltaico foi o maior valor obtido de $3,98 \%$.

Os valores de CUC e CUD máximo do sistema de irrigação *indoor* por gotejamento para dias de céu aberto aconteceram no momento de menor energia consumida. Nas coletas de parcialmente nublado, o melhor índice de uniformidade também não ocorreu no momento de maior energia consumida pelo sistema de energia solar fotovoltaica, o que representa a não interação direta do sistema de energia solar na irrigação por gotejamento.

As variações de energia consumida e a eficiência do sistema solar fotovoltaica foram mínimas, conseqüentemente, no mesmo horário das 15h com $2,85 \text{ Wh/m}^2$ e $3,55 \%$ para os dias de céu aberto. Em dias de condições de céu parcialmente nublado, a menor energia consumida também foi no período das 15h com $2,46 \text{ Wh.m}^{-2}$, porém sem a menor eficiência encontrada no sistema.

Os dados de energia disponível horária diária para dias com céu aberto e parcialmente nublados estão representados na Figura 81. Para a primeira condição de céu, o maior valor de energia disponível para o sistema solar fotovoltaico ocorreu no segundo horário do dia com $85,37 \text{ Wh.m}^{-2}$, momento no qual foram encontrados os menores valores de CUC e CUD. Ainda o menor valor de energia disponível registrada foi nos horários das 15h com $79,95 \text{ wh.m}^{-2}$. Vale frisar que ocorreu de maneira simultânea com os maiores índices de CUC e CUD do sistema de irrigação por gotejamento. Nesse sentido, assim como no sistema *indoor* de irrigação por gotejamento da estação do outono em dias de céu aberto, a energia solar não influenciou de forma direta no desempenho da uniformidade na primavera.

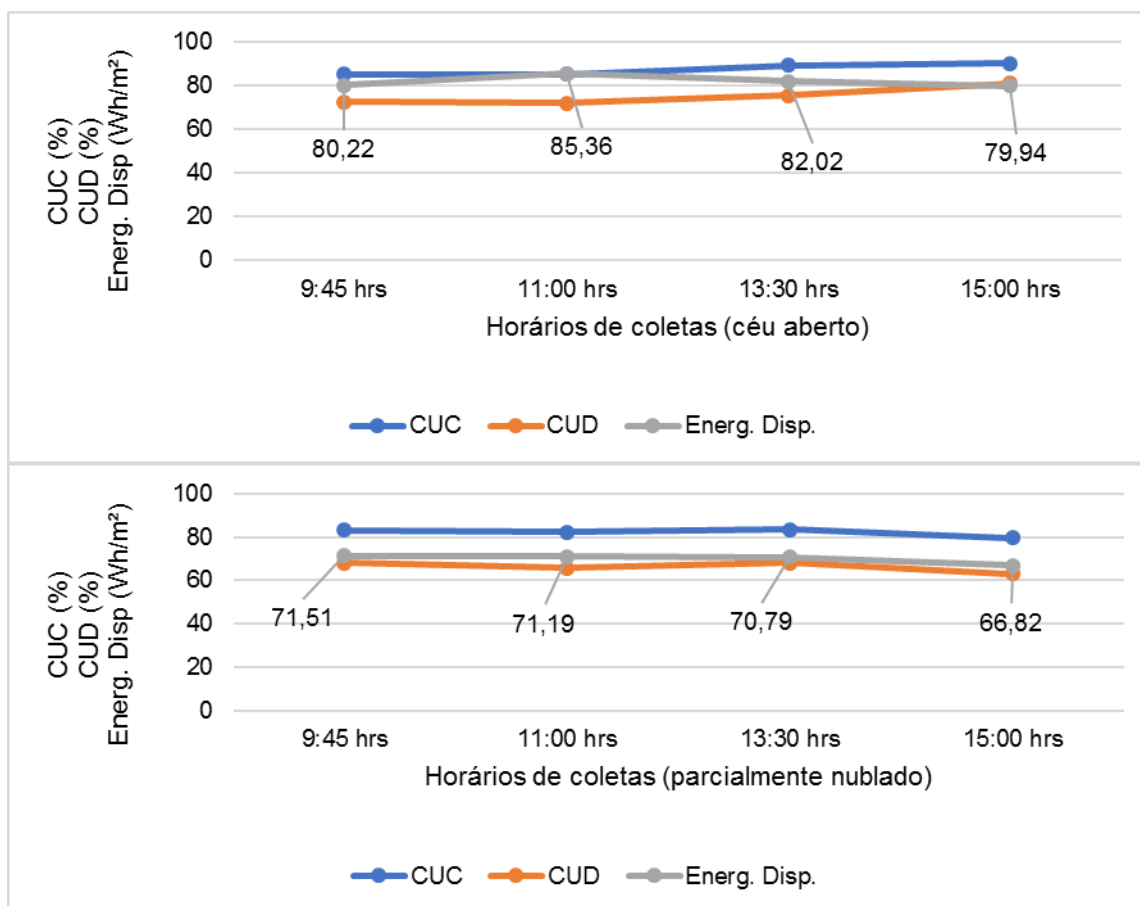


Figura 81. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia disponível (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *indoor* na primavera.

Já nos dias parcialmente nublados, o comportamento da energia disponível fotovoltaico influenciou nas uniformidades encontradas. A menor energia disponível diário de 66,82 Wh/m² ocorreu no último horário do dia e obteve a menor média de uniformidade para CUC e CUD. Consequentemente, a maior energia disponível encontrada foi de 83,60 Wh/m² no primeiro horário da tarde, momento em que a uniformidade era máxima para o CUC e CUD.

4.4.2 Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento com um sistema de bombeamento fotovoltaico amorfo

4.4.2.1 Análise do sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* montado na estação do outono

Os valores descritivos estão na Tabela 19 para CUC (%), CUD (%) e irradiação Whm^{-2} , na estação do outono, para os dias de céu aberto e dias parcialmente nublados em função do horário da coleta. Os coeficientes de variação, independente do horário e condições de céu, foram baixos para as uniformidades. Os maiores valores de coeficiente de variação ficaram para a irradiação dos dias parcialmente nublados com 35,82 % às 13h30min.

Tabela 19. Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação do outono para os dias de céu aberto e para dias nublados.

Horário (horas)	Condições do céu	CUC (%)		CUD (%)		Irradiação Whm^{-2}	
		Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV
9:45	Céu aberto	92,30	0,91	85,02	1,65	1186,60	14,11
11:00		92,75	2,72	87,72	5,24	1158,32	10,09
13:30		90,01	5,46	84,43	11,60	1278,81	13,09
15:00		92,87	2,47	86,62	4,40	1119,37	10,53
9:45	Parcialmente nublado	91,15	3,60	82,84	8,14	970,66	33,94
11:00		91,30	5,65	82,81	12,84	958,06	21,60
13:30		93,30	1,00	83,40	11,48	955,94	35,82
15:00		89,72	6,63	82,52	9,67	1102,63	11,95

Para ASABE (1996), a classificação dos parâmetros CUC foram de excelente e de regular a excelente para CUD (Tabela 19), assim como apresentado na estação do outono para o sistema *indoor* de irrigação por gotejamento. Verifica-se que

valores são considerados de alto desempenho, tal como os encontrados por Zago (2016) ao utilizar um sistema de bombeamento fotovoltaico policristalino. O que demonstra que, apesar do sistema amorfo possuir uma menor eficiência de conversão energética (14 % em laboratório segundo FRAUNHOFER INSTITUTE, 2018) do que módulos de silício monocristalino e policristalino, ainda é relativamente atrativo para os sistemas de irrigação por gotejamento na agricultura.

A maior média horária para irradiação aconteceu às 13h30min para céu aberto com $1278,81 \text{ Whm}^{-2}$, momento em que foram identificados os menores valores de CUC (90,01 %) e CUD (84,43 %). A menor irradiação ocorreu com $955,94 \text{ Whm}^{-2}$ às 13h30min no parcialmente nublado, para os menores valores de CUC e CUD, respectivamente, 93,30 % e 83,40%. Mesmo a irradiação tendo apresentado este comportamento para os máximos e mínimos, isso não ocorreu de forma proporcional, mostrando novamente a não dependência da irradiação para os valores de uniformidade.

O maior valor apresentado de CUC e CUD para a condição de céu aberto ocorreu no horário das 15h com 92,87 % e 86,62 %, respectivamente, momento em que a eficiência solar fotovoltaica era de 2,492 % e a menor apontada em função dos horários. A maior eficiência do sistema solar fotovoltaico (Figura 82) para as condições de céu parcialmente nublado foi no horário das 13h30min com os maiores valores de CUC (93,30 %) e CUD (83,40 %).

Assim como nos estudos anteriores deste trabalho, diferentes valores de eficiência solar fotovoltaica apresentaram valores próximos de CUC e CUD, reforçando a ideia de não relação entre as variáveis (Figura 82). O mesmo efeito ocorreu para Andrade (2013) em um sistema de bombeamento fotovoltaico na operação de um microaspersor sem armazenamento, no qual a energia gerada não obteve diferenças significativas nos diversos horários do dia (Figura 83).

Ainda, para Andrade (2013), os valores do CUC variaram entre 19,23% e 32,85% e o CUD entre 0% e 9,54%, valores menores do que os encontrados por gotejamento, porém também com baixa influência da potência gerada pelo painel fotovoltaico no sistema de irrigação por microaspersão.

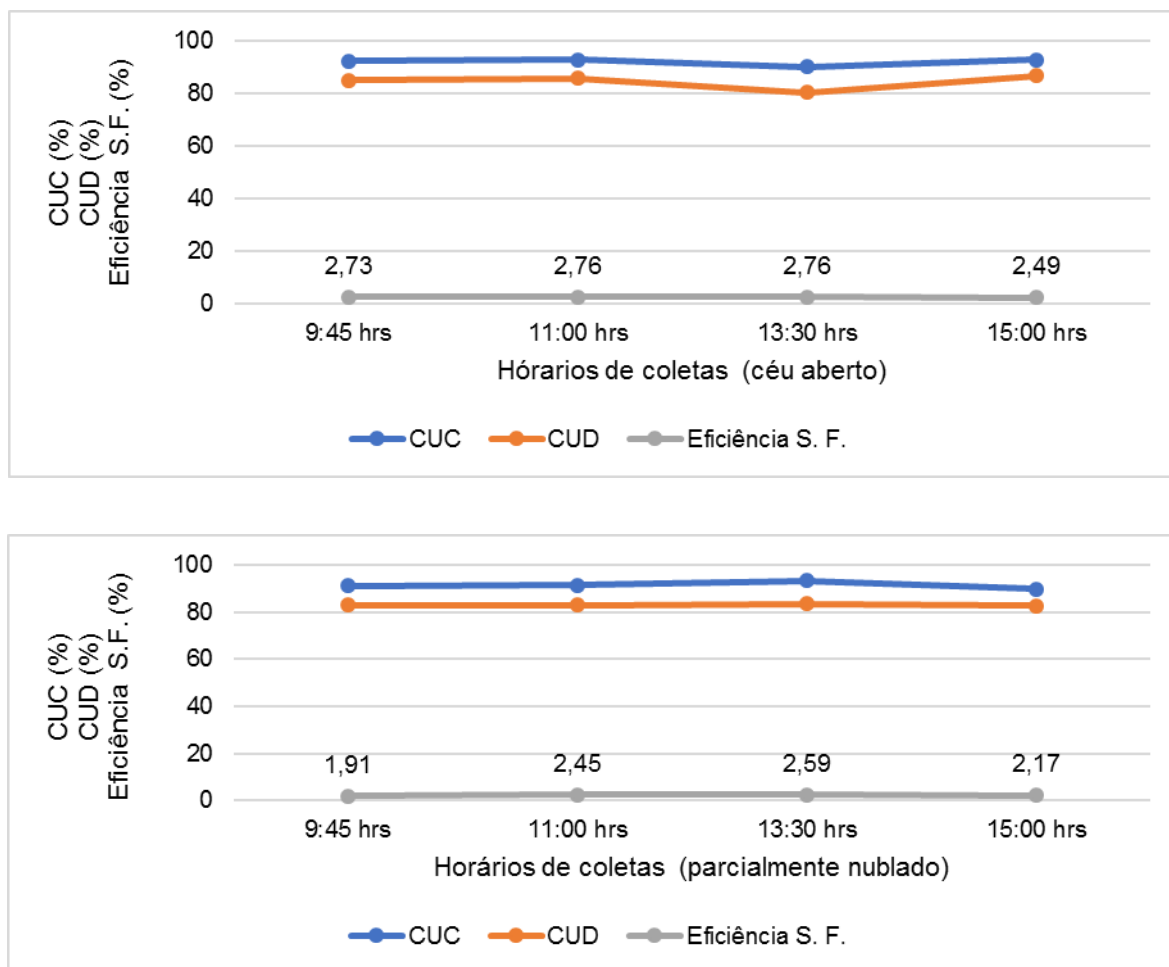


Figura 82. Médias do CUC (%), CUD (%) e Eficiência solar fotovoltaica (%) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* no outono.

O mínimo encontrado para a uniformidade de CUC e CUD nos dias de céu aberto foi no horário das 13h30min com 90,08 % e 92,87 %, respectivamente, com uma eficiência do sistema solar fotovoltaica de 2,76 %. Para os horários de dias de céu parcialmente nublado foi no horário das 15h com o CUC de 89,72 % e 82,52 % para o CUD e eficiência do sistema solar fotovoltaico de 2,17 %.

As medidas de CUC e CUD para o sistema de irrigação *outdoor* por gotejamento na estação do outono, na condição de céu aberto, apresentaram como maiores valores de 92,87 % e 86,62 % para o horário das 15h, no qual foram encontrados, para o mesmo momento, a menor eficiência do sistema solar fotovoltaico com 2,49 %. Já para as condições de céu parcialmente nublado, a eficiência solar fotovoltaica foi máxima horária diária de 2,59 % para o terceiro

horário em que o CUC e o CUD foram os maiores encontrados de 93,30 % e 83,40 %.

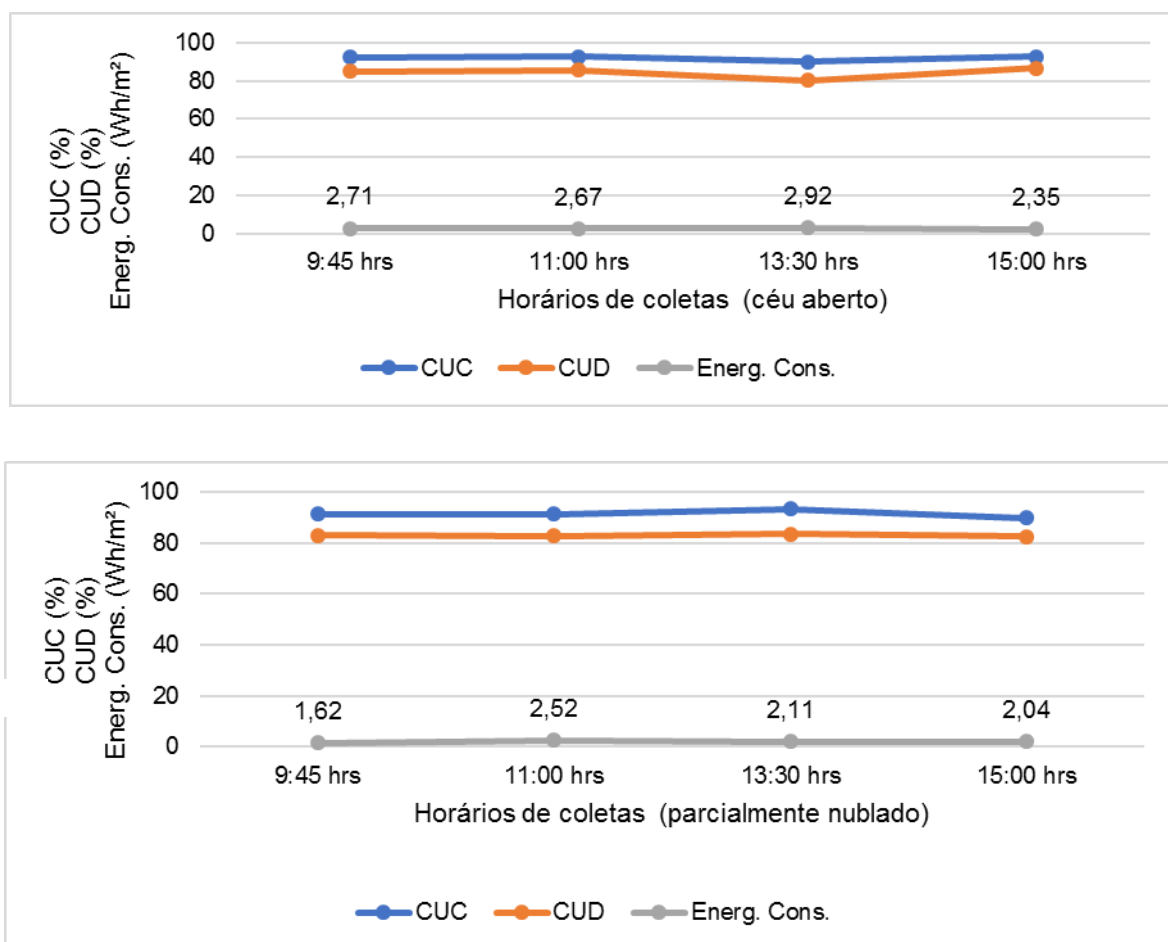


Figura 83. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh.m⁻²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* no outono.

O menor valor de CUC (90,07 %) e do CUD (80,43 %) para condições de céu aberto aconteceram no terceiro horário com o valor de eficiência encontrado pelo sistema solar fotovoltaico de 2,76 %. O menor valor de CUC e CUD para os dias parcialmente nublados aconteceram no horário das 15h com 89,72 e 82,52, com 2,45 % de eficiência do sistema solar fotovoltaico.

O comportamento da eficiência do sistema solar fotovoltaica, nos dias de céu aberto, foi maior nos horários das 11h e 13h com 2,76 %, respectivamente. Nos dias de condição de céu parcialmente nublado, tais horários representaram a maior eficiência do sistema solar fotovoltaico com 2,45 % e 2,59 %. Zago (2016) encontrou

maiores valores de eficiência solar fotovoltaica em módulos policristalinos em dias caracterizados como nublado com valores de até 9,74 %.

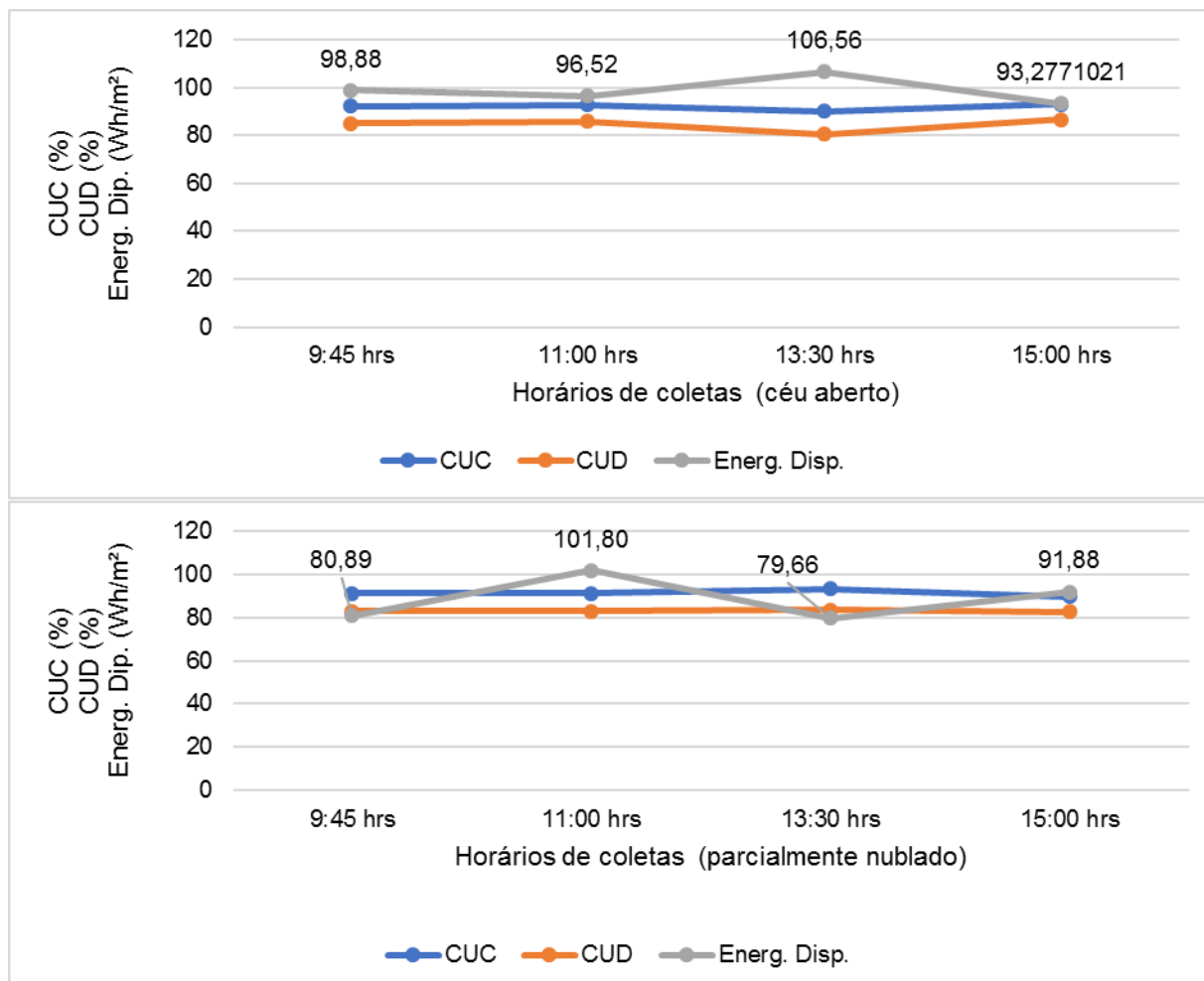


Figura 84. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia disponível (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* no outono.

A energia consumida pelo sistema solar fotovoltaico foi maior para os dias de céu aberto no terceiro horário com $2,92 \text{ Wh.m}^{-2}$, consequentemente, o maior valor de energia disponível de $106,56 \text{ Wh.m}^{-2}$ (Figura 84), no qual se obteve o menor índice de CUC e CUD. A menor energia consumida ocorreu no último horário da tarde com $2,35 \text{ Wh.m}^{-2}$, momento de maior valor para CUC e CUD.

Os dias parcialmente nublados apresentaram o maior valor de energia consumida ($2,52 \text{ Wh.m}^{-2}$) para o horário de 11h, momento em que também se obteve a maior energia disponível com $101,80 \text{ Wh.m}^{-2}$ (Figura 84), quando o CUC e

CUD foram de 91,30 % e 82,81 %. O menor valor de energia consumida aconteceu no primeiro horário do dia com 1,62 Wh.m⁻².

4.2.2.2 Análise do sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* montado na estação da primavera

Análise descritiva para os valores médias horárias de CUC, CUD e irradiação solar referente ao experimento de irrigação *outdoor* montado na primavera está na Tabela 20. Os coeficientes de variações pelos horários e condições de céu foram pequenos com o máximo de 20,37 % para CUD céu aberto e primeiro horário, bem como de 20,27 % para a irradiação às 13h30min.

Tabela 20. Médias horárias de CUC (%) e CUD (%) para o sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento na estação da primavera para os dias de céu aberto e para dias nublados.

Horário (horas)	Condições do céu	CUC (%)		CUD (%)		Irradiação Whm ⁻²	
		Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV	Média do dia (%)	CV
9:45	Céu aberto	83,77	8,73	68,90	20,37	981,51	9,16
11:00		87,99	2,95	77,24	5,91	1070,45	7,48
13:30		87,15	3,94	72,67	5,69	958,97	20,27
15:00		88,22	1,69	77,88	4,78	972,37	13,43
9:45	Parcialmente nublado	86,47	2,21	74,23	4,89	837,71	5,53
11:00		89,81	1,55	79,86	3,48	860,55	5,44
13:30		89,41	4,07	72,47	3,38	985,46	6,56
15:00		88,40	8,97	73,98	18,77	755,46	6,08

Os valores de CUC, conforme ASABE (1986), foram considerados bons, pois ficaram na faixa de 80 a 90 %. Já o CUD para a mesma classificação de regular a bom (Tabela 20). Em comparação ao sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento estudado no outono e na primavera, apresentou menores valores de uniformidade.

A maior irradiação aconteceu na condição de céu aberto com 1070,45 Whm⁻² para o horário das 11h, momento em o CUC era de 87,99 % e o CUD de 77, 24 %.

A menor irradiação aconteceu em condições parcialmente nublado no último horário do dia com $755,46 \text{ Whm}^{-2}$ com o CUC de 88,40 % e 73,98 % para CUD. Nesse caso, também foi possível perceber a não correlação do fator irradiação com o sistema hidráulico de irrigação, bem como quanto à eficiência do sistema solar fotovoltaico (Figura 85).

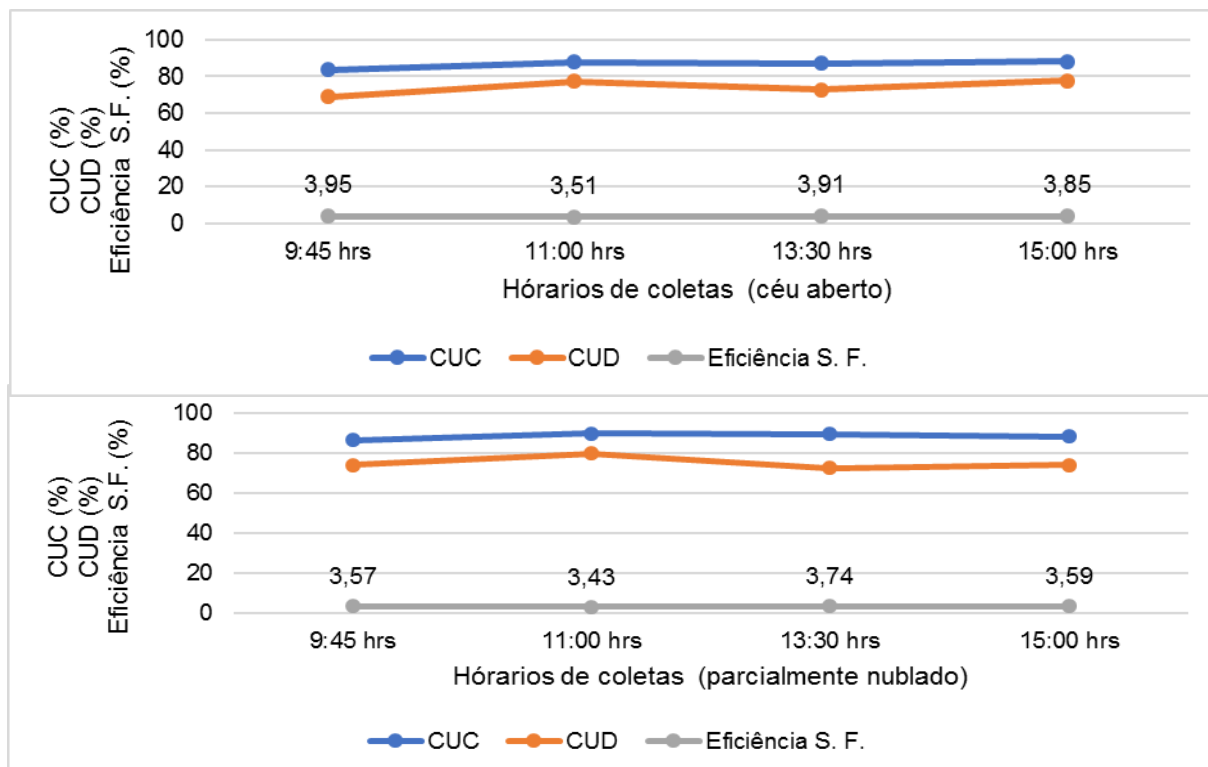


Figura 85. Médias do CUC (%), CUD (%) e Eficiência (%) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* na primavera.

Para a estação da primavera, os valores maiores de CUC e CUD (Figura 85) para dias de céu aberto aconteceram no último horário do dia com 88,221 % e 77,874 %, em que a eficiência apresentava o valor de 3,851%. O menor valor de CUC e CUD do sistema *outdoor* de irrigação por gotejamento nos dias de céu aberto aconteceu no primeiro horário, momento em que se obteve a maior eficiência do sistema solar fotovoltaico de 3,95 %.

Nos dias de condição de parcialmente nublado, o horário das 11h apresentou o maior valor de CUC (89,81 %) e CUD (79,86) com 3,43 % de eficiência para o sistema solar fotovoltaico, que representa o máximo valor diário encontrado. O menor valor para CUD foi encontrado no primeiro horário com 86,47 % e CUD no terceiro horário com 72,48 %, quando a eficiência do sistema solar fotovoltaico era de 3,57 % e 3,74 %, valor máximo horário encontrado diário, respectivamente.

A energia consumida pelo sistema solar fotovoltaico e os valores para CUC e CUD estão representados na Figura 86.

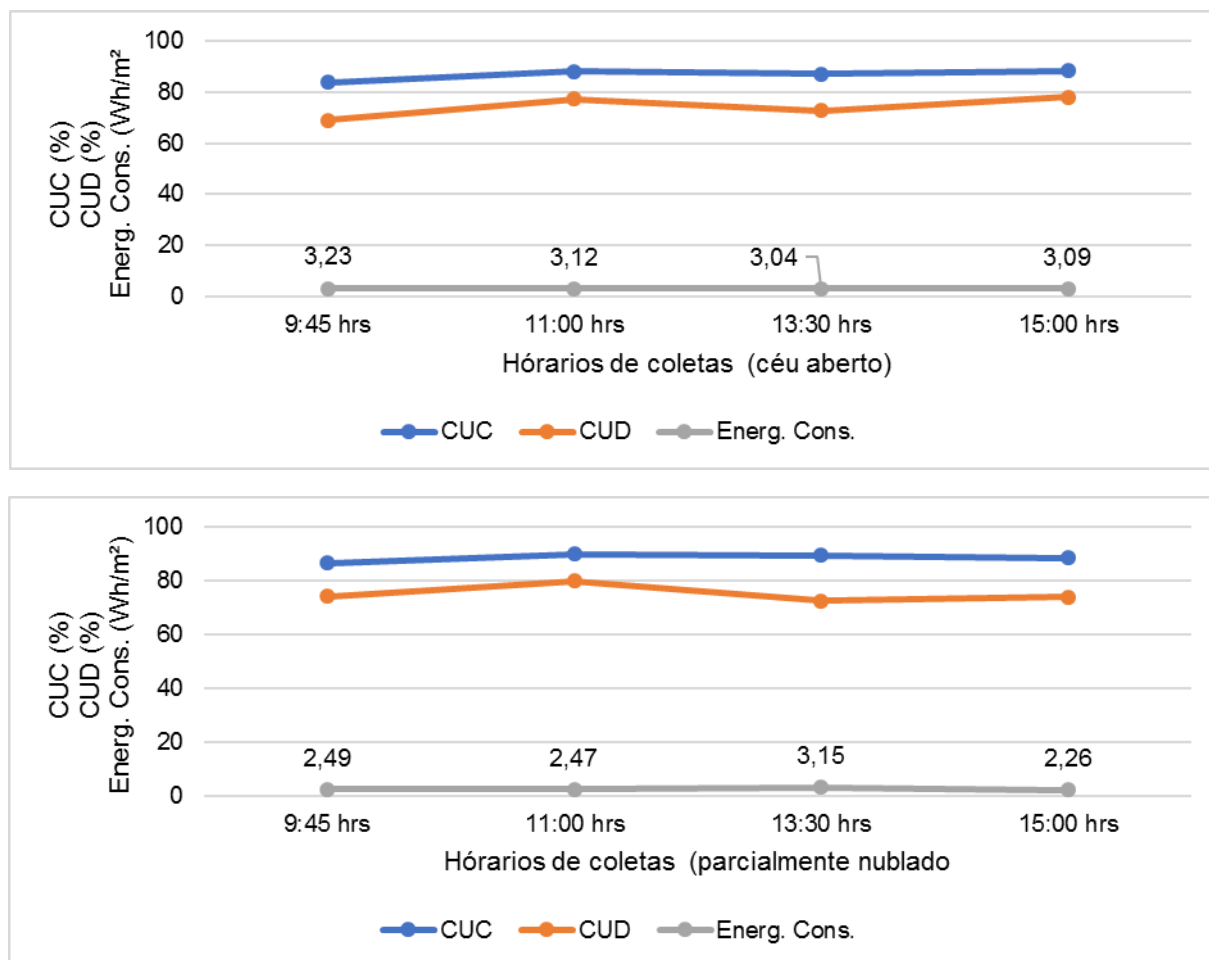


Figura 86. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia consumida (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* na primavera.

No sistema solar fotovoltaico $3,23 \text{ Wh.m}^{-2}$ a maior energia foi identificada nos dias de céu aberto no primeiro horário de coleta do dia quando se obteve os menores valores de CUC e CUD para o sistema de irrigação *outdoor*. Nos dias de condição de céu parcialmente nublado aconteceu nos horários das 13h com o valor de $3,15 \text{ Wh.m}^{-2}$, momento em que apresento também a maior energia disponível de $83,79 \text{ Wh/m}^2$ (Figura 87).

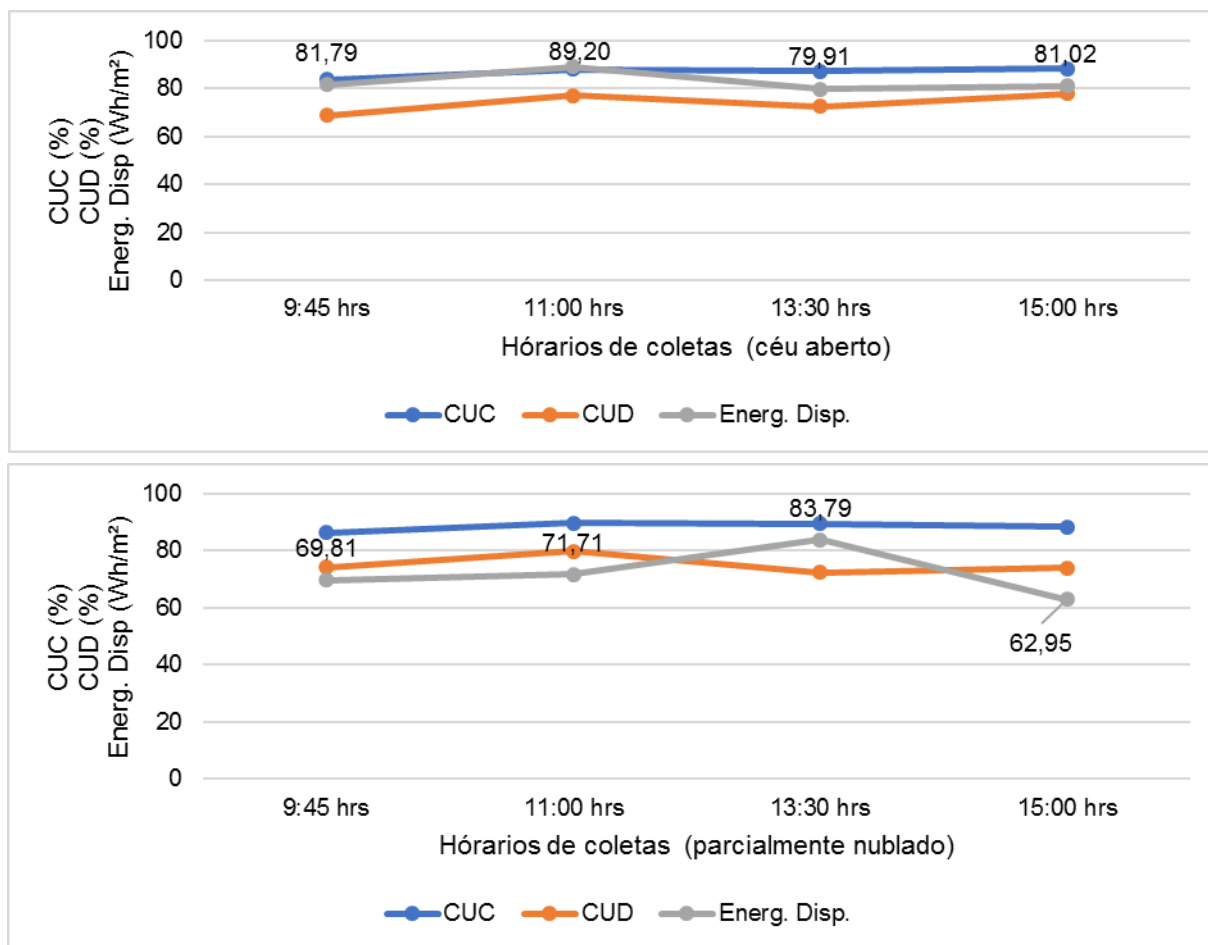


Figura 87. Médias do CUC (%), CUD (%) e Energia disponível (Wh/m²) pelos horários de coleta de céu aberto e parcialmente nublado para o sistema de irrigação por gotejamento *outdoor* na primavera.

Os menores valores de energia consumida para dias de céu aberto pelo sistema solar fotovoltaico foram de 3,04 Wh.m⁻², bem como no momento em que a energia disponível em Wh.m⁻² foi de 79,91, com a eficiência do sistema solar fotovoltaico de 3,91 % valor muito próximo da máxima obtida e com o CUC e CUD de 87,15 % e 72,67 %. Para dias com a condição de céu parcialmente nublado, a energia consumida mínima foi no último horário de coleta do dia com o valor de 2,26 Wh/m², momento também em que se obteve a menor energia disponível de 62,95 Wh.m⁻² e CUC (88,40 %) e CUD (73,98 %).

Assim, como nos tópicos anteriores, o sistema de irrigação por gotejamento não apresentou comportamento similar ao de sistema solar fotovoltaico para dias de céu aberto ou parcialmente nublados. Diferentemente de Haupenthal (2018), em que as condições de céu influenciaram nos valores de uniformidade de CUC e CUD recomendando o uso de sistema de irrigação por gotejamento com sistema solar

fotovoltaico diretamente conectado à bomba em céu aberto e com poucas nuvens, por conta da menor variabilidade em relação ao gráfico de controle e maior uniformidade de distribuição de água.

5. CONCLUSÕES

Concluiu-se que o sistema de irrigação na condição *indoor*, para os dias de céu aberto, apresentou maiores valores médios de coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD) na estação do outono, com valores de 91,01 % e 83,73 %, respectivamente. Para os dias de céu nublado, os maiores valores do CUC e CUD foram obtidos também no outono com valores de 91 % e 83,45%, respectivamente. Na condição *outdoor* para os dias de céu aberto e parcialmente nublados, as médias de CUC e CUD foram maiores também no outono, com 92,87 % e 93,30 %; 87,72 % e 83,40, respectivamente.

Sendo assim, no tocante à energia disponível que, nas condições *indoor*, foi maior na estação do outono de céu aberto $4,02 \text{ Whm}^{-2}$ e para dias de céu parcialmente nublados também na estação do outono com $2,93 \text{ Whm}^{-2}$. Para o sistema *outdoor*, os maiores valores foram de $3,23 \text{ Whm}^{-2}$ na condição de céu aberto e parcialmente nublados $3,15 \text{ Whm}^{-2}$, ambos na primavera.

Para a análise da eficiência do sistema solar a partir do sistema *indoor*, a maior média foi de 4,39 % para dias de céu aberto no período do outono. Já para dias com céu parcialmente nublado, foi de 3,98 % na primavera. No sistema *outdoor*, para os dias com céu aberto e parcialmente nublados, aconteceram na primavera com 3,95 % e 3,59 %.

Os métodos de coletas representaram variações nos valores de CUC e CUD com maiores médias quando se coletou todas as vazões dos emissores, seguido pelo método Denículi et al. (1980), e por fim o método Keller e Karmeli (1975).

O sistema solar fotovoltaico amorfo não apresentou influência direta no comportamento do sistema de irrigação por gotejamento, sendo os parâmetros hidráulicos mais efetivos no comportamento global do sistema.

6.REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração. Fonte de Energia exploradas no Brasil. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em 01 mai. 2017.

AKIKUR, R. K. et al. Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 738-752, 2013.

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. **Sinergia, São Paulo**, v. 15, n. 4, p. 311-318, 2014.

AL-WAELI, A. H. et al. Evaluation of the economic and environmental aspects of using photovoltaic water pumping system. In: **9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications**. Springer, Singapore, 2017. p. 715-723.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. **Field evaluation of micro-irrigation Systems**. St. Joseph, p. 792-7.1996.

ANDRADE, C. de L. T. de; BRITO, R. A. L. **Métodos de irrigação**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_16820051120.html>. Acesso em: 16 nov. 2018.

ANDRADE, M. G. **Efeito De Um Sistema De Bombeamento De Água Fotovoltaico Na Operação De Um Microaspersor**. Dissertação. Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

ANDRADE, M.G. de. **Processo da irrigação localizada utilizando o controle estatístico de qualidade**. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12: 02.08-005. **Sistema de irrigação por aspersão pivô central, caracterização de desempenho do método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1985. 22 p.

AVRUTIN, V.; IZYUMSKAYA, N.; MORKOÇ, H. Semiconductor solar cells: Recent progress in terrestrial applications. **Superlattices and Microstructures**, v. 49, p. 337-364, 2011.

BARBOSA FILHO, et al. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: Impactos ambientais e políticas públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 628-642, 2015.

BASSO, L. H. et al. Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, vol.30, n.2, p.332-344, jan./feb. 2010.

BATTAGLIA, C.; CUEVAS, A.; DE WOLF, S. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. **Energy & Environmental Science**, v. 9, n. 5, p. 1552-1576, 2016.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 596p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625p.

BORSSOI, A. L. et al. Uniformidade de aplicação de água e fertirrigação em um conjunto de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 4, 2016.

BOYD, M.T. et al. Evaluation and validation of equivalent circuit photovoltaic solar cell performance models. **Journal of solar energy engineering**, v. 133, n. 2, p. 021005, 2011.

BRITO, C. F. B.; FONSECA, V. A.; SANTOS, M. R. Desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento com aplicação da água salina. **Revista Agrotecnologia, Ipameri**, v. 7, n. 1, p. 10-17, 2016.

BURNEY, J. et al. Solar-powered drip irrigation enhances food security in the Sudano-Sahel. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 5, p. 1848-1853, 2010.

CAMPBELL SCIENTIFIC CMP3-L. Instruction manual, Cmp3-L, Pyranometer.Rev. 2/16. 2018. Disponível em: <
<https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cmp3.pdf>> Acesso em: jul. 2018.

CARARO, D. C.; BOTREL, T. A.; HILLS, D. J.; LEVERENZ, H. L. Analysis Of Clogging In Drip Emitters During Wastewater Irrigation. **Applied Engineering In Agriculture**, St. Joseph, V. 22, n. 2, p. 251-257, 2006

CARNEIRO, T. A. et al. Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, 2015.

CARUZZO, A.; NOGUEIRA, L. A. H. Avaliação da eficiência energética na iluminação pública: proposta de modelagem considerando a variabilidade climática. **Revista Produção On-line**, v. 15, n. 4, p. 1399-1425, 2015.

CASTILLO, C. P.; SILVA, F. B.; LAVALLE, C. An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. **Energy policy**, v. 88, p. 86-99, 2016.

CEYLAN, İ. et al. Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 96-1

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025, 2010.

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

CHARR, L. E.; LAMONT, L.A; ZEIN, N. E. Review of photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p. 2165-2175, 2011.

CHAUHAN, A.; SAINI, R. P. Renewable energy based off-grid rural electrification in Uttarakhand state of India: Technology options, modelling method, barriers and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 662-681, 2015.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkley: University of California, 1942. 124 p.

COELHO, E. F. et al. Sistemas de irrigação em agricultura familiar: eficiência e potencialidade de adoção. In: **Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., 2015, Fortaleza. Anais... Fortaleza: INI, 2015.

CRESESB CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>> Acesso em: 26 set. 2016.

CUNHA, F. F. et al. Uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação por gotejamento utilizando água residuária da despola dos frutos do cafeeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 1-5, 2006.

DA CUNHA KEMERICH, P. D. et al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 241-247, 2016.

DA SILVA ALMEIDA, Roger Luiz; CHAVES, Lucia Helena Garófalo; DA SILVA ALMEIDA FILHO, Roger Luiz. Avaliação hidráulica em sistemas de irrigação por gotejamento com duas linhas laterais. **Scientia Plena**, v. 11, n. 3, 2015.

DA SILVA, B. B. et al. Utilização de gráficos de controle estatístico na irrigação. **REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, p. 97-108, 2014.

DA SILVA, César Antônio; DA SILVA, Cícero José. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista científica eletrônica de agronomia**, 2005.

DAL BEM, J. C. T. et al. Solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 1, p. 50-57, 2016.

DASSIE, A. M. Programa Luz para Todos: avaliação da cobertura com os dados disponíveis. **Anais**, p. 1-21, 2017.

DE CARVALHO, C. M. et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura da goiaba. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 36-46, 2018.

DE SOUZA, I. C.; TORRES, A.C.; SENNA, P. R. Energia Solar–Análise comparativa entre Brasil e Alemanha. In: **IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Salvador**, 2013.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÉBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 27, n. 150, p 155-162, 1980.

DEVABHAKTUNI V.; ALAM, M.; DEPURU S.S.S.R; GREEN R.C.; NIMS D., NEAR C. Solar energy: trends and enabling technologies. **Renew Sustain Energy Rev** 2013;19:555–64.

DUARTE, K. A. et al. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão na cultura da atemóia (ANNONA SSP.). In: **INOVAGRI**, 2012, Fortaleza.

EPE. Balanço Energético Nacional 2018: Ano Base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf> > Acesso em: 10.jul.2018

FADIGAS, E.A.F.A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. PEA–2420 Produção de Energia. GEPEA - Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo – USP, 2015.

FAO, GIZ 2018 Final report: International workshop on Prospects for solar-powered irrigation system (SPIS) in developing countries. (Rome: Food and Agriculture of United Nations Organization).

FERNANDES, Â. I. et al. Avaliação de um sistema de irrigação pelas metodologias de Keller e Karmeli, e de Denículi em citros irrigados por gotejamento. **Revista brasileira de agricultura irrigada-rbal**, v. 6, n. 2, 2013.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018.

FORTES, R.R. A. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela**. Dissertação. Engenharia Elétrica. UNESP, Ilha Solteira, 2016.

FRAINDENRAICH, N. et al. Energia Solar Fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, Mauricio (Org). Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Cenergia-COPPEUFRJ/Interciência, 2003.

FRANCISCO, P. R. M.; CARDOSO, A.; SILVA, J. V. N. Tecnologias sociais para o desenvolvimento do semiárido: pedagogia de assessoria técnica social e ambiental. **Polêmica**, v. 15, n. 1, p. 28 a 38, 2015.

FRAUNHOFER INSTITUTE. Photovoltaics Report. Disponível em: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>. Acesso em 11 jul. 2018.

FRIGO, J. P. et al. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-Pr. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 318-327, 2013.

FRIGO, J.P. et al. CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO. 2014.

FRIGO, JIAM PIRES et al. Comparação Entre Gráficos De Controle De Shewhart, Cusum E Mmep No Processo De Irrigação Por Aspersão Convencional. **IRRIGA**, v. 1, n. 01, p. 56-70, 2016.

FRIZZONE, José Antonio. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista brasileira de agricultura irrigada-rbai**, v. 1, n. 1, 2013.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. Insolação, radiação solar global e radiação líquida no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 2, p. 49-83, 2018.

GHAFOOR, A.; MUNIR, A. Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 496-502, 2015.

GNOATTO, E. et al. Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, n. 2, 2008.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H.W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. **Mater Sci Eng: R: Rep** 2003;40(1):1–46.

GRAH, V. de F. et al. Solução Alternativa para Bombeamento de Água e Automação da Irrigação Sem O Uso de Energia Elétrica. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 309, 2018.

GRAND VIEW RESEARCH. Solar Pumps Market expected to reach USD 3.63 billion by 2022. Retrieved, 2015 . Disponível em :<<http://www.grandviewresearch.com/press-release/solar-pumps-market>> Acesso em: 02 mai. 2018.

GREEN, M. A. ; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y. ; WARTA, W. ; DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (version 45). **Prog. Photovolt. Res. Appl.** 23, 1–9 (2015). doi: 10.1002/pip.2573

GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA,W.;DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (version 39). **Prog. Photovolt: Res. Appl.** 20, p. 12-20, 2012.

GREENPRO. Energia Fotovoltaica – **Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalações**. União Europeia: ALTENER, 2004.

GUVEN, G.; SULUN, Y. Pre-service teachers' knowledge and awareness about renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 663-668, 2017.

HASHIMOTO I. Present status of research and development of PV technology in Japan. **In: Proceedings of the 3rd IEEE world conference on photovoltaic energy conference**; 2003. p. 2522–6.

HAUPENTHAL, S. W. et al. Evaluation of a Photovoltaic Energy System Applied to a Drip Irrigation System. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 8, p. 43, 2018.

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; RODRIGUES, L. N.; MELLO, E. L.; GONCALVES, M. P.; LINS, M. A.; BERGER, J. S. Process capacity index in drip irrigation with cassava wastewater processing. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 10, p. 1427- 1433, 2015.

HOFFMAN, L. A.; NGO, T. T. Affordable solar thermal water heating solution for rural Dominican Republic. **Renewable energy**, v. 115, p. 1220-1230, 2018.

IBN-MOHAMMED, T. et al. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1321-1344, 2017.

IDCOL. (2015). IDCOL Solar Irrigation Projects. Retrieved. Disponível em: <<http://www.icimod.org/resource/17186>>. Acesso: 10.mai.2018.

IEA PVPS. Instantâneos de mercados fotovoltaicos globais e relatórios de tendências. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org>>. Acessado em: em 28 de abril de 2017).

IEA. ELECTRICITY INFORMATION: OVERVIEW (2017 edition) França, 2018. International Energy Agency – IEA. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>>. Acesso: 04 jul 2018.

INPE-instituto Nacional de Pesquisas. **Possível ocorrência de el niño durante ond-2018**.Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 20 set. 2018.

International Energy Agency (IEA). **Snapshot of global photovoltaic markets**. Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2017.Disponível em: < http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf>. Acesso em 05 jul.2018

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2011.

JÄGER-WALDAU, A. Snapshot of photovoltaics—March 2017. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 783, 2017.

JUCHEN, C. R.; SUSZEK, F. L.; VILAS BOAS, M.A.. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 243, 2018.

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world:-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1092-1105, 2016.

KAZEM, H. A. et al. Design, measurement and evaluation of photovoltaic pumping system for rural areas in Oman. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, n. 3, p. 1041-1053, 2017.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design parameters**. Transactions of the ASAE, v.17, p.678-684, 1974.

KELLER,J.; BLIESNER. R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nortrand Reinhold, 1990.

KHAN, J.; ARSALAN, M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 414-425, 2016.

KHARE, V.; NEMA, S.; BAREDAR, P.. Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 23-33, 2016.

KILNER, J.A.; SKINNER, S.; IRVINE, S.; EDWARDS P. Functional materials for sustainable energy applications. **Elsevier**; 2012.

KLAR, A. E. Critérios para escolha do método de irrigação. **Irriga**, v. 5, n. 1, p. 52, 2018.

KLEIN, M. R. et al. Gráficos de Shewhart no Processo de Aplicação de Água de um Sistema de Irrigação Familiar por Gotejamento. In: **Inovagri International Meeting. Fortaleza**. 2012.

KLEIN, Marcio et al. Uniformidade de irrigação e fertigação em um sistema de irrigação familiar por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 3, 2013.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

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

KULKARNI, D. Maharashtra government plans to give 5 lakh solar pumps to farmers. dna Analysis. Retrieved June 9, 2015. Disponível em: <<http://www.dnaindia.com/mumbai/report-maharashtra-government-plansto-give-5-lakh-solar-pumps-to-farmers-2049952>>. Acesso em: 05.maio. 2018.

LANA, L.T.C. et al. Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2016.

LECCISI, E.; RAUGEI, M.; FTHENAKIS, V. The Energy and environmental performance of ground-mounted photovoltaic systems—A timely update. **Energies**, v. 9, n. 8, p. 622, 2016.

LI, G. et al. Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 440-458, 2017.

LIMA, J. B. A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. Dissertação de mestrado Escola Politécnica USP, São Paulo, 2003.

LUDWIG, R. **Dimensionamento da linha lateral utilizando dois espaçamentos entre gotejadores**. Dissertação. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, 2012.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, 2015, Volume 7 (1), 126-143.

MAMAGHANI, A. H. et al. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia. **Renewable Energy**, v. 97, p. 293-305, 2016.

MANTOVANI, E. C.; SALASSIER, B.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**; 2. ed., atual e ampl., Viçosa: Ed. UFV, 2007. 358p

MANTOVANI, E.C. Irrigação do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, I. Viçosa CaféProdutividade, Qualidade e Sustentabilidade, 1, 2000. p.263-290

MATEO, C. et al. Analysis of inicial stabilization of cell efficiency in amorphous silicone photovoltaic modules under real outdoor conditions. **Renewable Energy**, v. 120, p. 114-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.054>.

MELÉNDEZ, T. A. F. **Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENDES, L. F. R.; JUNIOR, M. E.; HOSKEN, L. A. L. Seleção de sistema de fornecimento de energia elétrica para propriedades rurais litorâneas localizadas no Norte do Estado do Rio de Janeiro. **Revista produção e engenharia**, v. 4, n. 1, p. 338-345, 2016.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. Farm irrigation system evalution: a guide for anagement. Logan: **Utah State University**, 1978.

MICHELSM, R. N. et al. Yield from photovoltaic modules under real working situations in west Paraná-Brazil. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, 2015.

MICHELS, R. N., RICIERI, R., GNOATTO, E., SOUSA, S. N. M., SILVA, S. L., FISCHBORN, M. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, p. 370 – 379, 2009.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A.T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Sci. agric.** (Piracicaba, Braz.) [online]. 2002, vol.59, n.2, pp. 261-266. ISSN 0103-9016.

MONTGOMERY, D.C.; Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; **Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel**. – 4 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513p.

MORALES, L. R. V. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. Dissertação (Pós-Graduação Stricto Sensu). Energia. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2011.

MUNDO-HERNÁNDEZ, J.; ALONSO, B.C.; HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ,J.; CELIS-CARRILLO, B. Na overview of solar photovoltaic energy in México and Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.31, p. 639-649, 2014.

NASCIMENTO, R. L.; HAUSMANN, R. Sistema de bombeamento de água pluvial com estudo da viabilidade da utilização de energia solar fotovoltaica. **Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN-1983-1838**, v. 8, n. 2, p. 85-110, 2015.

NOGUEIRA, C. E. C., BEDIN, J., NIEDZIALKOSKI, R. K., de Souza, S. N. M., & das NEVES, J. C. M. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a waterpumping system in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 51, 1610- 1616, 2015.

NREL. Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory. 2017.

OLIVEIRA, K. C. de. **Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados**. Dissertação. Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ONUDI. Organização das Nações para o Desenvolvimento Industrial. Programa de capacitação em energias renováveis – Energia Solar Fotovoltaica. 2013.

Padmavathi K., Daniel A. Studies on installing solar water pumps in domestic urban sector. **Sustain Cities Soc** 2011;2:135–41

PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.19, p. 255-274, 2013.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; et. al. Atlas brasileiro de energia solar. São José Dos Campos: INPE, 2006, 60p. ISBN 85-17-00030-7.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R., et al. 2017: Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 80 pp.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica. Porto: Publindústria, 2011.

PERIASAMY, P.; JAIN, N. K.; SINGH, I. P. A review on development of photovoltaic water pumping system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 918-925, 2015.

PIMENTEL GOMES; **Curso estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2000. 477p.

PIZARRO CABELO, F. Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación, 3. ed., Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996, 413 p

PROVENZANO, G.; PUMO, D.; DI DIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York**, v. 131,n. 6, p. 525-532, 2005.

RAWAT, R.; KAUSHIK, S. C.; LAMBA, R. A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1506-1519, 2016.

RAZYKOV T.M., FERKIDES C.S., MOREL D., STEFANAKOS E., ULLAI H.S., UPADHYAYA; H.M. Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. **Sol Energy** 2011;85:1580–608.

REN21, "Renewable 2017 – Global Status Report", 2017 Disponível em < http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf >. Acesso em maio 2018.

RÜTHER, R.; BEYER, H.G.; MONTENEGRO, A.A.; DACOREGIO, M.M. & KNOB, P. Performance results of the first grid-connected, thin-film PV installation in Brazil: high performance ratios over six years of continuous operation. 19th **European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Paris, França, 2004.

SAMOHYL, R. W. Controle Estatístico da Qualidade. Rio de Janeiro: Campus, 2009.

SAMPAIO, P.G.V.; GONZÁLEZ, M.O.A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>.

SANYASHIV, S. D.; BANSOD, P. J. Performance Evaluation of Solar PV Pump with Conventional Pump. **International Journal for Science and Research in Technical Education (IJSRTE)**, 2018

SEN, R.; BHATTACHARYYA, S. C. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. **Renewable Energy**, v. 62, p. 388-398, 2014.

SHANAWANI, M.; MASOTTI, D.; COSTANZO, A. THz rectennas and their design rules. **Electronics**, v. 6, n. 4, p. 99, 2017.

SHARMA, V.; CHANDEL, S. S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 753-767, 2013.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 99-110, 2016.

SIBAI, F. N. Modelling and Output Power Evaluation of Series-Parallel Photovoltaic Modules. **work**, v. 5, n. 1, 2014.

SILVA, S. et al. Qualidade da irrigação por gotejamento em cultivos consecutivos de cana-de-açúcar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 11, n. 2, p. 01-08, 2015.

SINDHU, S.; NEHRA, V.; LUTHRA, S. Identification and analysis of barriers in implementation of solar energy in Indian rural sector using integrated ISM and fuzzy MICMAC approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 70-88, 2016.

SIQUEIRA, J.A.C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. 176p. Tese (Tese em Agronomia, Área de Concentração - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu., 2005.

SolarGIS, 2013. Disponível em: <<http://Solargis.info>>. Acesso em: 09 /07/2018.

SOLARJACK. SDS Series Pumps Specifications. Disponível em: <<https://www.sunpumps.com/Photo/336?d=7/27/201712:24:56PM>>. Acesso em: Jul. 2018

SONTAKE, V.C.; KALAMKAR, V.R. Solar photovoltaic water pumping system – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1038-1067. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>

SUNDATA. Potencial Solar – SunData. CRESESB/CEPEL. 2016. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: ago. 2017.

SUSZEK, F. L. et al. Quimigação à base de ácido fosfórico e hipoclorito de cálcio na irrigação por gotejamento. Dissertação. Mestrado em Engenharia Agrícola, Cascavel, 2014.

TESKE, S. et al. Renewable energy and deep sea mining: Supply, demand and scenarios. 2016. Disponível em: <http://dscc.hifrontier.com/wp-content/uploads/2017/03/Teske_Sven_ISF-Kingston-11-July-2016.pdf>. Acesso: 05 maio. 2018.

TIEPOLO, G. M. et al. ATLAS DE ENERGIA SOLAR DO ESTADO DO PARANÁ-RESULTADOS. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2018.

TOLMASQUIM, M.T. Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. 452 p. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TYAGI, V.V.; RAHIM, N.A.A.; RAHIM, N.A.; SELVARAJ, J.A.L. Progress in solar PV technology: Research and achievement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 443-461, 2013.

UMINHO. (2015). *Exemplos de células solares*. Universidade de Minho, Portugal. <<http://www.fisica.uminho.pt/>>, acessado em 15/06/2015.

URMEE, T.; ANISUZZAMAN, M.D. Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries. **Renewable Energy**, v. 93, p. 159-167, 2016.

VALER, L. R. et al. Experiências no semiárido cearense na implantação de sistemas fotovoltaicos para irrigação: lições aprendidas. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 17, p. 04.01-04.10, 2013.

VALER, L.R. et al. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.15, p. 20-26, 2016.

VENTURA, K. M. et al. Avaliação da Uniformidade de Aplicação de Água em Mangueira Gotejadora. **In: INOVAGRI**, 2017, Fortaleza.

VICK, B. D.; NEAL, B. A. Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. **Jour of Solar Energy**, 2012.

VILELA, O. C.; BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N. Simulation of grape culture irrigation with photovoltaic V-trough pumping systems. **Renewable Energy**, Lemesos, v. 29, n. 10, p. 1697-1705, 2004.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C. Estudo Comparativo da avaliação de Sistemas de Irrigação por Gotejamento Com Medição Da Vazão De 16 E 32 Gotejadores. **In: Xiv Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, 2004, Porto Alegre. Anais Xiv Conird. Viçosa : Contexto, 2004

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E.C.; CORDEIRO, E. de A. Estudo comparativo da avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento utilizando os métodos propostos por Keller e por DENÍCULI. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS**. 2003.

VILAS BOAS, M. A. Fundamentos de irrigação localizada. 1. ed. Cascavel: Edunioeste, 2016.

VILAS BOAS, R. C. et al. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 35, n. 4, p. 781-788 2011.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

VIRIDIAN. Energia solar fotovoltaica. 2011. Disponível em: < [http:// www.Viridian.com.br](http://www.Viridian.com.br). Acesso em: jul. 2018.

WEISS, L.; AMARA, M.; MÉNÉZO, C. Impact of radiative-heat transfer on photovoltaic module temperature. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 24, n. 1, p. 12-27, 2016.

WERNECK, J.E.F., FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da água para irrigação**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc>>. Acesso em: 2 de julho de 2018.

WIDIASTUTI, I.; WIJAYANTO, D. S. Developing a Hybrid Solar/Wind Powered Drip Irrigation System for Dragon Fruit Yield. **In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 012034.

YE, M. et al. Recent advancements in perovskite solar cells: flexibility, stability and large scale. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 4, n. 18, p. 6755-6771, 2016.

YIFA. YF-S201 product instruction. Disponível em: . Acesso em: Jan. 2018.

YU, Y., LIU, J., WANG, H.; LIU, M. . Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. **Applied Energy**, 88(9), 3176–3182, 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.028

ZAGO, E.A. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando energia fotovoltaica**. Dissertação. Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel ,2016.

ZILLI, B. M. Sistema autônomo de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos amorfo e policristalino. Dissertação. Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel 2018.

ZOCOLER J, L.; CESAR, L.E. V.; VANZELA, L.S.E. **Efeito da linha lateral de um equipamento de irrigação do tipo pivô central na uniformidade de distribuição de água e eficiência da irrigação**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 12, n. 4, p.290-297, 2004.

ZOCOLER, J. L. Avaliação de desempenho de sistemas de irrigação. Ilha Solteira – SP: UNESP. Disponível em: Acesso em: 27 jun. 2005.

ZOCOLER, Jo.L.et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 234, 2015.