

Água para indústria 4.0 em um sistema embarcado no semiárido brasileiro

RESUMO

O balanço hídrico negativo e a imprevisibilidade da precipitação em regiões de clima semiárido são obstáculos à produção de plantas para alimentação e pecuária local. A implantação de um sistema embarcado no Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 foi a forma possível de operacionalizar a disponibilidade perene de água subterrânea em tempo real e monitoramento remoto de bomba de vácuo para sistema hidráulico: solo-planta-atmosfera. A caixa com o sistema embarcado instalado em campo armazenava dados, dando comandos programados e ensinados e enviando as informações para a nuvem via 3G. A interface homem-máquina foi realizada por meio de dispositivo móvel (Tablet). Esse manejo resultou no aumento da produção de biomassa, redução de custos, eficiência energética e ecológica e aumento da qualidade da produção da palma *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae) no Semiárido Brasileiro. As principais contribuições deste trabalho foram tornar previsíveis os dados e metas de produção, com um método redundante de análise da variável principal (biomassa seca), e reduzir os eventos de retardamento do crescimento das plantas.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Operacionais em Tempo Real. Agricultura Sustentável. Eficiência Energética. Manufatura Inteligente. Fábrica Inteligente.

Mayara Lopes de Freitas Lima

<http://orcid.org/0000-0003-0231-3513>

maybiologicas@gmail.com

Universidade Federal Rural de Pernambuco – Recife, Pernambuco, Brasil.

Isabelle Ventura de Sá

<http://orcid.org/0000-0003-3281-4909>

isaventurasa57@gmail.com

Colégio Militar do Recife – Recife, Pernambuco, Brasil.

Samara Maria Farias de Souza

<http://orcid.org/0000-0001-5834-9262>

samara2015farias@hotmail.com

Colégio Militar do Recife
Universidade Federal de Pernambuco – Recife, Pernambuco, Brasil.

Cainã Ferraz e Silva

<http://orcid.org/0000-0002-5358-7859>

caina.ferrazsilva@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco - Recife, Pernambuco, Brasil.

Otacílio Antunes Santana

<http://orcid.org/0000-0002-4294-1226>

otacilio.santana@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco – Recife, Pernambuco, Brasil.

INTRODUÇÃO

O fator limitante para os seres vivos no ecossistema sob o regime climático Semiárido (BSh – Classificação de Köppen-Geiger) é a disponibilidade de água (SANTANA, 2016a; SANTANA; SILVA; LIMA, 2021). Nessa região, o balanço hídrico anual é sempre negativo, ou seja, a evapotranspiração, saída de água do sistema, é maior do que a precipitação, entrada de água no sistema (SANTANA *et al.*, 2013; SANTANA; ENCINAS, 2016). Isso tudo sob um subsolo raso (solo de um metro de profundidade), formado acima de rocha maciça de granito ou gnaíse, sem poros que não permitem o descenso da água para formação de lençol freático. Quando formado, o lençol freático é encontrado após essas rochas a 60 m de profundidade, com pouca água e imprópria para o consumo humano e produção alimentícia (salobra) (SANTANA *et al.*, 2010).

A água da chuva é indicada como fonte primária de abastecimento hídrico e é recomendado não se perder (por evaporação) a umidade formada no metro de solo disponível nessa área (classificação do solo: Luvisolo crônico órtico vertissolo) (OLIVEIRA *et al.*, 2009). Esse solo, por suas características físico-química, possui um potencial hídrico (Ψ_{solo}), ou seja, a capacidade da água de se deslocar de uma área para outra devido a ação capilar (tensão superficial) de aproximadamente -3 MPa. As raízes das plantas nessas áreas precisam realizar uma pressão hidráulica menor do que esse valor (aproximadamente -4 MPa) para captar a água do solo (SANTANA; CUNIAT; ENCINAS, 2010; SANTANA; IMAÑA-ENCINAS, 2011).

Quando o potencial hídrico está próximo de zero significa que o sistema está hidratado, e quanto mais negativo, mais pressão de sucção de água é requerida pela parte do sistema para sua obtenção. A variação desse potencial no solo sob o regime climático Semiárido é causada pelas raízes das plantas, pela chuva, pela evaporação direta de águas livres superficiais (difícil de acontecer nessa região), e/ou pelo déficit de pressão de vapor (DPV). Esse último, se refere a umidade atmosférica no sistema (partículas diminutas de água em suspensão) (SANTANA; ENCINAS, 2016; IMAÑA-ENCINAS, J *et al.*, 2017).

A vegetação que se encontra nesse meio, entre o solo e a atmosfera, funciona como um sistema hidráulico que capta água do solo, realiza seus processos físico-químicos (respiração e fotossíntese) e libera água para atmosfera (transpiração). O clímax de um ecossistema ou da produção vegetal está no momento em que a planta chega a uma transpiração 'ótima', em que a planta regula o consumo de água eficientemente para produção de tecido vegetal (área foliar, fruto, semente, tubérculo, ...) (ENCINAS *et al.*, 2008 e 2009; SANTANA; ENCINAS, 2018; IMAÑA-ENCINAS; SANTANA; RIESCO-MUÑOZ, 2019; IMAÑA-ENCINAS *et al.*, 2021).

Espécies vegetais como a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill, Cactaceae) equalizam a ascensão hídrica no solo e sua transpiração através de sua regulação metabólica, e nesses ambientes distróficos, quanto mais água, maior será a taxa fotossintética e conseqüentemente maior a produção de biomassa (VENTURA-AGUILAR *et al.*, 2017). A imprevisibilidade pluviométrica das regiões Semiáridas, escassez e concentração do período de chuvas quando ocorrem (> 150 mm dia⁻¹), causam uma incerteza na cadeia produtiva.

Essa espécie é amplamente utilizada nos agronegócios em regiões com baixa e não cíclicas pluviosidades: (i) por sua resistência, rebrota e adaptação fisiológica a seca e a alta radiação em relação a outros cereais e fibras (SNYMAN, 2013), (ii)

pela capacidade em reciclar nutrientes em regiões distróficas (HASSAN *et al.*, 2019), (iii) por serem fonte alimentícia e de água para os rebanhos (ALHANAFI *et al.*, 2019), (iv) pelo alto teor energético e de fibras em suplementos para humanos (DÍAZ-VELA; TOTOSAUS; PÉREZ-CHABELA, 2015), (v) por sua ação antioxidantes e biocoagulantes (GOUWS, 2019), (vi) por sua capacidade terapêutica (VERON *et al.*, 2019), (vii) por servir como termo protetores (SLIMEN *et al.*, 2019), (viii) produção de papel (SOTTILE *et al.*, 2019), e outros. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO – Food and Agriculture Organization of the United Organization) recomenda a produção dessa espécie para ser utilizada no combate à fome em regiões áridas e semiáridas, a fazer parte dos objetivos de desenvolvimento sustentável número 2 (fome zero e agricultura sustentável) (FAO, 2019).

E para aumentar a produção de biomassa dos indivíduos de *Opuntia* se deve manter a umidade do solo através do ascenso hidráulico, sendo regulado (ligado e desligado) esse ascenso quando: (i) começar a perder muita água para atmosfera (retração de tecido vegetal) ou (ii) tiver um baixo déficit de pressão de vapor (alta umidade ou precipitação). Essas premissas foram baseadas em outro trabalho sobre a produção de tecido vegetal para Termo-Indústria 3.0 no Semiárido (SANTANA, 2017).

Um caminho possível para operacionalizar essa hipótese nesse novo contexto de produção da palma forrageira, foi através da performance automática de um sistema embarcado (LIU; CHEN; KONG, 2015), nos Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI 4.0) (HEIDEL *et al.*, 2017), que permitem em tempo-real: (i) reduzir custo, (ii) aumentar a eficiência energética e ecológica, (iii) aumentar o desempenho de produção (biomassa tempo⁻¹ area⁻¹), e (iv) aumentar a qualidade do produto. Assim, o objetivo desse trabalho foi implantar um sistema embarcado associado ao RAMI 4.0 para disponibilidade perene de água do solo, acompanhada e manejada de maneira remota e em tempo-real, a resultar em um aumento de produção de biomassa da palma forrageira *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae) no Semiárido Brasileiro.

Esse trabalho alinha: (i) a Ciências (coleta de demandas, estruturação de um método, e análise dos dados), (ii) a Tecnologia, via sistematização tecnológica de adaptador físico-ambiental para o cenário de produção, e (iii) a Sociedade, pelo impacto positivo e real em uma área de vulnerabilidade Social e Ambiental, a partir de uma demanda social histórica. As dimensões utilizadas para esse alinhamento foram (HAFSTAD, 1957; LEE, 2010): (i) o recrutamento dos talentos locais para se qualificarem nas arquiteturas tecnológicas exigidas (investimento e valorização do sistema educacional local), (ii) a construção de miniparque industrial e tecnológico (visando o aumento da quantidade de produção), (iii) a padronização da produção (qualidade via modelos), e (iv) uma produção seriada surgida no e para o cenário de desenvolvimento local. Outro fator de relevância é que esse alinhamento da Ciências, Tecnologia e Sociedade a curto prazo (> 1 ano), recupera via lucro de produção, os custos de instalação e manutenção do Modelo (LEMAY, 2018).

METODOLOGIA

As etapas metodológicas seguiram o Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI 4.0 - Reference of Architectural Model Industry 4.0 (HEIDEL

et al., 2017) adaptada para situação de campo (Região Semiárida), com: (A) a delimitação da arquitetura do sistema embarcado no ambiente, (B) a análise dos dados ambientais e sua modelagem estatística, (C) a decisão e programação do sistema embarcado, (D) a avaliação em tempo real da produção e dos eventos associados.

O sistema foi implantado em uma plantação circular de 28 ha (talhão) de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill, Cactaceae), plantadas com espaçamento de 1 m X 0,5 m entre os indivíduos vegetais, com um total de 560.000 palmas por talhão (Figura 1). A área de estudo se situa no Sertão Pernambucano (Brasil) (7°35'00"S e 39°42'22"O), em uma área que ocorre o ecossistema da Caatinga sob o regime climático do Semiárido BSh (SANTANA, 2017). A área foi controlada para ausência de uma herbivoria e outras presenças que poderiam interferir na produção (SANTANA; ENCINAS, 2016). Como forma de comparação da produção o desenho experimental contou ao total com três talhões: um controle (C); um experimental com a bomba de vácuo ligada constantemente sem o sistema embarcado (E); e, uma experimental embarcada, com a bomba e o sistema embarcado (EE).

Figura 1 - Produção de palma forrageira *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae)

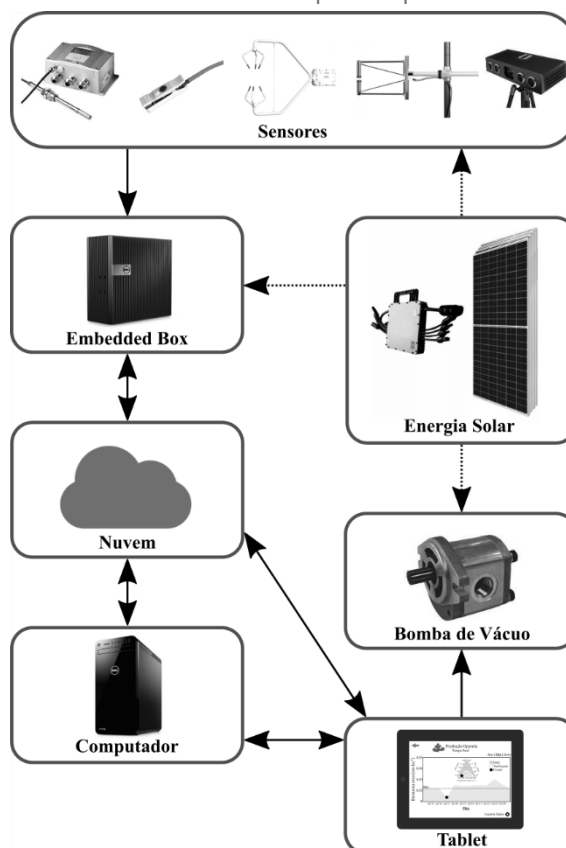


Fonte: Elaborada pelos autores.

Sistema Embarcado

A arquitetura do sistema embarcado foi formada de sete partes (Figura 2) (OKISHIBA *et al.*, 2019; ZAMORA-IZQUIERDO *et al.*, 2019): (i) os sensores, (ii) a caixa com o sistema embarcado (embedded box); (iii) o painel de energia solar, (iv) a nuvem para armazenamento e retroalimentação dos dados e informações; (v) o computador onde se situava a plataforma de comando, gerenciamento e interface; (vi) o tablet, dispositivo móvel para interface humano-máquina; e (vii) a bomba de vácuo.

Figura 2 - Arquitetura para o sistema embarcado para produção de *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae) no Semiárido Brasileiro (→ fluxo de informação, → fluxo de energia) baseado no Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI 4.0)



Fonte: Elaborada pelos autores.

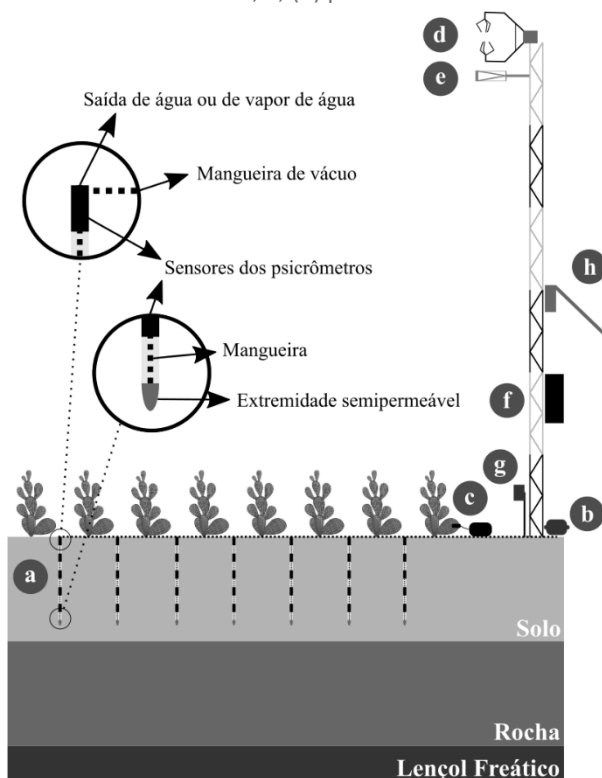
No solo, entre os espaçamentos dos indivíduos de palma, um sistema de ascenso hidráulico foi instalado em um cano de um metro de comprimento (Figura 3A). Esse sistema se baseia na formação de um potencial hídrico mais negativo do que o do solo, gerado na extremidade na mangueira situada na superfície do solo, a ocasionar na outra extremidade (semipermeável, Figura 3A) uma sucção de água ou vapor de umidade, a fazer assim o ascenso hídrico do solo para atmosfera (10 mm de diâmetro). O valor desse potencial hídrico (Ψ_{bomba}) gerado pela bomba de vácuo (CBDA-F4 Series Gear Pump, Shanghai Dazhong Hydraulic Technology Co., Ltd, Shanghai, China - Figura 3B) foi programado para ser igual ao das raízes das plantas em ambientes de estresse hídrico: $\Psi_{\text{raízes}} - 4\text{MPa}$ (SANTANA; CUNIAT; ENCINAS, 2010).

Nesses canos foram instalados sensores dos psicômetros (HMT330 series: HMT335, Vaisala, Vantaa, Finlândia), que medem o potencial hídrico do solo (Ψ_{solo}), a 0,1, 0,3, 0,4, 0,5, 0,7 e 0,9 m de profundidade. A diferença entre o potencial hídrico realizado pela bomba e o potencial hídrico do solo ($\Delta\Psi_{\text{hídrico}}$) foi o utilizado para os cálculos, pois ele indicava o nível de hidratação do solo, significativo para as decisões de manter a bomba ligada.

Nos indivíduos das palmas foram instalados medidores de transpiração nos cladódios ("raquetes", Figura 3C), através de porômetros que fazem medições simultâneas da taxa de transpiração ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) nas palmas (SC-1 Leaf Porometer, Decagon Devices, Inc., Pullman, Estados Unidos).

Ao cento da plantação foi instalada uma torre de 6 metros de altura no qual foram acoplados um anemômetro sônico (Figura 3D, CSAT3: 3-D Sonic Anemometer, Campbell Scientific Inc., Logan, Estados Unidos) que coletou os dados de déficit de pressão de vapor (DPV, kPa) e um higrômetro (Figura 4E, KH20 Krypton Hygrometer, Campbell Scientific Inc., Logan, Estados Unidos) que registrou a precipitação (mm).

Figura 3 - Desenho experimental em uma plantação de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill, Cactaceae) (a) sistema de ascenso hídrico e psicrômetros, (b) bomba de vácuo, (c) porômetro, (d) anemômetro sônico, (e) higrômetro, (f) embedded box, (g) escâner 3D, e, (h) painel solar



Fonte: Elaborada pelos autores.

Todos os dados foram mensurados a cada 15s, e armazenado em uma Embedded Box (Figura 3F - Dell PC 5000, Dell, Inc., Austin, Estados Unidos), que contém um processador Intel® Core™ i7 com placa gráfica integrada (placa de CPU v2), unidade de estado sólido SATA M.2 de 2,5 polegadas, 64 GB, placa de expansão CANBus, placa e antena WWAN HSPA+ HE910 (3G), e um conjunto de conector (1 com alimentação CC, 1 botão liga/desliga remoto, 2 blocos de terminal GPIO), todos sob o sistema operacional Microsoft Windows 10 Pro, de 64 bits (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, EUA). Essa caixa embarcada além do armazenamento, executava os comandos programados e transferia os dados, conforme hardwares indicados.

A produção da biomassa de palma (t ha⁻¹) foi estimada na relação de densidade (0,265 t m⁻³), com a mensuração de seu volume por um escâner industrial (Figura 3G - 3D scanner SK-DK-FX - Four Lens, Foshan Shangke Machinery Co., Ltd., Guangdong Province, China). Essa densidade foi amostrada de

preliminarmente em 1.000 indivíduos que foram secos (LCC/LCD Oven, Despatch Scientific Inc., Mineapolis, MN, Estados Unidos) e pesados por uma balança de precisão (Balança Plataforma Balmak BK-100 100Kg Santa Bárbara d'Oeste, SP, Brasil) (SANTANA; ENCINAS, 2013).

Os sensores, o embedded box e a bomba de vácuo foram alimentadas com dois m2 de painel solar (Figura 3H - Hoymiles MI-1200 - 1200 W - 1,320 kWp, quatro painéis 330W, String Ac20A, Hoymiles Converter Technology Co., Ltd, Fortaleza, CE, Brasil).

Os dados e informações foram recebidos e analisados na nuvem Microsoft® OneDrive®, e modelados, programados e interfaceados nos programas Microsoft Power Platform e Microsoft Azure (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, EUA). A estação de trabalho foi no computador (Dell XPS 8930 Intel® Core™ i7-8700, Dell, Inc., Austin, Estados Unidos), e a interface humano-máquina através de um dispositivo móvel Tablet (Galaxy Tab S5e 4G, Samsung Electronics Co., Ltd., Seul, Coréia do Sul).

Análise e Modelagem Estatística

Inicialmente as variáveis amostradas foram correlacionadas (correlação de Pearson) e verificadas quanto a possível multicolinearidade (FARRAR; GLAUBER, 1967). As variáveis independentes (DPV = déficit de pressão de valor, transpiração e $\Delta\Psi_{\text{hidri,co}}$) foram relacionadas com a variável dependente de produção (BS = biomassa seca) em um modelo (Equação 1) que ajustou os dados através da análise de regressão stepwise, para ordena-las quando ao nível de decisão para manter ligada ou desligada a bomba de vácuo, ou seja, a mais significativas em relação a variável dependente foram as primeiras na decisão (COUTO JUNIOR *et al.*, 2011; DA SILVA; SANTANA; MORAES, 2013; SANTANA *et al.*, 2015; SANTANA, 2016a; LIMA *et al.*, 2019). Esse procedimento foi realizado com os dados do ano de 2017 (um talhão), e a decisão dessa implantada para o ano de 2018 (outro talhão).

$$\widehat{BS} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \overline{DPV} + \beta_2 \cdot \bar{T} + \beta_3 \cdot \overline{\Delta\Psi_{\text{hidrico}}} \pm \varepsilon \quad (1)$$

Os dados da biomassa seca determinada via modelo estatístico e via escâner (mensuração indireta), foram comparados com a mensuração direta (1.000 ind talhão⁻¹) para certificar as informações de produção.

Os dados dos grupos amostrais: (i) controle, (ii) experimental, e (iii) experimental embarcado foram comparados através do Teste t de Student (95% de confiabilidade) (D'AGOSTINO; BELANGER; D'AGOSTINO, 1990). Previamente, para confirmação da realização do teste paramétrico, a normalidade da distribuição foi confirmada através do teste de normalidade D'Agostino (ZAR, 1999). Outros ajustes a curvas lineares e não lineares foram executados pela análise de regressão (D'AGOSTINO; BELANGER; D'AGOSTINO, 1990).

Decisão e Programação

A partir da construção da sequência das variáveis independentes de forma

decrecente de significância na equação de produção, foram então delimitados os alcances numéricos das variáveis para a bomba ser ligada ou desligada para que a produção de biomassa se mantivesse aproximadamente de forma linear. Esse fluxo de decisão foi alimentado e performada no programa Microsoft Flow, inserido no Microsoft Power Platform (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, EUA) e enviada ao embedded box para a execução ou não da bomba de vácuo, de forma automática.

Avaliação da Produção em Tempo Real

Com a definição do alcance numérico “ótimo” de execução da bomba e a programação de execução sendo definida, o produtor pôde acompanhar em tempo real e a distância o ritmo da produção e os eventos fora da meta (OKISHIBA *et al.*, 2019). A meta por tempo foi pré-estabelecida através da equação matemática gerada pelo ajuste do modelo estatístico. A bomba de vácuo pôde ser ligada e desligada fora da automação estabelecida, conforme controle manual, se fosse necessário.

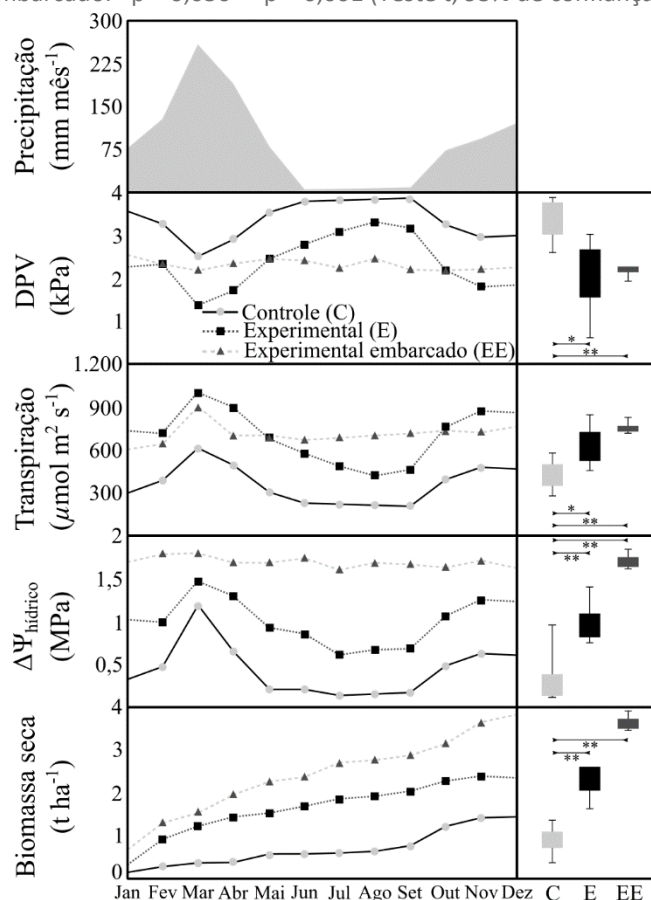
Além da produção da biomassa seca ($t\ ha^{-1}$), pôde-se construir o gráfico de eficiência energética, energia consumida entre o sistema experimental e experimental embarcado (FIKRU, 2019), da eficiência hídrica, quanto de água foi consumida em um ciclo de produção (água que passou no sistema hidráulico da planta) (XU *et al.*, 2019), e de custo (estimativa do preço de água e de energia consumidos na região) (CHUKALLA; KROL; HOEKSTRA, 2017).

Quando acontecia algum evento (dados ocorrendo fora do alcance ideal das variáveis e de baixa produção), uma mensagem era enviada destacando o que estava acontecendo com a variável biométrica e com as variáveis ambientais (SANTANA *et al.*, 2019). Todos dados poderiam ser exportados para o dispositivo móvel utilizado para verificação, ou qualquer outro que tivesse a senha de acesso a nuvem e a plataforma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados registrados de todas as variáveis tiveram distribuição normal ($p > 0,05$; Teste de Normalidade de D’Agostino), permitindo as análises paramétricas. Houve uma relação direta e proporcional ($r > 0,853$) entre a precipitação com as variáveis transpiração da palma e o $\Delta\Psi_{hídrico}$, e inversa e proporcional ($r > -0,781$) com o déficit de pressão de valor. Isso para os grupos amostrais controle (C) e experimental (E). Essa correlação não ocorreu com o grupo amostral experimental embarcado (EE), $r < 0,113$, e isso foi a primeira certificação de que o sistema embarcado conseguiu manter a umidade do ambiente de forma distinta dos outros grupos (Figura 4). Multicolinearidade não foi encontrada entre as variáveis independentes e os valores das variáveis do grupo referência (C) estão no alcance dos dados encontrados pela literatura (SANTANA, 2016b; SANTANA; ENCINAS, 2016; SANTANA, 2017).

Figura 4 - Resultado mensal (2018) das variáveis biométricas e ambientais em uma plantação de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill, Cactaceae), e a comparação estatística entre os grupos amostrais: (C) controle, (E) experimental e (EE) experimental embarcado. *p < 0,050 **p < 0,001 (Teste t, 95% de confiança)



Fonte: Elaborada pelos autores.

A comparação estatística entre o controle e os grupos experimentais sempre foram significativas (Figura 4; $p < 0,050$), sendo que o grupo experimental embarcado (EE) teve maior significância em relação ao controle ($p < 0,001$), e em ordem decrescente na diferença significativa nas variáveis (valor de p), primeiro a foi a $\Delta\Psi_{\text{hídrico}}$, em seguida a transpiração, e por fim, o DPV.

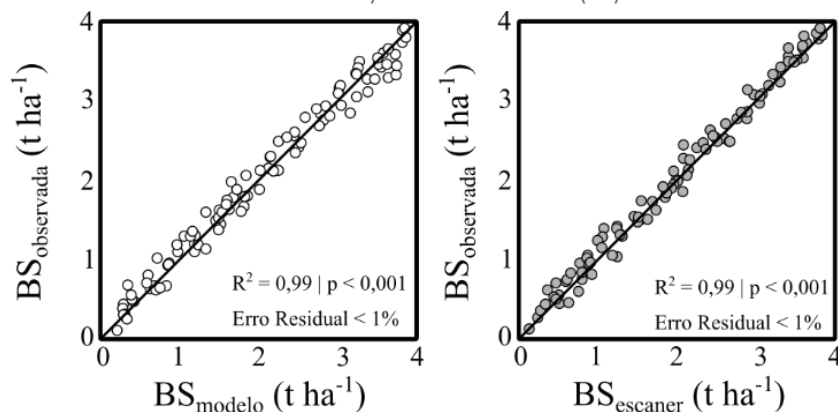
Essa sequência também foi observada na análise de regressão stepwise. A sequência decrescente de significância das variáveis foram $\Delta\Psi_{\text{hídrico}}$ ($p = 0,001$) > Transpiração (0,011) > DPV ($p = 0,013$) como variáveis independentes na determinação da variável de produção (biomassa seca). Esse resultado corrobora com a literatura que afirma que quanto mais denso for o componente do sistema, mais ele será significativo para manter ou retirar água de outra parte do sistema (SANTANA; ENCINAS; CÔRREA, 2008; SANTANA; CUNIAT; ENCINAS, 2010).

A equação sistematizada para estimativa da produção da biomassa seca da palma estudada a partir das variáveis e dos dados amostrados foi significativa ($R_{\text{adj}}^2 = 0,99$; $p < 0,001$; $\varepsilon > 0,01$; Equação 2):

$$\widehat{BS} = 1,256 - 0,124 \cdot \overline{DPV} + 0,004 \cdot \overline{T} - 0,091 \cdot \overline{\Delta\Psi_{\text{hídrico}}} \pm \varepsilon \quad (2)$$

A biomassa seca (BS) estimada pelo modelo estatístico e pelo escâner foram altamente precisas, com erro residual e super ou subestimativa abaixo de 1% (Figura 5). Essa informação é relevante no momento da verificação da produção em tempo real, pois se criou um sistema redundante de certificação da informação (JUNIOR; VALENTIM; BRANDAO, 2016).

Figura 5 - Ajuste entre os dados mensurados de forma direta e de forma indireta (Erro Residual) de biomassa seca (BS)



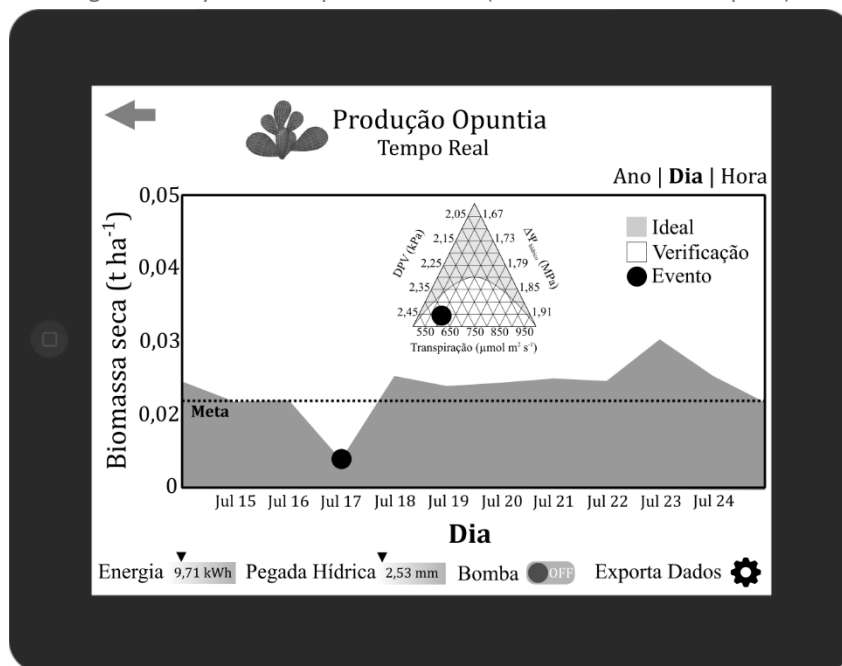
Fonte: Elaborada pelos autores.

Com esses dados e com a sequência de significância das variáveis, o nível de decisão para manter a bomba de vácuo ligada foi: 1º Nível de decisão: $\Delta\Psi_{\text{hídrico}} \leq 1,7$ MPa bomba ligada, $> 1,8$ bomba desligada. 2º Nível de decisão: Transpiração $\leq 900 \mu\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bomba ligada, > 901 bomba desligada. 3º Nível de decisão: Transpiração $\leq 2,0$ kPa bomba ligada, $> 2,1$ kPa bomba desligada. O primeiro nível mantém a bomba em funcionamento e os outros dois níveis regulam a necessidade da bomba em estar ligada segundo a taxa metabólica (transpiração) e influência ambiental (DPV) na produção.

A arquitetura embarcada executada, associada aos níveis de decisão e com o acompanhamento em tempo real certificaram a eficiência no sistema embarcado sistematizado (Figura 6). Nesse sistema, a produção em biomassa seca foi quatro vezes maior do que sem (controle, Figura 7A) e até duas vezes mais eficiente em consumo de energia (Figura 7B), consumo hídrico (pegada hídrica, Figura 7C) e economicamente (Figura 7D) do que no outro grupo experimental. Essa eficiência corroborou com a literatura na produção controlada (ZAMORA-IZQUIERDO *et al.*, 2019), na produção em campo (ZHENG; HUANG, 2016), na indústria (ZHAO *et al.*, 2018), e na agricultura convencional (MUDLAPUR *et al.*, 2019).

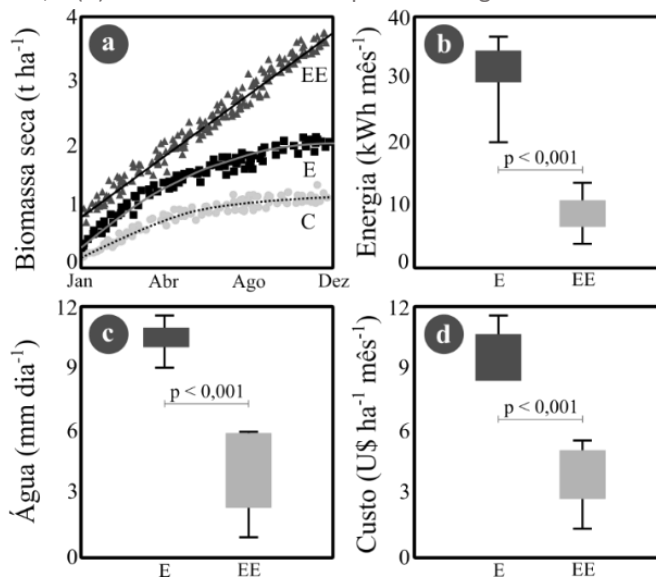
Após implantação do sistema, a autonomia na execução e a interface homem-máquina via dispositivo móvel (Tablet), fez com que se reduzisse a presença humana na plantação de palma para o monitoramento do sistema *in locu*. No início, as visitas a área foram realizadas quinzenalmente, e ao final a cada 45 dias, para limpezas dos sensores por precisismo na qualidade do dado e conforme recomendação dos fabricantes dos sensores. A comercialização da biomassa seca pôde ser realizada e acompanhada pelos clientes de maneira remota, o que pôde ser certificada e com um preço maior por todo o acompanhamento em tempo real da produção.

Figura 6 - Layout do dispositivo móvel (interface homem-máquina)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 - (a) Tendências de crescimento da biomassa seca de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill, Cactaceae) em diferentes grupos amostrais: C = controle, E = experimental, e EE = experimental embarcado; (b) eficiência energética; (c) eficiência hídrica; e (d) eficiência econômica. p nível de significância do Teste t



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os eventos (Figura 6) permitiram um entendimento maior sobre a espécie vegetal, sobre a produção da biomassa e sobre a produção na região do clima Semiárido, proporcionado pelo constante diálogo e reflexão dos dados na interface homem-máquina e a redução dos futuros eventos por sua previsibilidade, o que consequentemente resultou em uma melhoria na qualidade do que se foi produzido (SANTANA, 2017; HOFFMAN, 2019; SANTANA *et al.*, 2020a e 2020b).

CONCLUSÕES

O sistema embarcado sistematizado permitiu em tempo real disponibilizar água para o aparato hidráulico solo-planta-atmosfera, o que resultou em um aumento da produção de biomassa seca da palma forrageira *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae), redução do custo de produção, aumento da eficiência energética e ecológica (pegada hídrica) e por consequente a melhoria na qualidade da biomassa seca comercializada.

Associar o padrão do Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI 4.0) com o sistema embarcado no Semiárido Brasileiro foi a contribuição desse trabalho, pois com a imprevisibilidade pluviométrica, se pôde aumentar a produção e reduzir eventos retardantes dela, a tornar previsível dados e metas de produção, com um método redundante de análise da variável principal de produção.

O recrutamento dos talentos locais para se qualificarem nas arquiteturas tecnológicas trabalhadas, a construção de miniparque industrial e tecnológico, a padronização da produção (qualidade via modelos), e uma produção seriada surgida no e para o cenário de desenvolvimento local, mostraram que é o fluxograma mais eficiente para o desenvolvimento socioeconômico na área de vulnerabilidade socioambiental estudada. A Tecnologia desenvolvida e implementada nesta área agregou um Valor e Capital Social, pois instiga o investimento na comunidade em Governança Ambiental, Social e Corporativa de base tecnológica.

Water for industry 4.0 in an embedded system in the brazilian semi-arid region

ABSTRACT

Negative water balance and unpredictability of precipitation in regions on Semiarid climate are obstacles to plant production for food and local livestock. The implantation of an embedded system on Reference of Architectural Model Industry 4.0 was the possible way to operationalize perennial groundwater availability on a real-time and remote monitoring of vacuum pump to hydraulic system: soil-plant-atmosphere. The field-installed Embedded System Box did storing data, giving programmed and taught commands and sending the information to cloud via 3G. The human-machine interface was performed by mobile device (Tablet). This management resulted in a biomass production increase, cost reduction, energy, and ecology efficiency, and increase in quality of cactus *Opuntia ficus-indica* (Mill, Cactaceae) production in the Brazilian Semi-arid. The main contributions of this work were to make production data and targets predictable, with a redundant method of analysis of the main variable (dry biomass), and to reduce plant growth retarding events.

KEYWORDS: Real Time Operating Systems, Sustainable Farming, Energy Efficiency, Smart Manufacturing, Smart Factory.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte institucional da Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PROPG), Pró-Reitoria de Extensão e Cultura (PROEXC) e da Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação (PROPESQI) da Universidade Federal de Pernambuco; a Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA); a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES); e, ao Grupo de Pesquisa Educometria (UFPE/CNPq) pela discussão e levantamento dos dados.

REFERÊNCIAS

ALHANAFI, F. *et al.* Spineless cactus (*Opuntia ficus-indica*) and saltbush (*Atriplex halimus* L.) as feed supplements for fattening Awassi male lambs: effect on digestibility, water consumption, blood metabolites, and growth performance. **Tropical Animal Health and Production**, v. 51, n. 6, p. 1637-1644, 2019. DOI: 10.1007/s11250-019-01858-6

CHUKALLA, A. D.; KROL, M. S.; HOEKSTRA, A. Y. Marginal cost curves for water footprint reduction in irrigated agriculture: guiding a cost-effective reduction of crop water consumption to a permit or benchmark level. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3507-3524, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-3507-2017

COUTO JUNIOR, A. F. *et al.* Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, p. 699-705, 2011. DOI: 10.1590/S0100-67622011000400014

D'AGOSTINO, R. B.; BELANGER, A.; D'AGOSTINO, JR. A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. **The American Statistician**, v. 44, n. 4, p. 316-321, 1990. DOI: 10.1080/00031305.1990.10475751

DA SILVA, K. DE C.; SANTANA, O. A.; DE MORAES, S. R. A. Quality and Language of Learning Objects Used in the Teaching of Human Anatomy. **International Journal of Morphology**, v. 31, p. 455-460, 2013. DOI: 10.4067/S0717-95022013000200015

DÍAZ-VELA, J.; TOTOSAUS, A.; PÉREZ-CHABELA, M. L. Integration of agroindustrial co-products as functional food ingredients: cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) flour and pineapple (*Ananas comosus*) peel flour as fiber source in cooked sausages inoculated with lactic acid bacteria. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 2630-2638, 2015. DOI: 10.1111/jfpp.12513

ENCINAS, J. I. *et al.* Distribuição diamétrica de um trecho da floresta estacional semidecidual na área do Ecomuseu do Cerrado. **CERNE**, v. 1, p. 33-45, 2008.

ENCINAS, J. I. *et al.* Estrutura diamétrica de um trecho de Floresta Estacional Semidecidual na área do Ecomuseu do Cerrado, Goiás. **CERNE**, v. 15, p. 155-165, 2009.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Good practices for the resilience of rural livelihoods for food and nutrition security**. Panama City, Panama: FAO, 2019.

FARRAR, D. E.; GLAUBER, R. R. Multicollinearity in regression analysis: the problem revisited. **The Review of Economics and Statistics**, v. 49, n. 1, p. 92–107, 1967. DOI:10.2307/1937887

FIKRU, M. G. Electricity bill savings and the role of energy efficiency improvements: A case study of residential solar adopters in the USA. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 124-132, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.028

GOUWS, C. A. *et al.* The effect of different drying techniques on phytochemical content and in vitro antioxidant properties of Australian-grown prickly pears (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 3, e13900, 2019. DOI: 10.1111/jfpp.13900

HAFSTAD, L. R. Science, Technology and Society. **American Scientist**, v. 45, n. 2, p. 157–168, 1957. <http://www.jstor.org/stable/27826869>.

HASSAN, S. *et al.* Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v. 105, p. 104-110, 2019. DOI: 10.1016/j.eja.2019.02.012.

HEIDEL, R. *et al.* **Basiswissen RAMI 4.0: Referenzarchitekturmodell und Industrie 4.0-Komponente Industrie 4.0**. Einbeck, Deutschland: Beuth Verlag, 2017.

HOFFMAN, G. Evaluating fluency in human–robot collaboration. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 49, n. 3, p. 209-218, 2019. DOI: 10.1109/THMS.2019.2904558

IMAÑA-ENCINAS, J. *et al.* Cobertura del suelo del área del eco-museo del Cerrado, Brasil. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 15, p. 59-64, 2017. DOI: 10.18845/rfmk.v15i36.3421

IMAÑA-ENCINAS, J.; SANTANA, O. A.; RIESCO-MUÑOZ, G. Selección de una ecuación volumétrica para *Eucalyptus urophylla* s.t. Blake en la región central del estado de Goiás, Brasil. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 16, p. 02-09, 2019. DOI: 10.18845/RFMK.V16I39.4406

IMAÑA-ENCINAS, J. *et al.* Análisis silvicultural del bosque tropical atlántico a partir de la distribución diamétrica y riqueza florística del arbolado. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 18, p. 46-54, 2021. DOI: 10.18845/rfmk.v16i42.5538

JUNIOR, E. A.; VALENTIM, R. A. M.; BRANDAO, G. B. Real time QRS detection based on redundant discrete wavelet transform. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 4, p. 1662-1668, 2016. DOI: 10.1109/TLA.2016.7483498

LEE, Y. C. Science-Technology-Society or Technology-Society-Science? Insights from an Ancient Technology. **International Journal of Science Education**, v. 32, n. 14, 2010. DOI: 10.1080/09500690903277477

LEMAY, M. A. Canadian Science, Technology and Innovation Policy: The Innovation Economy and Society Nexus. **Science and Public Policy**, v. 45, n. 3, p. 428-429, 2018. DOI: 10.1093/scipol/scx068

LIMA, C. de. *et al.* Pré-diagnóstico da esquistossomose no semiárido: régua antropométrica e aplicativo colaborativo. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 36, p. 272-293, 2019. DOI: 10.3895/rts.v15n36.7809

LIU, X.; CHEN, X.; KONG, F. **Utilization Control and Optimization of Real-Time Embedded Systems**. Boston, MA, USA: Now Foundations and Trends, 2015. DOI: 10.1561/10000000042

MUDLAPUR, A. *et al.* Effect of partial shading on PV fed induction motor water pumping systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 34, n. 1, p. 530-539, 2019. DOI: 10.1109/TEC.2018.2876132

OKISHIBA, S. *et al.* Tablet interface for direct vision teleoperation of an excavator for urban construction work. **Automation in Construction**. v. 102, n. 6, p. 17-26, 2019. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.003

OLIVEIRA, L. B. de. *et al.* Morfologia e classificação de luvissolos e planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1333-1345, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500026

SANTANA, O. A. *et al.* Nutrientes e metais no solo e em árvores de cerrado adjacentes a um aterro sanitário. **Cerne**, v. 14, n. 3, p. 212-219, 2008. Disponível em: <<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/253>>. Acesso em: 15/12/2020.

SANTANA, O. A.; CUNIAT, G.; ENCINAS, J. I. Contribuição da vegetação rasteira na evapotranspiração total em diferentes ecossistemas do bioma cerrado, Distrito Federal. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 269-281, 2010. DOI: 10.5902/198050981851

SANTANA, O. A. *et al.* Produção de serapilheira em floresta de galeria e floresta mesofítica na dolina da garapa, Distrito Federal, Brasil. **CERNE**, v. 16, p. 585-596, 2010. DOI: 10.1590/S0104-77602010000400018

SANTANA, O. A.; IMAÑA-ENCINAS, J. Leaf Area Index and Canopy Openness estimation using high spatial resolution image QuickBird. **Revista Caatinga**, v. 24, p. 59-66, 2011.

SANTANA, O. A. *et al.* Relação entre o índice de avermelhamento do solo e o estoque de carbono na biomassa aérea da vegetação de cerrado. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 783-794, 2013. DOI: 10.5902/1980509812362

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I. Influência do vento no volume de toras e no fator de forma de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 347-356, 2013. DOI: 10.1590/S0104-77602013000200020

SANTANA, O. A. *et al.* Árvores potenciais a danos urbanos: manejo através da tecnologia, educação e mobilização social. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 11, p. 71-88, 2015. DOI: 10.3895/rts.v11n23.2748

SANTANA, O. A. Resistência social na Caatinga árida: a narrativa de quem ficou no colapso ambiental. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, p. 419-438, 2016a. DOI: 10.5380/dma.v38i0.43574

SANTANA, O. A. Evasão nas Licenciaturas das Universidades Federais: entre a apetência e a competência. **Educação**, v. 41, p. 311-327, 2016b. DOI: 10.5902/1984644420199

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I. Dendrophysiological plant strategies of *Poincianella pyramidalis* (Tul.) L.P. Queiroz after wood herbivory in semiarid region of Paraíba – Brazil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 38, n. 2, p. 179-186, 2016. DOI: 10.4025/actasciobiols.v38i2.29089

SANTANA, O. A. Minimum age for clear-cutting native species with energetic potential in the Brazilian semi-arid region. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 47, n. 3, p. 411-417, 2017. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0392

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I. . Influencia del relleno sanitario de la ciudad de Goiânia sobre la agrupación de especies arbóreas en la sabana brasileña. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 15, p. 58-66, 2018. DOI: 10.18845/RFMK.V15I37.3596

SANTANA, O. A. *et al.* Aerial survey of nonstandard firewood consumption in urban areas. In: **2019 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)**, LA, USA, p. 1-4, 2019. DOI: 10.1109/GreenTech.2019.8767160

SANTANA, O. A. *et al.* Deep learning practice for high school student engagement in STEM careers. In: **2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**, Porto, 2020a. p. 164-169. DOI: 10.1109/EDUCON45650.2020.9125281

SANTANA, O. A. *et al.* Interactive Model Tool about Center of Mass during COVID-19 Pandemic: A New Learning Path in STEM for K-12 Education. In: **2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)**, Takamatsu: IEEE, 2020b. p. 503-508. DOI: 10.1109/TALE48869.2020.9368486

SANTANA, O. A.; SILVA, C. F.; LIMA, M. L. F. Water Footprint at Schools with Arduino Project: STEM and Sustainable Development Goals. In: **2021 in IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)**, Princeton: IEEE, 2021. p. 154-158. DOI: 10.1109/ISEC52395.2021.9764010

SLIMEN, I. B. *et al.* Thermoprotective properties of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* cladodes and mesocarps on sheep lymphocytes. **Journal of Thermal Biology**, v. 81, p. 73-81, 2019. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2019.02.018

SNYMAN, H. A. Growth Rate and Water-Use Efficiency of Cactus Pears *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. **Arid Land Research and Management**, v. 27, n. 4, p. 337-348, 2013. DOI: 10.1080/15324982.2013.771232

SOTTILE, F. *et al.* Hand-made paper obtained by green procedure of cladode waste of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. from Sicily. **Natural product research**, v. 35, n. 3, p. 359-368, 2019. DOI: 10.1080/14786419.2019.1631820

VENTURA-AGUILAR, R. I. *et al.* Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 15, p. 5065-5073, 2017. DOI: 10.1002/jsfa.8493

VERON, H. E. *et al.* Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice fermented with autochthonous *Lactobacillus plantarum* S-811. **Food & Function**, v. 10, n. 2, p. 1085-1097, 2019. DOI: 10.1039/c8fo01591k

XU, Z. *et al.* Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 375-383, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.108

ZAMORA-IZQUIERDO, M. A. *et al.* Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. **Biosystems Engineering**, v. 177, n. 1, p. 4-17, 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. New Jersey, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.

ZHAO, H. *et al.* Practical Model for Energy Consumption Analysis of Beam Pumping Motor Systems and Its Energy-Saving Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 2, p. 1006-1016, 2018. DOI: 10.1109/TIA.2017.2779103

ZHENG, G.; HUANG, Q. Energy optimization study of rural deep well two-stage water supply pumping station. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 24, n. 4, p. 1308-1316, 2016. DOI: 10.1109/TCST.2015.2498140

Recebido: 18/02/2021

Aprovado: 18/05/2022

DOI: 10.3895/rts.v18n52.13850

Como citar: LOPES DE FREITAS LIMA, M. *et al.* Água para indústria 4.0 em um sistema embarcado no semiárido brasileiro. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 52, p.19-37, jul./set., 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/13850>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

