

SISTEMA PARA APLICAÇÃO DE ÁGUA A TAXAS VARIÁVEIS EM PIVÔ CENTRAL

David Ribeiro Lino¹, Gilbenes Bezerra Rosal², Adunias dos Santos Teixeira³

RESUMO: Entre as estratégias utilizadas para o manejo de irrigação com lâminas de água a taxa variável o controle da vazão e da pressão nas tubulações é essencial. A vazão e a pressão são grandezas físicas intimamente relacionadas, portanto, ao alterar uma destas grandezas, o sistema deve se adaptar. O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um algoritmo para controle de pressão em sistemas de irrigação por pivô central utilizando o método da aplicação de lâmina de irrigação à taxa variável. O algoritmo foi desenvolvido para definir a frequência elétrica ideal no inversor de frequência para que a pressão no último aspersor seja próxima à pressão alvo, definida pelo operador no aplicativo. Os ensaios realizados para avaliar o algoritmo constataram a sua eficácia no controle da pressão na tubulação. O algoritmo manteve a carga hidráulica próxima à carga alvo de 15 mca. Houve uma redução de aproximadamente 50% no consumo de energia elétrica no conjunto motobomba com o inversor de frequência sendo ajustado pelo algoritmo entre 30 e 60 Hz em comparação ao cenário com o inversor de frequência em 60 Hz.

PALAVRAS-CHAVE: automação; IoT; irrigação.

SYSTEM FOR VARIABLE RATE WATER APPLICATION IN CENTER PIVOT

ABSTRACT: Among the strategies for managing irrigation with variable-rate water application, controlling the flow and pressure within the pipelines is essential. Flow and pressure are closely related physical quantities, therefore, when one of these quantities changes, the system must adapt. This study aimed to develop a pressure control algorithm for center pivot irrigation systems utilizing variable-rate irrigation. The algorithm was developed to set the ideal electrical frequency in the frequency inverter so that the pressure at the last sprinkler is close to the target

¹ Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, CEP 60455-760 s/n, Fortaleza, CE. e-mail: rdavid.lino@gmail.com

² Doutorando em Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE. e-mail: gilbenesbezerrarosal@gmail.com

³ Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE.

pressure, set by the operator in the application. Tests conducted to evaluate the algorithm confirmed its effectiveness in controlling the pipeline pressure. The algorithm maintained the hydraulic head near the target of 15 mca. There was an approximately 50% reduction in the electrical energy consumption of the motor-pump set with the frequency inverter adjusted by the algorithm between 30 and 60 Hz, compared to the scenario with the frequency inverter at 60 Hz.

KEYWORDS: automation; IoT; irrigation.

INTRODUÇÃO

Com o aumento das áreas cultivadas e o desenvolvimento tecnológico o grau de automatização vem crescendo. Apesar do alto investimento inicial o sistema de irrigação por pivô central assegura economia de mão-de-obra, tubulação e aspersores em relação ao sistema convencional (CARVALHO et al., 2020). Devido às características e condições em campo é necessário alterar a lâmina aplicada radialmente conforme a necessidade hídrica em cada local. A aplicação por taxa variável altera a vazão nos aspersores e, por consequência, a lâmina aplicada (O'SHAUGHNESSY et al., 2019).

O sistema de irrigação com aplicação por taxa variável, permite que a vazão total no sistema seja modificada de acordo as necessidades hídricas do solo e da cultura (LEÓN-MOSTACERO et al., 2017). Como a alteração da vazão ocasiona a mudança da pressão no sistema, o mal dimensionamento altera a pressão na tubulação e pode aumentar o custo energético de bombeamento e causar transientes hidráulicos (BARBOSA et al., 2018). Por isso, utiliza-se o controle da velocidade de rotação dos motores para ajustar as cargas hidráulicas nas tubulações de acordo com a sua vazão momentânea, sendo mais indicado o uso de inversores de frequência (BARROSO; INÁCIO; OLIVEIRA, 2022).

A aplicação de água a taxa variável pode proporcionar um melhor controle de pressão no sistema, evitar o rompimento de tubulações devido ao aumento de pressão e diminuir os custos de energia com o bombeamento (MORAES et al., 2014). O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de controle de pressão nas tubulações para implementação em sistemas de irrigação de pivô central que utilizam o método de aplicação de lâmina à taxa variável.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) na Universidade Federal do Ceará (UFC). Construiu-se um sistema de irrigação para simular um vão de um pivô central (Figura 1).

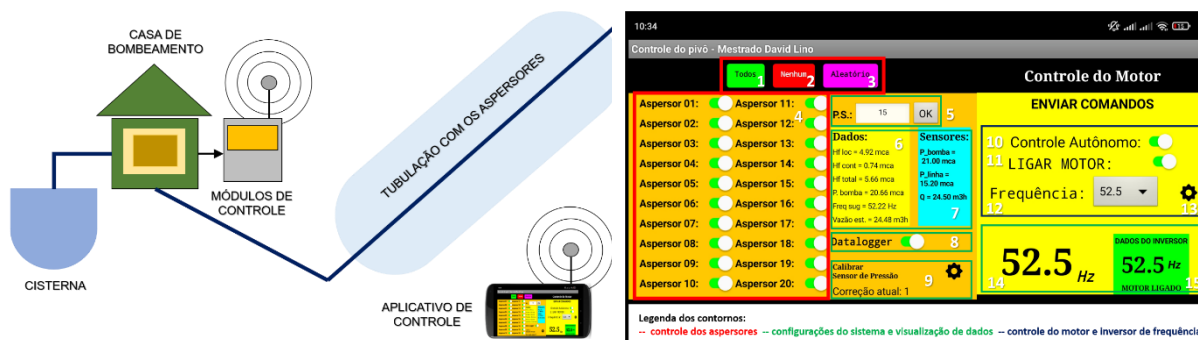


Figura 1 – Visão geral do sistema de irrigação e do aplicativo MeuPivô

Foram instalados microcontroladores para receber dados, acionar solenoides e controlar o inversor de frequência com o aplicativo “MeuPivô” via internet. Utilizamos tubulação de PVC DN75, aspersores i-wob2 (seta 1) e reguladores de pressão de 10 PSI (seta 2) da Senninger, válvula solenoide Rain Bird HV 1” (seta 3), o espaçamento entre aspersores foi de 2,3 m (Figura 2).



Figura 2 – (A) Detalhamento dos pendurais de aspersores; (B) Vista em perspectiva do sistema irrigando

Escolheu-se a frequência elétrica em função da vazão instantânea na tubulação e a pressão necessária na saída da bomba obtida por um modelo matemático para estimar a frequência elétrica no inversor. Para o modelo, medimos a carga hidráulica na motobomba (H - mca), vazão na tubulação (Q - $m^3 h^{-1}$) e frequência elétrica no inversor (F - Hz). Utilizamos uma bomba centrífuga KSB; manômetro; sensor de vazão ultrassônico Portalok e inversor de frequência VDF-E da Delta. Foram realizados ensaios para determinação das curvas características no intervalo de frequência de 30 Hz a 60 Hz, com incremento de 5 Hz, variando de 0 até chegar a vazão máxima. A Pressão necessária na saída da bomba (P1 - mca) foi o

resultado das somas das perdas de carga do primeiro e segundo trecho ($Hf_1 + Hf_2$) acrescida da PS do último aspersor. Com isso, construiu-se um modelo de regressão para obter a frequência elétrica estimada em função da vazão e da pressão (Equação 1).

$$F = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 H + \beta_3 Q^2 + \beta_4 Q H + \beta_5 H^2 + \varepsilon \quad (1)$$

Calculou-se Hf_1 através da diferença de pressão entre os pontos P1 e P2 (PS do 1º ao último aspersor), assim, foi gerado um modelo de regressão para estimar Hf_1 em função da vazão (Equação 2). A Hf_2 foi calculada utilizando o método de perda de carga em múltiplas saídas com a equação de Darcy-Weisbach (Equação 3).

$$Hf_1 = 0,009Q^2 - 0,0581Q + 0,548 \quad (2)$$

$$Hf_i = f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{v_i^2}{2g} \quad (3)$$

Onde: i = i -ésimo trecho; f = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional); L = comprimento do tubo; v = velocidade do líquido no tubo ($m s^{-1}$); D = diâmetro interno do tubo (m); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Com $L = 2,3$ m; $D = 0,0705$ m; $g = 9,781$ $m s^{-2}$ constantes, calculamos a v e f trecho a trecho. Quando o número de Reynolds (Re_i) foi inferior a 2100 (regime laminar) utilizou-se a Equação 5 e para regimes de escoamento turbulento a equação de Colebrook-White (Equação 6) com o método iterativo de Newton-Raphson. A Hf_2 foi definida pela soma das perdas de carga individuais entre aspersores (Equação 7) e a pressão necessária na saída da bomba ($P_b - mca$) pela Equação 8, considerando a pressão de serviço no último aspersor (PS - mca).

$$v_i = \frac{4 \sum_{j=1}^i Q_j}{\pi D_i^2} \quad (4)$$

$$f_i = \frac{64}{Re_i} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_i}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3,7D_i} + \frac{2,51}{Re_i \sqrt{f_i}} \right) \quad (6)$$

$$Hf_2 = \sum_{i=1}^{19} hf_i \quad (7)$$

$$P_b = Hf_1 + Hf_2 + OS \quad (8)$$

Utilizamos dois cenários para avaliar o algoritmo. No primeiro, a motobomba foi energizada $F = 60$ Hz sem ajuste de pressão. No segundo, o inversor de frequência foi controlado pelo algoritmo. Cada cenário durou 30 minutos, subdivididos em 6 estágios de 5 minutos com 5 diferentes combinações dos aspersores para que houvesse mudanças na vazão do sistema e o sexto estágio com todos os aspersores (Figura 3).

Estágios (min)	Aspersores																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0 a 5	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
5 a 10	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
10 a 15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
15 a 20	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
20 a 25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
25 a 30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3 - Combinações de aspersores utilizados para os testes. Fonte: elaborado pelo autor. 0 – desligado; 1 – ligado.

Obtivemos a vazão instantânea do sistema, PS no último aspersor, frequência elétrica sugerida pelo algoritmo (FES, Hz) e a frequência elétrica real (FER, Hz). Durante os ensaios, foram coletados dados de potência ativa (P, kW) e energia ativa (Ep, kWh) com o analisador de energia Fluke para aferir o consumo de energia elétrica. Foram realizados 16 steps em que o step zero (0) foi reservado para habilitar o controle manual no próprio inversor e os steps de 1 a 15 foram as frequências de 60; 57,5; 55; 52,5; 50; 47,5; 45; 42,5; 40; 37,5; 35; 32,5; 30; 27,5 e 25 Hz, respectivamente. O algoritmo de controle de pressão foi programado para escolher o step com 2,5 Hz superior à frequência elétrica estimada pela Equação 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo de controle de pressão baseia-se em um modelo de regressão não linear (Equação 9) que estima a frequência elétrica (\hat{F}) em função da vazão (Q) e da carga hidráulica (H).

$$\hat{F} = 17,57348 + 0,17912Q + 1,4992H + 0,01275Q^2 - 0,00844QH - 0,00960H^2 \quad (9)$$

O modelo obtido demonstrou alta precisão, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9986 (Figura 4).

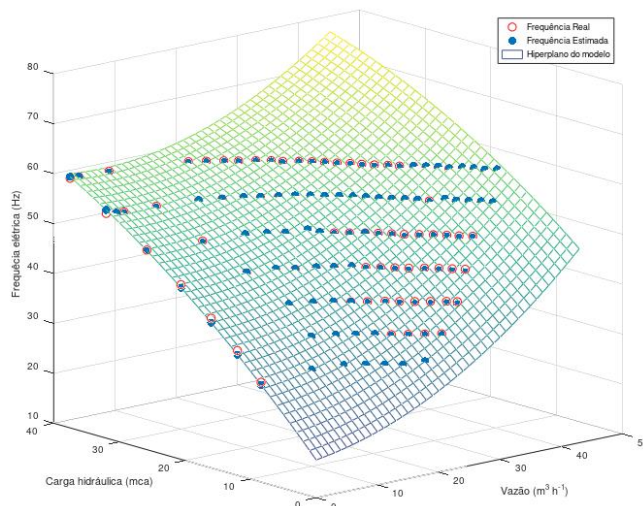


Figura 4 – Representação gráfica do modelo da frequência elétrica no ensaio com a bomba centrífuga

No cenário com controle o algoritmo adaptou-se dinamicamente a frequência em resposta às variações da vazão, acompanhando a frequência sugerida (Figura 5D). Essa estratégia contribuiu para a robustez e confiabilidade do controle de pressão momentânea (BARROSO; INÁCIO; OLIVEIRA, 2022).

O algoritmo foi programado para escolher a frequência elétrica no step imediatamente superior (2,5 Hz acima da frequência estimada pela Equação 9). Embora essa escolha pudesse resultar em uma diferença de aproximadamente 2 Hz em relação à frequência sugerida (como no ponto D1, Figura 5D), e conseqüentemente uma carga ligeiramente acima do alvo (pontos F2 e F7, Figura 5F), essa abordagem garantiu que a pressão de serviço mínima do aspersor fosse sempre atendida. Os reguladores de pressão nos aspersores foram cruciais para dissipar a carga extra e assegurar o funcionamento ideal do sistema.

O impacto mais significativo foi observado na carga hidráulica do último aspersor (Figuras 5E e 5F). Sem o algoritmo, a carga hidráulica se manteve excessivamente elevada, atingindo picos de 33 mca em estágios de menor vazão (Figura 5E). Em contraste, com o controle do algoritmo, a carga hidráulica se manteve controlada e estável em torno da carga alvo de 15 mca (Figura 5F). A pronta resposta do algoritmo às mudanças bruscas de vazão (indicadas por B1 e B2, resultando em D3 e D5, Figura 5D) demonstra a rápida adaptação do sistema a cenários dinâmicos. Essa capacidade é essencial para sistemas de irrigação com taxa variável, que exigem ajustes contínuos da vazão conforme o sistema e as necessidades hídricas do solo, evitando transientes hidráulicos e economizando energia (BARBOSA et al., 2018).

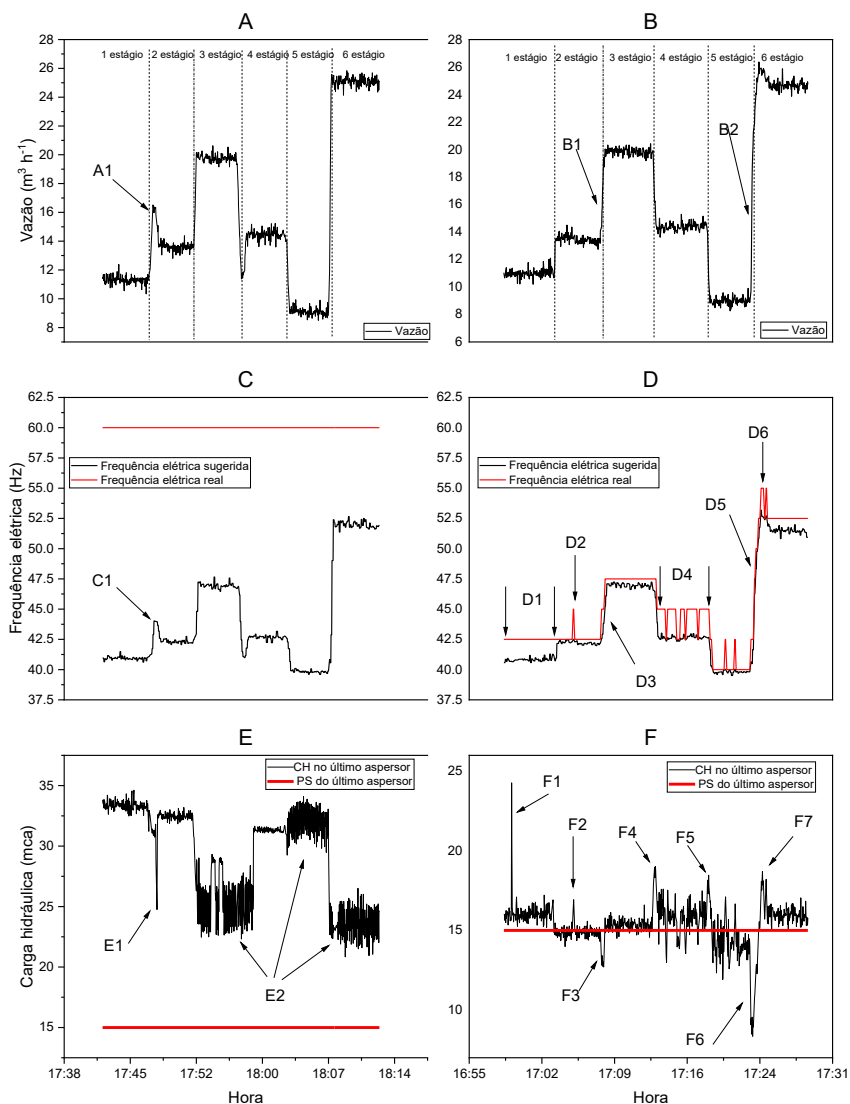


Figura 5 – Sistema com e sem o controle do algoritmo. (A) Vazão, motobomba à 60 Hz; (B) Vazão, motobomba à frequência ajustada; (C) e (D) Frequência elétrica sugerida pelo algoritmo e frequência elétrica atual no inversor; (E) carga hidráulica no último aspersor, sem o controle do algoritmo; (F) carga hidráulica no último aspersor com o controle do algoritmo.

A análise de energia revelou reduções expressivas no consumo da motobomba com a aplicação do algoritmo (Figura 6). No cenário sem o algoritmo a potência ativa média foi de 3,67 kW. Com o algoritmo, a potência ativa média reduziu para 2,01 kW. Em termos de demanda energética total o sistema operando a 60 Hz consumiu 1,5064 kWh, enquanto com a frequência ajustada pelo algoritmo, o consumo foi de 0,76602 kWh (Figura 6B). Essa diferença representa uma redução de 50,85% na demanda energética do sistema.

A economia de 50% no consumo de energia elétrica confirma o potencial dos inversores de frequência no controle da velocidade de rotação dos motores para diminuir os custos de bombeamento. O estudo corrobora com Moraes et al. (2014) que obteve redução dos custos entre 18 e 52% com automação em pivôs centrais.

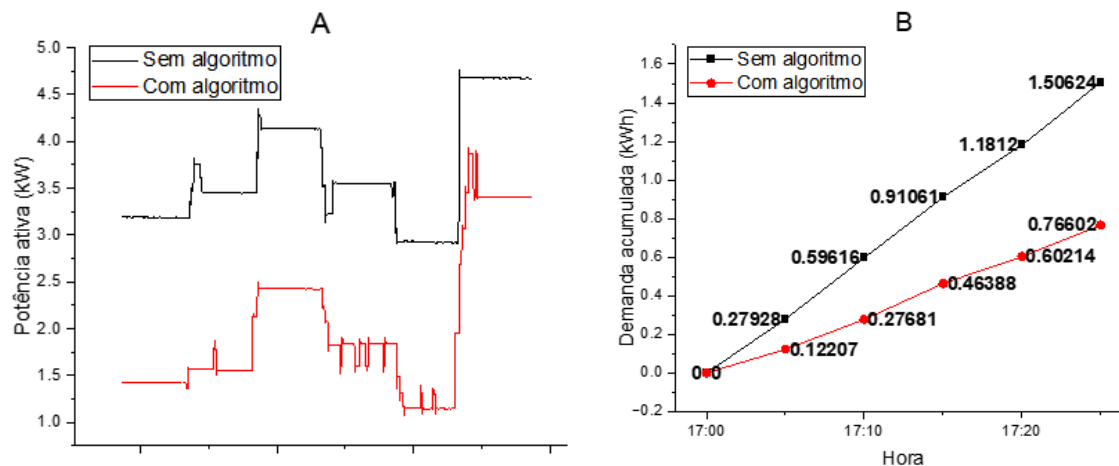


Figura 6 - Análise de energia na motobomba, para o primeiro e segundo ensaio. (A) Potência elétrica ativa (kW); (B) Demanda energética do sistema (kWh)

CONCLUSÕES

O algoritmo manteve a carga hidráulica próxima à carga alvo (set point) de 15 mca. Quando os valores de carga real foram superiores a carga alvo o regulador de pressão entre o ponto de tomada de pressão e o aspersor atuou controlando.

A frequência recomendada é no intervalo de 30 Hz a 55 Hz. Em pesquisas futuras pode-se reprogramar o inversor para reajustar os intervalos na faixa de 30 Hz a 55 Hz, com intervalos de 1 Hz, melhorando assim a acurácia no momento de escolher o step a ser enviado para o inversor de frequência.

Houve uma redução de até 50% na demanda energética da motobomba com o ajuste de frequência, o que mostra que essa tecnologia aplicada à pivôs com manejo de irrigação à taxa variável pode gerar economia de água e energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, B. D. S.; COLOMBO, A.; SOUZA, J. G. N. de; BAPTISTA, V. B. da S.;
- ARAÚJO, A. C. S. de. Energy efficiency of a center pivot irrigation system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 2, p. 284-292, 2018.

BARROSO, F. S. M.; INÁCIO, M. J.; OLIVEIRA, F. G. EMBEDDED FUZZY CONTROLLER FOR APPLICATION IN IRRIGATION SYSTEMS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 42, 2022.

CARVALHO, D. F.; MARTINS, R. C. F; DOS SANTOS, J. J. S.; TELES, G. C.; GENTILE, M. A. D.; DE OLIVEIRA, M. S. Evolution and current scenario of irrigated area in Brazil: Systematic data analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 8, p. 505-511, 2020. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p505-511>.

LEÓN-MOSTACERO, J. A.; GAVI-REYES, F.; FLORES-MAGDALENO, H.; ASCENCIO-HERNÁNDEZ, R.; FLORES-GARDEA, C. Desarrollo de un sistema de riego de precisión en un pivote central. **Tecnología y Ciencias del Agua**, Morelos, v. 8, n. 4, p. 101-116, 4 jul. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-06>.

MORAES, M. J.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; MONTEIRO, P. M. B.;

MENDES, A. L. C.; DAMIÃO, J. H. A. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000600005>

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; ANDRADE, M. A.; MAREK, T. H.; HEEREN, D. M.; LAMM, F. R.; LARUE, J. L. Identifying Advantages and Disadvantages of Variable Rate Irrigation: An Updated Review. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 35, n. 6, p. 837-852, 2019. DOI 10.13031/aea.13128.