

AValiação dos Transientes Hidráulicos em Bombeamento Coletivo e Bombeamento Individual em Perímetro de Irrigação

RODRIGO RIBEIRO FRANCO VIEIRA¹ E JOÃO LUIZ ZOCOLER²

¹ Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. CODEVASF 6 SR Av Comissão do Vale, s/n, Piranga, 48901-900, Juazeiro, Bahia – Brasil, rodrigo.vieira1965@unesp.br

² Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Rua Monção, 830, Zona Norte, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil, Caixa Postal 31, jl.zocoler@unesp.br

1 RESUMO

Objetivou-se neste trabalho comparar os transientes hidráulicos em projeto de irrigação sob pressurização coletiva e individual, incluindo-se os custos dos investimentos somados aos de energia elétrica. Foram utilizados os softwares IRRICAD, para a extração das curvas de nível, o EPANET para o cálculo da rede em regime permanente e o Sistema UFC, que utiliza o Método das Características (MOC), para calcular a intensidade dos transientes hidráulicos nos dois modelos de projetos, pressurização coletiva e individual. A adoção dos dispositivos antitransientes corretos, neste caso os tanques de ação unidirecional (TAUs) proporcionou um investimento adicional de apenas 2,17% na pressurização individual e 7,60% na pressurização coletiva, consequência da maior quantidade e tamanho dos dispositivos antitransientes, bem como necessidade de tubos de maior classe de pressão. Contudo, considerando-se os investimentos em reservatórios e estações de bombeamento em cada lote, a pressurização individual se tornou mais onerosa que a coletiva, sendo o efeito ainda mais intenso quando foram acrescidos os custos com energia elétrica devido a menor eficiência energética dos conjuntos motobombas das estações individuais.

Palavras-chave: Custos do dispositivo antitransiente, tanque de alimentação unilateral (TAU), sistema UFC7.

**VIEIRA, R. R. F.; ZOCOLER, J. L.
EVALUATION OF HYDRAULIC TRANSIENTS IN COLLECTIVE AND
INDIVIDUAL PUMPING AT IRRIGATION PERIMETER**

2 ABSTRACT

This work compared the effects of hydraulic transients in irrigation projects under collective and individual pressurization, including the costs of investments added to those of electrical energy. The IRRICAD software was used to extract the contour lines, and the EPANET software was used to calculate the steady-state network and the UFC system, which uses the characteristics method (MOC), to calculate the intensity of the hydraulic transients in the two project models, i.e., collective and individual pressurization. The adoption of the correct antitransient devices, in this case, the one-way surge tanks (TAUs), provided an additional

investment of only 2.17% in individual pressurization and 7.60% in collective pressurization, a consequence of the greater quantity and size of antitransient devices, as well as the need for tubes with a higher pressure class. However, considering the investments in reservoirs and pumping stations in each batch, individual pressurization became more expensive than collective pressurization, and the effect was even more intense when electricity costs were added due to the lower energy efficiency of the motor pump sets of the individual stations.

Keywords: Antitransient device costs, one-way surge tank, UFC7 system.

3 INTRODUÇÃO

Os projetos públicos de irrigação somam em torno de 200 mil hectares, distribuídos em 79 projetos e 88 municípios, notadamente a maior parte no semiárido brasileiro, e são responsáveis por 116 empregos diretos e 172 indiretos a cada 100 hectares produtivos (ANA, 2021), o que significa que atualmente há cerca de 580 mil empregos que dependem da agricultura irrigada sob domínio dos perímetros públicos.

Há dois regimes de escoamento em projetos hidráulicos, o regime permanente (RP) e regime transitório (RT), que tem sido negligenciado pela agricultura irrigada do Brasil. No regime permanente, as propriedades de densidade, velocidade e pressão do fluido não se alteram em determinado ponto da rede, em determinado intervalo de tempo (Chaudhry, 2014), porém podem variar entre diversos pontos, mas, permanecendo constante no tempo para um dado ponto qualquer (Wylie; Streeter, 1978). A mudança das condições de escoamento que levam à variação de velocidade e vazão denomina-se transiente hidráulico (ou golpe de aríete) (Wylie; Streeter, 1979 apud Schimidt, 2016, p. 11).

Os valores das cargas hidráulicas no regime permanente podem ser calculados utilizando-se as equações da continuidade e de Bernoulli (que se refere à conservação da energia em determinado sistema), enquanto o regime transitório aplica equações específicas (Vianna, 2021). A análise dos transientes hidráulicos não está aderida ao

cotidiano dos profissionais da área de irrigação, sendo um tema complexo, porém este tema pode ser exposto de forma mais intuitiva, acessível e fácil (Veiga, 2014).

São vários os métodos aplicados ao longo das décadas para a determinação dos transientes hidráulicos (Wylie; Streeter, 1978; Veiga, 2014) e, neste trabalho, foi utilizado o método das características (MOC), considerado o mais adequado e preciso, que converte equações diferenciais parciais da continuidade e do movimento em equações diferenciais ordinárias resolvidas numericamente através de técnicas de diferenças finitas (Gray, 1953; Streeter; Lai, 1962; Chaudhry, 2014). Os transientes hidráulicos são muito complexos e não possuem solução através de cálculos manuais (Veiga, 2014).

As equações iniciais dos transientes hidráulicos são as da quantidade de movimento (Equação 1) e equação da continuidade ou conservação da massa (Equação 2), conforme Carvalho (2011). Estas são assim apresentadas (Castro, 2022):

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{S^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f Q |Q|}{2 g D S^2} = 0 \quad (1)$$

O termo em módulo na Eq. (1) significa que o fluxo pode se dar em ambos os sentidos.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{S} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a^2}{g S} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Onde H é a altura manométrica (mca), Q é a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), t é o tempo (s), x é distância num trecho longitudinal da

tubulação, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), D é o diâmetro da tubulação (m), S é a área da seção da tubulação (m^2), f é o coeficiente de atrito (Colebrook) e a é a celeridade (m s^{-1}).

Com base nas Equações 1 e 2, o método das características permite sua solução algébrica (Wyllie; Streeter, 1993 apud Silva, 2006), se tornando um método padrão para a análise de transientes em condutos fechados (Chaudhry, 1993 apud Schimidt, 2016, p. 27).

Empregando-se as Equações 3 e 4, em determinado volume de controle obtêm-se duas equações diferenciais não lineares nas incógnitas carga piezométrica (H) e velocidade (V) em função do espaço (x) e do tempo (t), as quais resultam na determinação das pressões e velocidades ao longo do tempo, relacionando a causa (manobra) ao efeito (transiente hidráulico) (Veiga, 2014).

Streeter e Wylie (1982) as denominaram como equações características positivas (C^+) e Características Negativas (C^-) (Equação 3 e 4, respectivamente), podendo ser expressas da seguinte forma (Magalhães, 2018):

Equação 3 – Característica positiva (montante)

$$C^+: H_P - H_A + \frac{a}{gS} (Q_P - Q_A) + I^+ = 0 \quad (3)$$

Equação 4 – Característica negativa (jusante)

$$C^-: H_P - H_B - \frac{a}{gS} (Q_P - Q_B) + I^- = 0 \quad (4)$$

Onde H_P é a carga P transitória (em mca) no instante $t + \Delta t$, H_A é a carga A permanente a montante (em mca) no instante t ; H_B é a carga B permanente a jusante (em mca) no instante t (m); Q_P é a vazão transitória (em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em P no instante $t + \Delta t$, Q_A é a vazão (em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em A no instante t ; Q_B é a vazão (em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em B no instante t ; a é a celeridade (m s^{-1}), g é a

aceleração da gravidade = $9,81 \text{ (m s}^{-2}\text{)}$, S é a área da seção da tubulação (m^2) e I^+ e I^- é a integração entre a perda de carga e a declividade do trecho (tubo) (m).

Os efeitos práticos das equações C^+ e C^- nas condições de contorno definem o comportamento das fronteiras de cada tubulação em suas extremidades (Tomaz, 2010), que definem e dão magnitude aos efeitos transitórios (Magalhães, 2018).

São vários os recursos e equipamentos empregados para a solução (ou atenuação) da intensidade do golpe de ariete ou transiente hidráulico, considerando-se as subpressões (TAU, ventosa duplo efeito, by-pass, TAEB, TAEB-EV), sobrepressões (válvulas de alívio e antecipadora de ondas) ou ainda para ambos os casos (volante de inércia, TAB, tanque hidropneumático, chaminé de equilíbrio, ventosas “non slam”) (Vieira, 2021b).

Isto posto, este trabalho teve como objetivo específico comparar os efeitos dos transientes hidráulicos em projeto de irrigação com pressurização coletiva e projeto de irrigação com pressurização individual, com a análise dos custos dos investimentos somados aos da energia elétrica ao longo de 20 anos em um perímetro irrigado.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Condições analisadas e softwares utilizados:

Analisaram-se neste estudo as seguintes condições:

- i) Considerando somente o regime permanente com pressurização coletiva (RPPC);
- ii) Considerando somente o regime permanente com pressurização individual (RPPI);

iii) Considerando o regime permanente e o regime transitório com pressurização coletiva (RPTPC);

iv) Considerando o regime permanente e o regime transitório com pressurização individual (RPTPI). Nas duas condições em que o regime transitório foi considerado (RPTPC e RPTPI), a intensidade dos transientes hidráulicos foi estimada pelo MOC através do software UFC, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará, sendo também avaliadas as melhores alternativas sua atenuação.

Foram comparados os efeitos dos transientes hidráulicos no caso da pressurização coletiva e na individual dos lotes, determinando o menor dos valores (somados os investimentos aos custos com energia elétrica ao longo de 20 anos). As premissas adotadas na análise para ambos os regimes (permanente e transitório) foram:

- As redes possuem iguais diâmetro e material (alterando-se apenas as classes de pressão quando fosse o caso);
- Os lotes possuem área de 6 ha, vazão unitária de $0,8 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}$, vazão total de $4,8 \text{ L s}^{-1}$;
- O tempo de operação máximo da irrigação foi de 21 horas dia^{-1} , com e 30 dias mês^{-1} , no período de maior demanda (outubro);
- Nos perímetros com pressurização coletiva adotou-se 31,66 mca de pressão mínima, naqueles com pressurização individualizada adotou-se 5 mca;
- Todos os lotes vão operar o mesmo tempo;
- Todas as demais condições dos perímetros foram iguais para ambas as alternativas e apenas os dispositivos para atenuação do golpe de aríete foram particularizados;
- Os setores de irrigação para ambas as alternativas estudadas são iguais;
- Foram empregadas bombas standard (ou de catálogo) para todas os cenários avaliados.

4.2 Cenários de estudo:

Foram analisados os seguintes cenários, para a quantificação dos efeitos dos

transientes hidráulicos nos perímetros de irrigação:

- RPPC - Regime permanente com pressurização coletiva;
- RPTPC - Regime permanente e transitório com pressurização coletiva;
- RPPI - Regime permanente com pressurização individual;
- RPTPI - Regime permanente e transitório com pressurização individual;

Foram empregados os seguintes softwares para a evolução dos trabalhos:

- CLIMWAT (FAO), conjugado ao CROPWAT, para a obtenção dos dados de evapotranspiração potencial (ET_o) e precipitação efetiva (PE) incidentes na área;
- IRRICAD, para a extração das curvas de nível da área do Estudo, a partir do Google Earth;
- EPANET, para o cálculo do regime permanente, cujos dados (diâmetro das redes e pressões permanentes) foram gerados a partir da rede traçada através do software UFC, na base AUTOCAD;
- Software Sistema UFC, para o cálculo dos transientes hidráulicos e obtenção dos resultados da proteção empregada (Tanques de Ação Unidirecional - TAU) nas 12 subadutoras analisadas, nas opções RPTPC e RPTPI.

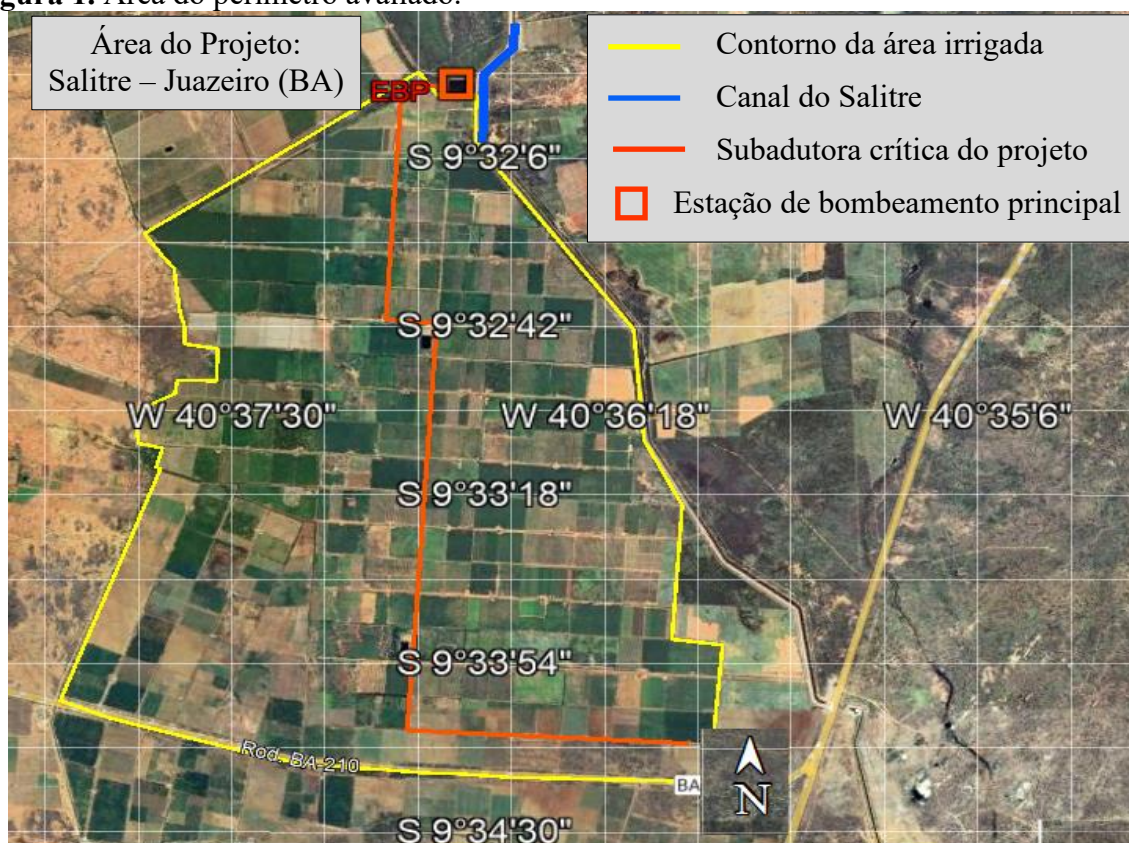
4.3 Identificação da área do perímetro irrigado e topografia

Escolheu-se como base cartográfica o perímetro de irrigação do Projeto Salitre (Codevasf, 2018), em Juazeiro, Bahia, porém o loteamento, vazão, elevatória, redes e aspectos fundiários foram alterados neste trabalho. Esta área se encontra na região semiárida da região Nordeste do Brasil, e responde por mais de 90 % das exportações de manga e uva do país. A área em questão tem topografia plana, e houve subadutoras nas quais os lotes finais estavam e cotas inferiores à estação elevatória coletiva, nas versões de pressurização coletiva (PC) e pressurização individual (PI).

Para a extração das curvas de nível empregou-se o software IRRICAD a partir de uma imagem do Google Earth perfazendo uma área total de 1.164,00 ha, incluindo o canal e a estação de bombeamento principal (EBP) (Figura 1), e foram lançados 156 lotes, com superfície agrícola útil de 936 ha.

Esta área é real, e se localiza entre as coordenadas 8.946.078,79 e 8.941.581,68 Sul e 320.534,46 e 324.668 Leste, no entanto o sistema hidráulico do Estudo teve outra configuração.

Figura 1. Área do perímetro avaliado.



Fonte: Autores, adaptado do Google Earth (2023).

4.4 Determinação da vazão máxima de projeto e tempo de operação do sistema

Considerou-se a cultura da banana – como mera referência para obtenção do tempo de operação do perímetro apenas, não é o caso real – com Kc (coeficiente de cultivo) igual a 1,0 e KL (coeficiente de localização) igual a 0,98, com o tempo máximo de irrigação diário igual 21 h em 30 dias por mês, e uma eficiência de irrigação de 90%, sendo o sistema de microaspersão. Poder-se-ia empregar outra cultura permanente, ou simplesmente ter-se arbitrado uma vazão unitária, já que o foco é

analisar o efeito dos transientes em um perímetro de irrigação, e não a cultura em si.

A vazão máxima de projeto foi calculada aplicando-se os dados climatológicos (ETo) obtidos através dos softwares CLIMWAT 2.0 e tratados com o CROPWAT versão 8.0, da FAO (Food and Agriculture Organization). O primeiro foi desenvolvido em 2006, e emprega os dados advindos do grupo agrometeorológico do grupo FAO / SDRN (Environmental and Natural Resources Service), sendo que estes dados podem ser utilizados no balanço hídrico, com a devida confiabilidade. No que concerne ao CROPWAT, este também da

FAO, foi desenvolvido pela Unidade de Fomento e Gestão das Águas e permite a elaboração do balanço hídrico através da inserção de dados de clima, solo e planta.

Ressalta-se que o CROPWAT não elabora balanço hídrico para plantios de caráter permanente, foi utilizado apenas para se obter os dados de evapotranspiração de referência e de precipitação efetiva, para a qual adotou-se a opção “precipitação não considerada” para todos os meses. A estação escolhida no CLIMWAT foi Petrolina, Pernambuco, de número 181, longitude -40,48 e latitude -9,38, com altitude de 370 metros, pois é a mais próxima da área empregada como base. Ali há uma série de dados históricos disponíveis, incluindo a estação meteorológica da EMBRAPA-CPATSA.

Elaborado o balanço hídrico, obteve-se um tempo de operação de 2.865 e 3.043 horas anuais para os períodos Fora de Ponta e Reservado, respectivamente. A vazão máxima $4,8 \text{ L s}^{-1} \text{ lote}^{-1}$, e vazão de projeto $748,80 \text{ L s}^{-1}$, valor aplicado para o dimensionamento as tubulações, dispositivos antigolpes e motobombas.

4.5 Cálculos hidráulicos do perímetro

Extraídas e estabelecidas as curvas de nível (a cada metro), o arquivo foi transformado, via exportação, do formato do IRRICAD (dez) no formato “dxf” e, posteriormente, em AUTOCAD versão

2022, em arquivo “dwg”. Assim, obteve-se a planta para o emprego do UFC/EPANET. O EPANET é um software livre desenvolvido em Cincinnati, Ohio, nos EUA, sendo uma valiosa ferramenta para projetos e simulação do regime permanente (RP) e dos custos finais das opções analisadas.

O EPANET foi aplicado após o lançamento das redes através do UFC, na base AUTOCAD. Uma vez dimensionados os diâmetros e classes de pressão relativas ao regime permanente, (EPANET via UFC) foram realizadas as análises de transientes utilizando o software UFC.

Para tal intento, subdividiu-se a rede em 12 subadutoras distintas, analisadas de forma individual para as opções RPTPC e RPTPI, e ao final obtiveram-se os quantitativos e proteções antitransientes finais.

Calculou-se a pressão necessária na entrada dos lotes para as opções RPPC (31,66 mca) e RPPI (5 mca).

4.6 Quantitativos das alternativas (RPPC, RPPI, RPTPC e RPTPI)

Itens comuns às alternativas, em ambos os regimes (permanente e transitórios) não foram contabilizados, apenas aqueles que diferem as soluções. A Tabela 1, a seguir, detalha os itens avaliados e cotados para todos os cenários considerados.

Tabela 1. Itens avaliados e cotados das alternativas consideradas. Sendo: RPPC – Regime Permanente com Pressurização Coletiva, RPPI – Regime Permanente com Pressurização Individual, RTPC – Regime Permanente e Transitório com Pressurização Coletiva e RTPI: Regime Permanente e Transitório com Pressurização Individual.

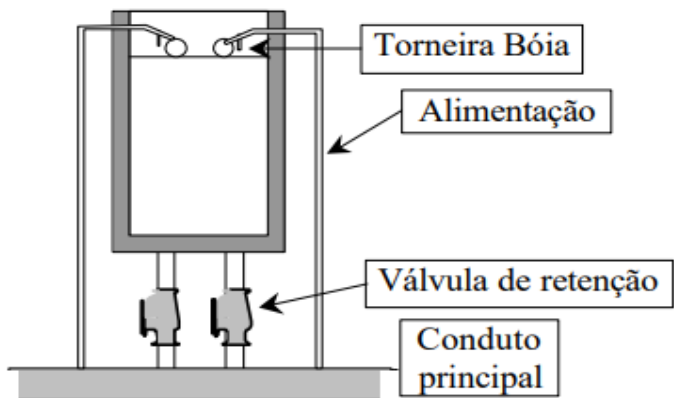
ITEM	RPPC	RPPI	RTPC	RTPI
Tubulações redes	SIM	SIM	SIM	SIM
Conjuntos motobombas coletivos	SIM	SIM	SIM	SIM
Soft starters motobombas coletivos	SIM	SIM	SIM	SIM
Conjuntos motobombas lotes completos	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Chaves de partida motobomba lotes	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Válvulas PR/FR	SIM	NÃO	SIM	NÃO
Boias de grande vazão	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Reservatórios lotes	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Custos com energia elétrica EBP	SIM	SIM	SIM	SIM
Custos com energia elétrica bombas lotes	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Dispositivos de proteção TH	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Linhas principais lotes	SIM	SIM	SIM	SIM
Obras civis	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Autores (2023).

Foi escolhido o tanque de ação unidirecional (TAU) para o arrefecimento dos transientes hidráulicos em todas as subadutoras e opções, pois a quantidade magnitude e dimensão de tais dispositivos permitiriam um comparativo entre as opções de pressurização coletiva e individual. Estes dispositivos são fabricados em função da simulação dos transientes (subpressões)

incidentes, e não há medidas-padrão, como válvulas e ventosas. Podem ter o corpo de aço, concreto e fibra de vidro (empregado no estudo), desde que suporte a carga estática resultante do seu enchimento, através da alimentação. Possuem uma boia ou válvula de controle para evitar o transbordamento, e uma válvula de retenção na sua saída, que se abre quando incide a subpressão (Figura 2).

Figura 2. Detalhe do tanque de ação unidirecional (TAU).



Fonte: Massiero Junior (2008).

4.7 Etapas para a elaboração da pesquisa

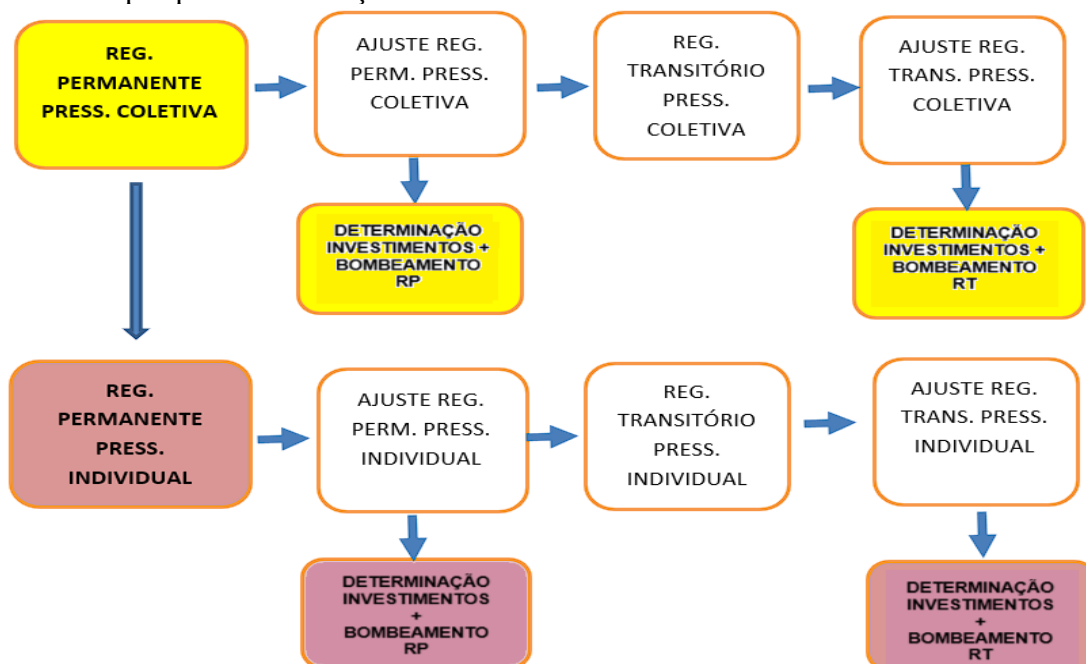
O estudo iniciou pelo cálculo do regime permanente com pressurização coletiva (RPPC), que possui maior altura manométrica total (AMT), sendo depois a pressurização individual aplicando-se o EPANET até se atingir o valor mínimo de pressão de entrada no lote, arbitrado em 5,0 mca.

Os dispêndios (custos) com energia elétrica ao longo de 20 anos foram calculados aplicando-se as tarifas do Grupo A4 horo sazonal verde, no caso da estação de bombeamento principal (EBP), e as tarifas do Grupo B2 Rural Irrigante, no caso das

estações de bombeamento individuais (EBI). Ambas as tarifas da Concessionária Neoenergia COELBA (Companhia de Energia Elétrica da Bahia).

Após o cálculo dos investimentos e dos custos de bombeamento no regime permanente com pressurização coletiva, simulou-se o efeito dos transientes (RPTPC) e, após esta etapa, obtiveram-se valores dos investimentos necessários com os dispositivos antitransientes. O mesmo procedimento foi aplicado no regime permanente com pressurização individual, na qual houve redução da AMT em 26,66 mca. A Figura 3 resume as etapas empregadas na pesquisa.

Figura 3. Etapas para a elaboração do estudo.



Fonte: Autores (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas hidráulicos com pressurização coletiva ficaram submetidos aos efeitos mais intensos dos transientes devido a maior magnitude da pressão (H) de bombeamento em relação à pressurização individual, a qual cada lote possui seu reservatório individual (RES) e sua estação

elevatória individual (EBI). O regime permanente e transitório com pressurização coletiva (RPTPC) requisitou mais e maiores dispositivos para se obter valores aceitáveis de subpressão, que foi o efeito transiente mais perigoso potencialmente às tubulações selecionadas no trabalho, em relação ao regime permanente e transitório com

pressurização individual (RPTPI), conforme pode ser observado na Tabela 2.

A opção RPTPC apresentou 35 pontos de colapso, que exigiram tanques de ação unidirecional (TAUs) de média e grandes dimensões (29 e 6 unidades

respectivamente), enquanto a opção RPTPI, além de exigir menos dispositivos, estes foram em sua maior parte de dimensão pequena (22 unidades), média (9 unidades) e grande (1 unidade apenas).

Tabela 2. Dimensão e quantidade total dos tanques de ação unidirecional (TAU) nas alternativas de pressurização coletiva (RPTPC) e pressurização individual (RPTPI).

Dimensão do TAU		Quantidade	
Altura (m)	Diâmetro (mm)	RPTPC	RPTPI
1,5	1000	0	22
3,0	2000	29	9
6,0	3000	6	1
Total		35	32

Fonte: Autores (2023).

Considerando apenas os investimentos em dispositivos antitransientes (Tabela 3), ou seja, a adoção dos dispositivos antitransientes corretos, neste caso os tanques de ação unidirecional (TAUs), o investimento adicional foi de 7,60% na pressurização coletiva (alternativa 5 em relação à alternativa 1) e de apenas 2,17% na pressurização individual (alternativa 6 em relação à alternativa 2).

Contudo, as alternativas de pressurização coletiva, sem ou com os

dispositivos antitransientes (alternativas 1 e 5, respectivamente), foram menos onerosas em relação às alternativas de pressurização individual, nas quais foram incluídos os investimentos em RES e EBI dos lotes (alternativas 3, 4, 7 e 8, respectivamente). Ou seja, mesmo exigindo maior investimento na estação elevatória principal e na classe de pressão dos tubos principal (devido a maior AMT), tais investimentos não superaram àqueles correspondentes às EBI e aos RES.

Tabela 2. Comparativo dos investimentos nos regimes e nas alternativas consideradas.

Regime	Pressurização (alternativas)	Investimento (R\$)
Permanente	1. Coletiva (RPPC)	8.065.470,83
	2. Individual (RPPI) <u>sem</u> considerar o investimento na estação de bombeamento individual (EBI ¹) e no reservatório (RES) dos lotes	7.880.218,28
	3. Individual (RPPI) considerando o investimento na EBI e no RES ² de volume 18 m ³ dos lotes	9.497.994,95
	4. Individual (RPPI) considerando o investimento na EBI e no RES ³ de volume 147 m ³ dos lotes	9.842.295,95
Permanente e Transiente	5. Coletiva (RPTPC)	8.678.057,31
	6. Individual (RPTPI) <u>sem</u> considerar o investimento na EBI e no RES dos lotes	8.093.841,36
	7. Individual (RPTPI) considerando o investimento na EBI e no RES de volume 18 m ³ dos lotes	9.711.618,03
	8. Individual (RPTPI) considerando o investimento na EBI e no RES de volume 147 m ³ dos lotes	10.055.919,03

¹ EBI – conjunto motobombas elétrico monobloco, trifásico, potência = 4,0 cv, AMT = 26,4 mca, Q = 4,8 L s⁻¹, Eficiência = 63,6%, rotação = 3500 rpm

² RES – reservatório semiescavado em material de 1ª categoria, com manta de PEAD de espessura 1,0 mm e volume de 18 m³ (volume de reserva para 1 hora de bombeamento)

³ RES – reservatório semiescavado em material de 1ª categoria, com manta de PEAD de espessura 1,0 mm e volume de 147 m³ (volume de reserva para 8,5 horas de bombeamento, correspondente ao horário noturno com desconto especial na tarifa de consumo de energia elétrica – horário noturno reservado)

Fonte: Autores (2023).

Os dispêndios com energia elétrica do bombeamento ao longo de 20 anos (Tabela 4) mostraram que a pressurização coletiva é mais onerosa do que a pressurização individual se for considerado apenas o bombeamento da estação principal, devido ao maior consumo de energia e demanda contratada. Porém, se forem adicionados os custos de bombeamento dentro dos lotes, a situação se reverte, ou seja, a pressurização individual se torna acentuadamente mais onerosa do que a coletiva, devido à menor eficiência energética das estações de bombeamento individuais (EBI), que são conjuntos de

menor potência e, de modo geral, menos eficientes. Considerando-se apenas o dispêndio com energia elétrica nas estações de bombeamento principais (EBP1 para a pressurização coletiva e EBP2 para pressurização individual – elevação até os lotes), a maior AMT da pressurização coletiva apresentou dispêndio 37% superior ao da individual. Porém, se for acrescido o dispêndio com a pressurização individual feita nas 156 estações elevatórias dos lotes, aí o total da pressurização individual (EBP2 + EBI) se torna 51,6% superior ao do coletivo.

Tabela 4. Decomposição dos custos com energia elétrica nas alternativas (20 anos)

Item	RPTPC	RPTPI
Custo do consumo de energia (R\$) – estação elevatória principal (EBP ¹ e EBP ²)	14.033.539,72	10.127.660,66
Custo da demanda de energia contratada (R\$) – estação elevatória principal (R\$)	6.007.235,30	4.505.426,47
Somatória – estação elevatória principal (R\$)	20.040.775,02	14.633.087,13
Custo do consumo de energia (R\$) – somatório das 156 estações elevatórias individuais (EBI ³)	0,00	15.750.062,68
Somatória total (R\$)	20.040.775,02	30.383.709,81

¹ EBP da pressurização coletiva – Bomba mancalizada, AMT = 77 mca, Q = 151 L/s, Ef = 85%, 1775 rpm, acoplada ao motor trifásico, 440 V, 200 cv, montagem sobre base de ferro, 5 unidades associadas em paralelo

² EBP da pressurização individual – Bomba mancalizada, AMT = 54 mca, Q = 151 L/s, Ef = 82,6%, 1775 rpm, acoplada ao motor trifásico, 440 V, 150 cv, montagem sobre base de ferro, 5 unidades associadas em paralelo

³ EBI da pressurização individual (cada lote) – conjunto motobombas elétrico monobloco, trifásico, potência = 4,0 cv, AMT = 26,4 mca, Q = 4,8 L s⁻¹, Eficiência = 63,6%, 3500 rpm, 156 unidades (lotes).

Fonte: Autores (2023).

Considerando os investimentos somados aos dispêndios com a energia elétrica ao longo de 20 anos (Tabela 5), a pressurização coletiva sem e com os dispositivos antitransientes (alternativas 1 e 5) mostrou-se menos onerosa do que a pressurização individual nas quais são incluídos os investimentos em RES e EBI dos lotes (alternativas 3,4, 7 e 8). Consequentemente nestas condições, o valor total por hectare irrigado foi também maior na pressurização individual.

Todavia, salienta-se que os perímetros de irrigação são geridos por unidades sem fins lucrativos, denominadas de Distritos de Irrigação, e que os custos comuns são rateados pelos produtores. Nesse sentido, a individualização da pressurização, ou seja, a transferência da gestão de água para o parceleiro implica em uma busca automática de economia de energia pelo agricultor, o que automaticamente infere na redução do tempo de operação da elevatória principal (EBP).

Tabela 5. Comparativo dos investimentos somados aos dispêndios com a energia elétrica em 20 anos nas alternativas consideradas.

Regime	Pressurização (alternativas)	Invest. + Bomb. (R\$)	Custo unitário (R\$ ha ⁻¹)
Permanente	1. Coletiva (RPPC)	28.106.245,85	30.028,04
	2. Individual (RPPI) <u>sem</u> EBI e RES	22.513.305,41	24.052,68
	3. Individual (RPPI) com EBI e RES 18 m ³	39.881.704,14	42.608,66
	4. Individual (RPPI) com EBI e RES 147 m ³	40.226.005,14	42.976,50
Permanente e Transiente	5. Coletiva (RPTPC)	28.718.832,33	30.682,51
	6. Individual (RPTPI) <u>sem</u> EBI e RES	22.726.928,49	24.280,91
	7. Individual (RPTPI) com EBI e RES 18 m ³	40.095.327,22	42.836,89
	8. Individual (RPTPI) com EBI e RES 147 m ³	40.439.628,22	43.204,73

Fonte: Autores (2023).

Ao se considerar os valores dos investimentos somados aos custos de bombeamento ao longo de 20 anos da Tabela 5, os dispositivos de proteção contra o golpe de aríete apresentaram acréscimos relativos de 2,18% (alternativa 5 em relação a alternativa 1), 0,9% (alternativa 6 em relação a alternativa 2), 0,54% (alternativa 7 em relação a alternativa 3), 0,53% (alternativa 8 em relação a alternativa 4).

A não consideração dos dispositivos de proteção implicaria em maiores custos de manutenção, posto que a chance de rompimentos e colapso é deveras reduzida e, a depender da sua repetição. Além disso pode acarretar em efeitos mais graves como a paralisação de projetos de irrigação por determinado tempo, gerando causas processuais, inclusive lucros cessantes, e, o pior dos cenários, injúrias físicas (até fatais) aos operadores do sistema e transeuntes.

6 CONCLUSÕES

Os efeitos transitórios foram mais severos na pressurização coletiva do que na pressurização individual e, portanto, o ônus a mais entre as duas alternativas (RPPC e RPTPC) foi devido a inclusão dos dispositivos de proteção, especialmente os tanques de ação unidirecional (TAU), exigindo maior quantidade de dispositivos e de maiores dimensões. O investimento adicional nos dispositivos antitransientes foi de 7,60% na pressurização coletiva e de apenas 2,17% na pressurização individual.

Em relação aos investimentos, a pressurização coletiva se mostrou mais vantajosa em relação à individual nas alternativas em que foram somados aos investimentos das estações de bombeamento principais os investimentos nos reservatórios e nas estações de bombeamento individuais dos 156 lotes.

Os custos de bombeamento na pressurização coletiva foram menos

onerosos do que aqueles da pressurização individual, nos quais são considerados os custos de elevação da água até a entrada dos lotes pela estação de bombeamento principal, bem como e os custos da pressurização feita dentro dos lotes pelas estações de bombeamento individuais.

Ao se considerar os valores dos investimentos somados aos custos de bombeamento ao longo de 20 anos, os dispositivos de proteção contra o golpe de aríete apresentaram acréscimos relativos entre 0,53 e 2,18%.

7 REFERÊNCIAS

ANA (Brasil). **Atlas irrigação 2021**: Uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021.

CARVALHO, A. L. B. **Interação fluido-estrutura sob ação de transiente hidráulico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

CARVALHO, H. F. **Análise de custo-benefício da implantação de dispositivos atenuadores do golpe de aríete em adutoras**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2020.

CASTRO, M. A. H. Simulação computacional de transientes hidráulicos em projetos de irrigação. In: RODRIGUES, L. N.; ZACCARIA, D. **Agricultura Irrigada**: um breve olhar. Fortaleza: INOVAGRI, 2020. cap. 8, p. 83-88.

CHAUDHRY, M. **Applied Hydraulic Transients**. 3rd ed. New York: Springer, 2014.

CODEVASF. **Projeto Público de Irrigação Salitre**. Brasília: Codevasf, 2018. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/irrigacao/projetos-publicos-de-irrigacao/elenco-de-projetos/em-producao/salitre-etapa-i-ba>. Acesso em: 22 fev. 2023.

GOOGLE EARTH. [Imagem]. **Mapa de localização do Projeto Salitre**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 15/11/2023.

GRAY, C. A. M. Analysis of the dissipation of energy in water hammer. **Proceedings of ASCE**, Amsterdam, v. 119, n. 274, p. 1176-1194, 1953.

IRRICAD. **Irrigation design software**. Brisbane, 2021. Disponível em: https://www.irricad.com/?gclid=Cj0KCQiA6rCgBhDVARIsAK1kGPI_MrT3isC6I8fRhxhTs-ozTp-Z_e4oi2r0e0NlKXcwXRBxa5UJHVUAi07EALw_wcB. Acesso em: 10 maio 2022.

MAGALHÃES, C. H. M. **Tubos e dispositivos de segurança utilizados para minimizar os efeitos dos transientes hidráulicos em adutoras**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MASSIERO JUNIOR, P. **Análise de transientes em uma adutora utilizando o método das características**. 2008. TCC (Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SCHIMIDT, M. J. A. **Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de torrinha**. 2016. Dissertação (Mestrado em

Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SILVA, P. A. **Amortecimento da celeridade de onda em condutos forçados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia hidráulica) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

STREETER, V. L.; LAI, C. Waterhammer Analysis Including Fluid Friction. **Journal of Hydraulics Division**, New York, v. 88, n. 79, p. 79-112, 1962.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TOMAZ, P. **Golpe de aríete em casas de bombas**. 1. ed. São Paulo: Navegar, 2010.

VEIGA, P. F. E. **Curso de Transientes Hidráulicos - uma abordagem inovadora e prática**. Barra Mansa: Academia PAM Saint Gobain, 2014. Disponível em: <https://inovagri.org.br/wp-content/uploads/2023/08/VEIGA-FEP-Curso-de-Transientes-Hidraulicos-Uma-abordagem-inovadora-e-pratica-2014.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023.

VIANNA, M. R. **Golpe de aríete em adutoras**. 1. ed. Nova Lima: Bloom, 2021.

VIEIRA, R. R. F. Os transientes hidráulicos e a agricultura irrigada. In: PAOLINELLI, A.; NETO, D. D.; MANTOVANI, E. C. **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2021b.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid Transients**. 2. ed. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1978.